

А. В. Крапивенко

Технологии мультимедиа и восприятие ощущений

Учебное пособие



Москва
БИНОМ. Лаборатория знаний
2009

УДК 004.9
ББК 32.97
К78

Рецензенты:

Березин С. Б., канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель кафедры математической физики факультета ВМиК МГУ;
Босов А. В., канд. физ.-мат. наук, доцент, зав. сектором № 171 ИПИ РАН.

Крапивенко А. В.
К78 Технологии мультимедиа и восприятие ощущений : учебное пособие. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. — 271 с. : ил.
ISBN 978-5-94774-967-0

Подробно рассмотрены различные аспекты воздействия технологий мультимедиа на восприятие информации органами чувств человека. На основе физиологических, психологических, культурных, физических и информационных концепций объясняются эффекты восприятия, описаны различные способы компьютерного воздействия на ощущения пользователя, даны практические рекомендации для разработчиков систем виртуальной реальности, мультимедиа-приложений и соответствующего периферийного оборудования.

Для студентов, обучающихся по направлению «Информатика и вычислительная техника», специалистов, а также для всех, интересующихся вопросами взаимодействия пользователя компьютера с современными средствами мультимедиа-технологий.

УДК 004.9
ББК 32.97

Утверждено на заседании кафедры 806 факультета «Прикладная математика и физика» Московского авиационного института в качестве учебного пособия по спецкурсу «Методы, средства и технологии Multimedia» для студентов, обучающихся по специальности 01.05.01 «Прикладная математика и информатика».

По вопросам приобретения обращаться:
«БИНОМ. Лаборатория знаний»
(499) 157-52-72, e-mail: binom@Lbz.ru
<http://www.Lbz.ru>

ISBN 978-5-94774-967-0

© Крапивенко А. В., 2009

© БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009

Оглавление

Введение	5
Глава 1. Современные технологии и средства мультимедиа	7
Значения термина «мультимедиа»	8
Основные определения	10
Web-ориентированные понятия	13
Общие этапы визуализации трехмерных сцен	15
Связь технологий и восприятия	17
Глава 2. Физиология человека и мультимедиа-оборудование	23
Классификация рецепторов	24
Функциональные способности органов чувств	27
Психофизический закон Вебера–Фехнера	32
Воздействие мультимедиа-оборудования на рецепторы	35
Оборудование виртуальной реальности	40
Глава 3. Общая физиология зрения	47
Строение и оптическая система глаза	48
Устройство сетчатки. Сумеречное зрение	53
Поле зрения. Погружение в виртуальный мир	57
Яркостная адаптация и контрастная чувствительность	62
Отношение Вебера. Зрительный закон Вебера–Фехнера	68
Пространственная и яркостная разрешающие способности	72
Глава 4. Восприятие цвета	81
Возникновение цветового ощущения. Законы Грассмана	85
Эффект Пуркинье. Хроматическая аберрация	91
Психология цветового восприятия	94
Цветовая температура и цветовой баланс	98
Связь цветов и звуков. Синестезия	101
Глава 5. Зрительные иллюзии	109
Op-art и классификация иллюзий	109
Восприятие образов и глубины. Эффект гистерезиса	111
Яркостные иллюзии. Латеральное торможение. Иррадиация	114
Геометрические иллюзии. Виртуальные прямые	118
Иллюзии интерпретации. Невозможные фигуры	121
Иллюзии движения. Эффект повозки	123
Глава 6. Стереозрение. Монокулярная оценка 3D-сцен	127
Стереозрение. Угловой параллакс	128
Стереооборудование мультимедиа	131

Изобразительные признаки перспективы. Точки схода	137
Монокулярные способы оценки глубины 3D-сцен	140
Глава 7. Композиция 3D-сцен. Освещение	147
Неоднородность изобразительной плоскости	148
Постановочные решения. Мизансцены	151
Кадрирование. «Правило третей»	153
Школа гештальта	155
Глобальное освещение и трехточечная схема	158
Виды источников света. Пять свойств света	160
Заливающее и направленное освещение. Тени	165
Глава 8. Видеовосприятие. Анимация	169
Восприятие движения	170
Инерционность зрения. Эффект послевидения	173
Законы субъективного восприятия яркости	174
Планы съемки. Чередование планов	177
Мультипликация. Фазы и физические законы движения тел	179
Принципы анимации Уолта Диснея	183
Глава 9. Визуальная избыточность и сжатие видеосигналов	197
Сжатие данных. Избыточность данных	198
Использование специфики восприятия в методах сжатия	200
Перспективы повышения эффективности методов сжатия	203
Субъективное оценивание качества видеоизображения	206
Глава 10. Органы слуха. Психоакустическая модель	214
Физиология слуха	215
Физика звуковых волн	220
Психоакустическая модель. Маскирование	224
Восприятие объемного звука	228
Звуки, не существующие в природе	233
Глава 11. Фрактальная геометрия природы	237
Связь восприятия с фрактальными объектами	239
Геометрические фракталы	242
Алгебраические фракталы	245
Стохастические фракталы	250
Глава 12. Мультимедиа и психология социальных культур	255
Язык цветов в различных культурах	256
Избирательность культурных ассоциаций	259
Виртуальные сообщества	261
Литература	269

Введение

Большинство книг, посвященных технологиям мультимедиа, уделяют внимание техническим, математическим и компьютерным составляющим мультимедиа-инструментов. Однако центральную роль при разработке или выборе определенного метода создания мультимедиа-продукции играют человеческие ощущения и их анализ, потому что именно для человека-пользователя как конечного субъекта восприятия и создаются все эти технологии. Кроме того, существующие публикации на эту тему при всей их информативной и технологической точности дают представление прежде всего о программно-аппаратных средствах, существовавших на момент издания книг и потому — быстро устаревающих. Но хотя в нашем динамично развивающемся мире информационные технологии приходят и уходят, человеческие органы чувств остаются практически неизменными — такими, какими они сформировались за миллионы лет эволюции.

С другой стороны, постоянный поиск новых технологий порождает такие современные способы воздействия на ощущения, какие сложно было бы себе представить первобытному человеку. Возникают новые способы передачи мультимедиа-сигналов, новые способы их восприятия и обработки, новые мультимедийные культуры.

Учитывая все это, автор подходит к изложению такой многогранной области, как мультимедиа, в контексте межфункционального стыка — основываясь на изучении физиологических, психологических и культурных особенностей реакции человека на современные технологии мультимедиа. Именно анализ специфики работы органов чувств и обработки информации в человеческом мозге позволяет найти и обобщить закономерности восприятия, на которых основывается большинство современных технологий.

Назначение данной книги — помочь читателю научиться осуществлять проектирование и разработку мультимедиа-средств таким образом, чтобы каждый выразительный аспект этой продукции стал результатом продуманного решения, осознанно связанного с максимально эффективным способом воздействия на ощущения человека.

В книге представлены базовые знания об органах чувств, их работе, зрительном и слуховом восприятии человека в связи с применением современных технологий. Понимая сложность и широту этой темы, автор рассматривает здесь лишь начальные аспекты затронутых вопросов, проиллюстрированные примерами работы соответствующих мультимедиа-средств. Однако даже краткий сводный анализ этих вопросов, помимо чисто познавательного интереса, дает возможность выделить основные закономерности восприятия, на основе которых в последующих главах даются практические рекомендации разработчикам средств мультимедиа.

Сразу заметим, что эта книга не содержит:

- описания технологий по принципу «как это устроено внутри» — здесь рассматривается только что из устройств и для какого воздействия делает;
- заманчивых, но не общепризнанных исследований;
- ссылок на конкретное программное обеспечение;
- технологий, не получивших промышленного распространения.

Книга основана на читаемом автором более 10 лет трехсеместровом цикле спецкурсов на факультете прикладной математики и физики Московского авиационного института. За время преподавания соответствующей учебной дисциплины, практических занятий и лабораторных исследований, а также интересных дискуссий со слушателями было сформировано оригинальное методическое содержание излагаемого материала, с которым предлагается теперь ознакомиться читателю.

Автор надеется, что книга будет полезна студентам, изучающим ИТ-дисциплины, в том числе по курсу «Методы, средства и технологии мультимедиа», а также всем интересующимся воздействием современных мультимедиа-технологий на ощущения человека.

Глава 10 «Органы слуха. Психоакустическая модель» написана совместно с О. В. Казанцевым, компетентным преподавателем, композитором и музыкантом.

Автор выражает сердечную благодарность своим родным и близким за поддержку и множество конструктивных замечаний в процессе работы над книгой, а также благодарит коллектив кафедры 806 Московского авиационного института и лично профессора В. Е. Зайцева, без живого участия которого появление этой книги вряд ли могло бы состояться.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда по грантам президента РФ №1128.2003.01-МК и гранта учебно-методического центра факультета прикладной математики и физики МАИ.

Искренне ваш,
Андрей Викторович Крапивенко

Глава 1

Современные технологии и средства мультимедиа

- Значения термина «мультимедиа»
- Типы мультимедиа-данных
- Физические носители сигналов
- NetArt и «контент» как новые web-реальности
- Принципы анимации трехмерных сцен
- Плюсы и минусы мультимедиа-технологий

В настоящее время существует большое количество определений термина «мультимедиа» (англ. *multimedia*), часто противоречащих друг другу и даже взаимоисключающих.

Прежде чем рассмотреть объединяемые этим термином основные понятия, коснемся чисто лингвистической проблемы, связанной с мультимедиа, а именно вопросов произношения и написания этого названия. На сегодня для составного английского слова «Multi+Media» в русском языке не существует официально закрепленного аналога, так что и в устной речи, и в литературе можно встретить различные искаженные варианты: «мультимедия», «малтимедиа» или «мултимедиа».

В дальнейшем при русскоязычном написании этого термина мы будем считать корректным использование слова «мультимедиа» (по аналогии со словами «мультфильм», «мультиканальный», «медиа-магнат», «масс-медиа»), но в устной речи — придерживаться английского произношения: «ма:лтимедиа».

Значение английских слов: «*Multi*» — много; «*Media*» — носитель, среда, информация

Значения термина «мультимедиа»

Область определения рассматриваемого нами термина весьма размыта и находится на стыке нескольких дисциплин, направлений и видов деятельности. В результате слово «мультимедиа» используется весьма свободно и не всегда точно. Поэтому отношение к этому слову и, как следствие, к стоящему за ним понятию крайне разнообразно и не всегда адекватно. Даже профессионалы в данной области при употреблении этого термина имеют в виду не всегда одно и то же.

На сегодня существует по крайней мере три различных понимания термина «multimedia» [1].

Первое и, вероятно, главное значение этого слова — «мультимедиа как идея». Имеется в виду новый подход в искусстве к комплексному, синергетическому воздействию на органы чувств, к способам подачи и хранения информации различного типа. Мультимедиа выражает художественное содержание информации. В [2] встречается следующее определение этого термина: «Мультимедиа — форма художественного творчества новыми средствами». По мере развития компьютерной техники становилась возможной обработка все более разнообразной информации. Начав с чисел (и получив на этом этапе свое название), компьютер «освоил» работу с текстами, затем в сферу его «интересов» попали звук и изображение, а сегодня компьютер активно используется для цифровой обработки видеофильмов и моделирования сред виртуальной реальности. Конечно, чтобы свободно манипулировать файлами различной природы, потребовалось значительное повышение производительности вычислительной техники, которая была достигнута сравнительно недавно, но такое развитие не было неожиданностью, сама концепция «виртуального погружения», «цифрового мира», «all digital» могла бы (и должна была) возникнуть гораздо раньше.

Второе значение слова «мультимедиа», как правило, используется чаще всего: так называют программно-аппаратное обеспечение, которое позволяет

Синергетический эффект — это эффект интеграции, объединяющего действия факторов, различных по своей природе

работать с данными различной природы. Это мультимедиа-периферия, мультимедиа-компьютеры, мультимедиа-комплексы, и, наконец, программный мультимедиа-инструментарий. Если произносится фраза «это — настоящее мультимедиа», то, скорее всего, речь идет о хорошо оборудованном рабочем месте, снабженном видеоплатой с трехмерным графическим ускорителем, многоканальной аудиоплатой, цифровым видеооборудованием, дисплеем с большим высококачественным экраном и специализированным программным обеспечением, способным объединить все это в единый работоспособный комплекс. Очевидно, что без *мультимедиа-оборудования* невозможно реализовать *мультимедиа-идею*. А в результате получается третье значение рассматриваемого термина: *мультимедиа-продукт*.

Итак, последнее из трех возможных значений слова «мультимедиа» — это некий компьютерный продукт, составленный из данных всевозможных типов, — структурированный сайт, электронная энциклопедия, компьютерная игра. Характерные черты такого продукта — объем и разнообразие данных, возможность прямого доступа к ним. Чаще всего такой продукт ассоциируется с CD и DVD.

До сих пор в истории человеческой цивилизации не возникало ситуации, в которой любой человек мог бы свободно получать доступ к такому огромному количеству информации, как сейчас. Необходимо также заметить, что одними из первых с переизбытком информации столкнулись хранители архивов, работники музеев, библиотекари. Именно они изобрели каталоги, рубрикаторы и индексы, позволяющие осуществлять эффективный поиск. Мультимедиа-продукт же может содержать не меньше информации, чем большой музей или библиотека. А поскольку в принципе он ориентирован на широкую аудиторию, то он должен быть организован так, чтобы в нем можно было разобраться, не имея специальных знаний [3]. Для улучшения дружественности интерфейса создается система анимированных меню, перекрестных ссылок и интерактивных (звуковых) подсказок, которая служит «путеводите-

лем» по мультимедиа-продукту. При этом различают линейные и нелинейные мультимедиа-продукты [4]. В первом случае пользователь не может управлять показом содержимого, а во втором он получает возможность интерактивного взаимодействия с продуктом.

Основные определения

Обобщая три рассмотренных ранее значения термина «мультимедиа», введем следующее определение¹:

Мультимедиа — это современные компьютерные технологии, позволяющие объединить в программно-аппаратной системе различные типы мультимедиа-данных (изображения, звук, видео, тактильные ощущения и т. д.) для создания единой информационной среды в целях воздействия через органы чувств на восприятие человека.

Чтобы исключить «зацикленность» определения мультимедиа («мультимедиа — технологии, объединяющие разные типы мультимедиа-данных...»), введем также определение типов мультимедиа-данных. Для этого необходимо обратиться к базовому курсу информатики.

Термины «сообщение» и «информация» вводятся в классической информатике как основные неопределяемые понятия [5]. Одно и то же сообщение, интерпретированное по-разному, может передавать разную информацию. Поэтому решающим фактором взаимосвязи между сообщением и информацией является некоторое *отображение*, представляющее собой результат договоренности между отправителем и получателем сообщения (либо предписанное им обоим) и называемое функцией интерпретации.

Однако специфика мультимедиа-технологий заключается в том, что правила интерпретации для

В силу индивидуальности восприятия информации невозможно заранее однозначно предсказать результат воздействия мультимедиа-сообщения на пользователя

¹ Как можно видеть из этого определения, технология мультимедиа включает в себя технологию «виртуальная реальность» как частный случай, что является вполне оправданным. — Прим. ред.

них обычно не формализуемы. Поэтому в силу индивидуальности (*феномена сознания*) субъективное восприятие мультимедиа-сообщений пользователем неоднозначно. Например, оптические иллюзии или звуковое сопровождение видеоряда у разных людей вызывают различные ощущения. Это позволяет сделать вывод об *изначальной многовариантности интерпретации мультимедиа-сообщений*, или, говоря другими словами, — о невозможности заранее однозначно предсказать результат воздействия мультимедиа-сообщения на пользователя.

Тип данных в информатике — это множество значений (X) и множество их отображений (I), связанных функцией интерпретации (Φ), а также множество атрибутов (A), связывающих значения x с их отображениями и описывающее их свойства (операторы, отношения, функции) [6]:

$$T = \langle X, I, \Phi, A \rangle.$$

Базовые типы данных обычно изображаются словами [7].

Расширяя классическое определение типов данных на термин «мультимедиа» и учитывая неоднозначность функции интерпретации (по причинам, приведенным выше), получаем следующее определение, введенное автором в его диссертационном исследовании [8]:

Типы мультимедиа-данных изображаются звуками, последовательностями видеокадров, статичными изображениями, вкусовыми, обонятельными и тактильными сигналами — любыми сигналами (сообщениями), предназначенными для воздействия на органы чувств человека.

Среду-носитель, через которую сообщение передается от передатчика к приемнику, называют *каналом связи*. Современное мультимедиа-оборудование в качестве носителей при передаче сообщений по каналам связи чаще всего использует [5]:

- механическое движение;
- механическое давление жидкостей и газов (гидравлика, пневматика);
- волны давления в жидкостях и газах (до 1 МГц, включая звуковые волны);
- электрические напряжения и токи;
- свободные электромагнитные волны (от 10^2 кГц до 10^6 МГц), в том числе световые волны;
- пучки электромагнитных волн (светосигнальные аппараты, лазеры).

Принципиальным является тот факт, что передача сообщений происходит во времени. Поэтому в качестве носителей заслуживают внимания такие физические величины, которые могут изменяться во времени. Изменение некоторой физической величины во времени, обеспечивающее передачу сообщения (а тем самым — и информации), называется *сигналом*. При этом для представления сообщения могут использоваться различные свойства сигнала. Характеристика сигнала, которая служит для представления сообщения, называется *параметром сигнала*.

В качестве примера рассмотрим радиовещание. Носителем здесь являются электромагнитные колебания. В диапазоне средних волн сообщение воспроизводится амплитудой колебаний, а в диапазоне ультракоротких волн — частотой колебаний (амплитудная и частотная модуляция, соответственно). Таким образом, в первом случае параметром сигнала является амплитуда, а во втором — частота колебаний.

Аналогии между живыми существами и техническими приемо-передающими устройствами служат предметом исследований в *кибернетике*. Эта наука занимается главным образом аспектами, общими для человека и технических устройств с точки зрения передачи и переработки сообщений.

Однако если уровень сигнала в технических устройствах поддается точному количественному

измерению, то уровень возбуждения рецепторов человека в результате получения ими сигнала зависит от множества факторов — от самочувствия человека, его эмоционального состояния, суточного ритма и т.д. Поэтому в физиологии предполагается, что определяемая при исследовании количественная характеристика того или иного физиологического показателя зависит как от истинной величины параметра этого показателя, так и от ряда погрешностей, вносимых измерительным прибором и персоналом [9]. Эти ошибки называют *аналитической вариабельностью*. Обычно требуется, чтобы аналитическая вариабельность не превышала 10% от измеряемой величины.

Поскольку истинное значение показателя у одного и того же человека может меняться в связи с биологическими ритмами, погодными условиями и другими факторами, то для обозначения таких изменений введен термин «*внутрииндивидуальные вариации*». Различие одного и того же показателя у разных людей называют *межиндивидуальными вариациями*. Совокупность же всех ошибок и колебаний параметра называют *суммарной вариабельностью*.

Более подробно специфика восприятия органов чувств человека и компьютерные технологии, основанные на этой специфике, рассматриваются в следующих главах.

Web-ориентированные понятия

Рассмотрим теперь современные и часто применяемые способы подачи мультимедиа-материала в распределенной сети Интернет. В последние десятилетия возникло особое направление искусства — *NetArt* (*Net-art*), — сетевое искусство, которое заключается в создании различных произведений для Интернета, публикуемых в этой глобальной сети. Одна из главных особенностей *Net-арта* — провозглашение основной его направленности на коммуникацию, а не на презентацию. Здесь целью художника становится не навязывание собственного видения, личной позиции, а интерактивное общение со зрителем, его вовлечение в творческий диалог [2].

Данный подход заключается в реализации некоей связующей технологии между смысловой нагрузкой на восприятие человека и способами цифрового представления материала, обеспечивающими эту нагрузку. Подобную технологию условно можно обобщить под термином «гипермедиа».

Для понимания этого, также многогранного, термина мы будем вводить поэтапные определения.

Гипертекст — структурированная текстовая информация, взаимосвязанная ссылками для интерактивного перемещения по структуре документа путем выбора гиперссылок (гиперсвязей).

Гиперссылка при этом позволяет однозначно указать местоположение конкретных данных, на которые произведена ссылка, и предоставить возможность для перехода пользователя к этим данным. Гиперссылки образуют сеть, объединяющую разнородную информацию в единое целое, и создают наиболее часто используемый уровень интерактивности [10].

Способ организации гиперссылок может очень сильно повлиять на полезность и удобство восприятия представляемой информации. Если их слишком мало, то пользователь будет связан жесткой последовательностью представления информации, но чрезмерное обилие гиперссылок может дезориентировать пользователя.

Гипертекстовая система состоит из *исходных узлов* и *узлов назначения*. Исходный узел — это некоторое слово (либо целая фраза, изображение, активная область экранного изображения), которое необходимо связать с какими-либо другими данными. Если пользователь выбирает (например, щелчком мыши) исходный узел, то активизируется соответствующий узел назначения. В «чисто гипертекстовой» системе при этом выводится соответствующий участок текста, а в более сложных гипермедиа-системах активизация узла назначения может приводить к показу видеоизображения или воспроизведению звука.

Гипермедиа — это совокупность разнородных мультимедиа-данных и гиперсвязей, позволяющих получать доступ к различным частям информации, представленной с помощью этих данных.

Гипертекст в общем случае является наиболее распространенным примером гипермедиа-данных.

За редким исключением практически все современные web-сайты реализуют технологию гипермедиа: на них можно встретить и художественно оформленный текст, и изображения, и звук, и видеоролики, которые сами являются способом активации других гиперсвязей.

Для обозначения совокупности полезного информационного содержимого сайта и используемых в нем подходов, способов и технологий организации представления данных специалисты часто пользуются английским словом *content* (в дословном переводе — *содержание*). Именно буквальный перевод этого термина, а также все чаще встречающаяся в русскоязычной литературе «калька» *контент*, приводят к потере части смысла, заложенного в этот термин. В рамках рассматриваемого в данной книге материала заметим, что термин «контент» нельзя отождествлять только с информационным наполнением сайта, поскольку сущность сайта, его «начинка» заключается и в способе подачи этого наполнения.

Сущность сайта заключается не только в его информационном наполнении, но и в способе подачи этого наполнения

Контент — информация, размещаемая в узлах гипермедиа-систем, объединенная со способом ее подачи.

Общие этапы визуализации трехмерных сцен

Отдельное место среди технологий воздействия на пользователя мультимедиа-продукции занимает моделирование и визуализация трехмерных сцен для создания основы виртуальной среды. Методы трехмерного моделирования уже давно используются в системах автоматизированного проектирования, на-

учных средствах визуализации, обучающих системах, но их использование для виртуальных погружений, реалистичного моделирования объектов в кино- и игровой индустрии, т.е. в основных областях применения мультимедиа-технологий началось сравнительно недавно.

Нашей целью в этом разделе книги является рассмотрение основных принципов представления трехмерных сред и этапов подготовки трехмерных сцен к их визуализации для дальнейшего интерактивного взаимодействия пользователя с объектами этих сцен.

Напомним некоторые основы компьютерной графики.

Компонентами геометрической модели являются:

- пространственное расположение объектов;
- форма (геометрия) объекта и некоторые его атрибуты — цвет, текстура, прозрачность;
- топология (связность с другим объектом).

Возможно несколько подходов к компьютерному геометрическому моделированию — каркасный, поверхностный, воксельный, твердотельный и др.

Для получения высококачественной визуализации анимированной трехмерной сцены необходима тщательная подготовка, этапы которой в общем случае можно представить следующим образом (рис. 1.1).

При построении интерактивных сцен управлением камерами и изменением объектов на сцене занимается пользователь; соответственно, от методов визуализации требуется высокая производительность для отображения действий пользователя в виртуальной среде в реальном времени. Если же анимированная трехмерная сцена не подразумевает интерактивности, то в пятый этап подготовки сцены также добавляется настройка путей движения камер и источников света во времени, а также, возможно, анимация других параметров сцены (например, встраивание в сцену систем движущихся микрочастиц для имитации изображения текущей воды, тумана или дыма). Для этих частиц задаются разнообразные правила поведения, скажем, прили-

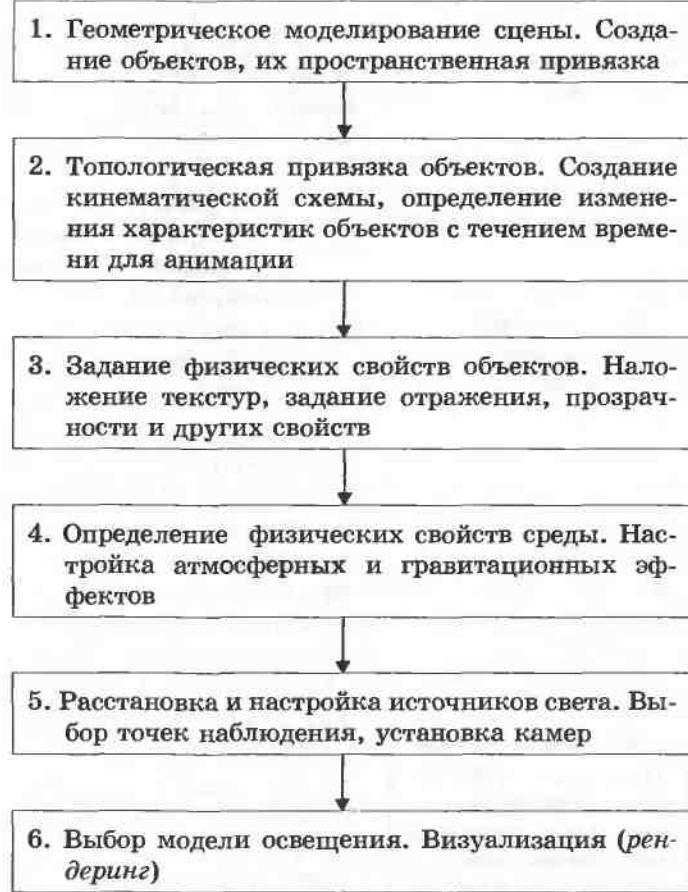


Рис. 1.1. Этапы подготовки к визуализации анимированной трехмерной сцены

пание к поверхности при соприкосновении или, наоборот, отражение от нее.

Связь технологий и восприятия

Правильное понимание разработчиком мультимедиа-средств о необходимости освоения соответствующих разделов физики, математики, информатики, вычислительной техники, с одной стороны, и основ человеческого восприятия мультимедиа-сигналов — с другой, позволяет улучшить качество создаваемых

мультимедиа-средств и повысить степень естественного, непринужденного восприятия сигналов пользователем. Необходимо знать суть воспроизведимых физических явлений, действующих на органы чувств человека, чтобы найти ответ на следующие основные вопросы:

- какие физические явления правильно имитируются применяемым программно-аппаратным мультимедиа-обеспечением, а какие имитируют-ся неправильно?
- как человек воспринимает адресованные ему мультимедиа-сообщения и как можно оказывать дополнительное влияние на его восприятие?

В последующих главах будут сделаны попытки всесторонне рассмотреть эти вопросы.

В работе [11] справедливо замечено, что среди профессиональных пользователей программ трехмерной графики и анимации бытует мнение: «Важна не сама программа, а то, как она используется». Если работа выполнена непрофессионально, то никого не заинтересует, какое именно программное обеспечение было для этого использовано, ибо главное — это результат воздействия на восприятие.

Помимо технологических и физиологических особенностей, важно учитывать и чисто психологические нюансы восприятия, заложенные в нас эволюцией человека и его социальной культурой. Сложность мгновенной оценки изображения человеком мы рассмотрим на следующем примере. При реалистичном моделировании текстур объектов трехмерных сцен для убедительной визуализации «старой» мебели и помещений необходимо вводить так называемые «карты загрязнения поверхностей», на которых царапины размещаются вокруг дверных замков, а плесень должна темнеть вокруг трещин.

Вообще, человеческое восприятие надо рассматривать как интеллектуальный процесс, связанный с активным поиском признаков, необходимых и достаточных для формирования образа и принятия решений. Этот процесс включает в себя следующие этапы:

Некоторые исследователи утверждают, что при наличии звукового сопровождения уровень запоминания информации составляет около 20%, при наличии звука и видео — 30%, а если используются интерактивные презентации, которые требуют от пользователя обратной связи, то уровень запоминания достигает 60%

- первичное выделение комплекса стимулов из потока информации и принятие решения о том, что они относятся к одному и тому же определенному объекту;
- поиск в памяти аналогичного или близкого по составу ощущений комплекса признаков, сравнение воспринятого с которым позволяет судить о том, что это за объект;
- отнесение воспринятого объекта к определенной категории с последующим поиском дополнительных признаков, подтверждающих или опровергающих правильность принятого гипотетического решения;
- окончательный вывод о том, что это за объект, с приписыванием ему еще не воспринятых свойств, характерных для объектов одного с ним класса.

Проиллюстрировать этот алгоритм можно на примере легендарной игры PacMan, которая сыграла важную роль в изучении деятельности мозга: благодаря этой компьютерной игре ученые выяснили механизмы реагирования мозга на внешнюю угрозу.

Суть игры заключается в том, что ваш персонаж — беззащитный желтый колобок — путешествует по лабиринту, собирая белые «витаминки». Игровой процесс осложняет то, что за вами гонятся «привидения», контакт с любым из которых приводит к гибели колобка.

В ходе экспериментов выяснилось, что реакция человеческого мозга на опасность зависит от близости объекта, таящего в себе угрозу. Если преследователи колобка находились достаточно далеко, то информацию обрабатывали лобные доли мозга, отвечающие, кроме всего прочего, за стратегическое планирование. Соответственно, игрок, располагавший некоторым количеством времени, детально продумывал маршруты следования своего персонажа. Если же «виртуальное чудовище» резко сокращало дистанцию, то подключалась область мозга, ответственная за более примитивные, эволюционные механизмы самозащиты. Непродуманность действий наших человекоподобных предков при ис-

Чем ближе к вам угроза, тем быстрее вы на нее реагируете. Но за скорость вы расплачиваитесь свободой выбора вариантов реагирования

пользовании таких механизмов компенсировалась скоростью реакции, однако набор мгновенных вариантов, предлагаемых мозгом, был невелик: вступить в бой, убежать или замереть на месте. Выбор наиболее эффективной стратегии выживания при конкретном развитии событий диктовался уровнем нависшей угрозы.

Восприятие изменяется под влиянием условий жизни человека, т. е. развивается. Использование тщательно сбалансированных мультимедиа-технологий и творческих подходов положительно воздействует на это развитие. Так, целевое наблюдение за группами студентов, играющих в трехмерные «шутеры» (игры, в которых нужно стрелять во врагов в режиме реального времени), показало улучшение периферического зрения, т. е. физиологического параметра, который непосредственно не подвергался целенаправленной тренировке. По одной из теорий, такие игры *меняют способ получения человеческим мозгом визуальной информации* [12].

Подобное влияние игр со сложной анимацией, требующих определенного напряжения для концентрации зрения, можно использовать в различных сферах деятельности. Например, люди с определенными нарушениями зрения, такими как *амблиопия* (заболевание, при котором один глаз вообще не задействован в процессе зрения либо задействован в очень малой степени), могут улучшить свою способность видеть. Для этого им необходимо пользоваться специальным реабилитирующим мультимедийным программным обеспечением, в котором, как и в игре, нужно очень быстро идентифицировать движущиеся объекты.

Однако не стоит забывать и об отрицательных сторонах чрезмерного или непродуманного воздействия мультимедиа-технологий на восприятие. Печально известны случаи игромании (вплоть до наступления летального исхода у заигравшихся за компьютером «геймеров», связанного с сердечной недостаточностью или общим истощением). А не протестированные на репрезентативных экспертных выборках мультимедиа-сообщения могут вызывать у

отдельных людей расстройства психики и припадки, как это произошло с первым вариантом переливающегося логотипа олимпиады «Лондон-2012».

Мультимедийное резюме



Подведем итоги первой главы в разрезе ключевых понятий и определений мультимедиа, которые потребуются нам в дальнейшем.

- Исходя из трех различных областей определения термина «мультимедиа»: как идея, как оборудование и как продукт, — нами введено новое обобщающее определение, опирающееся на понятие типов мультимедиа-данных.
- Типы мультимедиа-данных представляются любыми сигналами, предназначенными для создания ощущений у пользователя воздействием на его органы чувств. Однако в отличие от обычных типов данных (в информатике) в технологиях мультимедиа принципиальным моментом является изначальная многовариантность интерпретации мультимедиа-сообщений пользователем. Это связано как с психологическими (в том числе социокультурными) особенностями восприятия, так и с аналитической вариабельностью количественных оценок физиологических показателей.
- Естественным для мультимедиа-продукции является понятие «контент», которое объединяет информационное наполнение мультимедиа-продукта в сети Интернет и способы подачи этого наполнения, т. е. способы непосредственного воздействия на органы чувств пользователя.
- На каждом из этапов построения геометрической модели трехмерной сцены крайне важна реалистичность моделируемых объектов, текстур, атмосферных эффектов, источников света и других элементов сцены.
- Использование мультимедиа-технологий может как развивать отдельные человеческие способности (например, тренировать боковое зрение), так и наносить вред в случае необдуманного применения, о чём нужно помнить при разработке мультимедиа-систем.



Контрольные вопросы и задания

1. Как вы понимаете принцип синергетического воздействия на органы чувств?
2. Что такое нелинейный мультимедиа-продукт?
3. Почему нельзя однозначно предсказать результат воздействия мультимедиа-сообщения на пользователя?
4. Какие примеры можно привести для каждого из рассмотренных типов мультимедиа-данных?
5. Приведите свои примеры мультимедиа-оборудования, использующего каждый из рассмотренных каналов связи.
6. Что такое аналитическая вариабельность? От чего она зависит?
7. Допустимо ли использовать термин «гипермедиа» применительно к исключительно текстовому сайту?
8. Как использование мультимедиа-технологий может положительно или отрицательно воздействовать на человека?

Глава 2

Физиология человека и мультимедиа- оборудование

- Рецепторы и анализаторы
- Виды ощущений
- Возбудимость
- Пороги чувствительности
- Виртуальная реальность

Для понимания основных подходов, используемых мультимедиа-технологиями для воздействия на органы чувств, необходимо проанализировать особенности человеческого восприятия, понять, с помощью каких основных внешних воздействий создаются эффекты присутствия и погружения пользователя в реальные и искусственные среды. Для этого обратимся к классическим трудам по физиологии центральной нервной системы.

Ощущение — это построение образов отдельных свойств предметов окружающего мира в процессе взаимодействия с ними *рецепторов*. При этом различают *реальные ощущения*, возникающие в процессе непосредственного взаимодействия с предметами, и *виртуальные ощущения* («сенсорные впечатления»), получаемые на основе искусственно созданных представлений об этом предмете.

Восприятие пространства — чувствительно-наглядное отражение пространственных свойств вещей (их величины и формы), их пространственных отношений (расположения относительно друг друга и воспринимающего субъекта в плоскости и в глубину) и движений. В восприятии участвуют все органы чувств человека [13].

Рецепторы — молекулярные или клеточные структуры, воспринимающие действие факторов внешней или внутренней среды и передающие информацию о сигнальном значении раздражителя на следующие уровни обработки. То есть именно рецепторы обеспечивают первичное возникновение ощущений.

Понятие рецепторов обычно рассматривают с двух точек зрения: с молекулярно-биологической и морфофункциональной. В последнем случае говорят о *сensoryных рецепторах*, функцией которых является восприятие действия раздражителей и обеспечение возникновения возбуждения в нервных волокнах [9]. Совокупность однотипных сенсорных рецепторов, а также область организма, в которой они сосредоточены, называют *рецепторным полем*.

Искусственно создаваемые средствами виртуальной реальности воздействия на сенсорные рецепторы как раз и создают сенсорные впечатления.

Классификация рецепторов

Анализаторами называют физиологические системы, обеспечивающие восприятие, проведение и анализ информации о состоянии внешней и внутренней среды и формирующие специфические ощущения. По И.П. Павлову, в целостной системе каждого анализатора выделяют три отдела:

- 1) периферический отдел, воспринимающий действие раздражителя и обеспечивающий генерацию возбуждения в нервных волокнах. Например, для зрительного анализатора это светочувствительные клетки сетчатки;
- 2) проводниковый отдел, транслирующий и перекодирующий (или блокирующий) проведение импульсов. Для глаза это задние слои сетчатки и оптический нерв;
- 3) центральный (участки коры больших полушарий), производящий декодирование сигналов и их обработку.

Одна из возможных классификаций анализаторов заключается в их делении по характеру ощуще-

- Виды анализаторов:**
- обонятельный;
 - вкусовой;
 - слуховой;
 - зрительный;
 - вестибулярный;
 - тактильный;
 - температурный;
 - болевой
 - и др.

ний, возникающих в результате воздействия на соответствующие рецепторы. По этой классификации выделяют обонятельный, вкусовой, слуховой, зрительный, вестибулярный, тактильный, температурный, болевой и другие анализаторы.

Поскольку возбуждение изначально появляется в периферическом отделе анализатора, рассмотрим первичное формирование ощущений в рецепторных полях. Физиолог Ч. Шерингтон классифицировал человеческие ощущения по анатомическому расположению рецепторов (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Классификация ощущений по анатомическому расположению рецепторов, предложенная Ч. Шерингтоном

Как видно из рис. 2.1, здесь выделяются три основных класса ощущений.

1. Экстерорецептивные (экстерорецептивные) — возникающие при действии на рецепторы, которые расположены на поверхности тела. При этом экстерорецептивные ощущения подразделяются на *дистанционные* (зрительные, слуховые и обонятельные) и *контактные* (осознательные, или тактильные, и вкусовые), причем обонятельные ощущения можно в каком-то смысле считать занимающими промежуточное положение между этими подклассами экстерорецепции.

2. Проприоцептивные (кинестезиические) — возникающие при действии на рецепторы, расположенные в мышцах, сухожилиях и суставных сумках и свидетельствующие о движении и относительном положении частей тела. Сюда мы также считаем необходимым отнести ощущения при работе органа равновесия и пространственной ориентации — *вестибулярного аппарата*.

3. Интероцептивные (органические) — обусловленные обменными процессами во внутренней среде организма.

Существует также классификация рецепторов в зависимости от энергии адекватных раздражителей по (В. Вундту [14]), по которой они делятся на механорецепторы, фоторецепторы и хеморецепторы. Есть и другие классификации, однако мы сосредоточимся на уже изложенных, поскольку они представляют для нас наибольший интерес с точки зрения реализации мультимедиа-технологий.

Некоторые передающие и воспринимающие органы чувств человека и высших животных, а также носители сообщений и каналы связи перечислены в табл. 2.1:

Таблица 2.1

Передающие и воспринимающие органы человека и животных

Передающий орган	Физический носитель сообщений	Тип рецептора: воспринимающий орган (рецептор)	Способ передачи (восприятия)
Голосовой аппарат гортани	Звуковые волны (от 16 до 16 000 Гц)	Механорецепторы: слух (улитка уха, волосковые клетки)	Слуховой
Мышцы лица и др. (мимика и жесты)	Световые волны (около 10^{15} Гц)	Фоторецепторы: зрение (сетчатая оболочка глаза — палочки и колбочки)	Оптический (зрительный)
Мышцы рук и кистей (навыки)	Давление	Механорецепторы: осязание (рецепторы прикосновения и давления)	Тактильный (осознательный)
Потовые и запаховые железы	Концентрация молекул пахнущего вещества в воздухе	Хеморецепторы: обоняние (рецепторы слизистой оболочки носа)	Обонятельный

Продолжение табл. 2.1

Передающий орган	Физический носитель сообщений	Тип рецептора: воспринимающий орган (рецептор)	Способ передачи (восприятия)
—	Концентрация молекул в жидком растворе	Хеморецепторы: вкус (язык, вкусовые почки слизистой оболочки рта)	Вкусовой
—	Температура (от -20 до +50 °C)	Терморецепторы	
—	Ускорение	Механорецепторы: чувство равновесия (вестибулярный аппарат)	
—	Механические и другие повреждения тканей	Механорецепторы: болевая чувствительность (свободные нервные окончания)	

Функциональные способы органов чувств

Функциональные способы органов чувств лежат в определенных пределах. Для измерения их характеристик рассмотрим следующие понятия.

Возбудимость — свойство нервных и мышечных клеток отвечать *возбуждением* на действие раздражителя.

Возбуждение — ответная реакция высокоспециализированных клеток, характеризующаяся проявлением специфической функции и потенциала действия этих клеток.

Необходимо отметить, что возбудимость при эволюции высокоспециализированных (рецепторных) клеток развилась из свойства *раздражимости*.

Раздражимость — универсальное свойство всех клеточных структур отвечать на действие раздражителя изменением своей жизнедеятельности. Например, эпителий кожи при воздействии ультрафиолетовых лучей изменяет обмен веществ, накапливая защитный пигмент [9].

Возбуждение вызывается действием раздражителей. По признаку биологического соответствия раздражители делятся на *адекватные и неадекватные*. При разработке мультимедиа-оборудования важно учитывать допустимое влияние проектируемых раздражителей — будет ли оно адекватным и пороговым.

Адекватные раздражители — те, к восприятию которых чувствительные структуры приспособлены и отвечают возбуждением на малую силу раздражителя. Например, для активации слуховых рецепторов достаточно энергии звуковых волн, приближающейся к обычным тепловым перемещениям молекул воздуха.

Неадекватные раздражители не вызывают возбуждения даже при значительной силе воздействия. Лишь при чрезмерной, граничащей с повреждением силе воздействия такие раздражители могут вызвать возбуждение. Так, ощущение «искр», «света» может возникнуть при ударе в область глаза. При этом энергия механического, неадекватного раздражителя в миллиарды раз превышает пороговую величину светового раздражителя.

По величине силы и эффективности действия раздражители делят на *подпороговые, пороговые и сверхпороговые*.

Для понимания смысла такой классификации раздражителей рассмотрим показатели возбудимости, наиболее критичные для мультимедийных технологий.

Порог чувствительности (интенсивности) раздражения — это минимальная величина интенсивности раздражителя, достаточная для вызова возбуждения. Чтобы в результате действия раздражителя на органы чувств возникло ощущение, необходимо, чтобы вызывающий его стимул достиг определенного порога.

Величина порогового значения зависит от времени действия раздражителя. Если время действия увеличивать, то его пороговая интенсивность будет снижаться, т.е. человек способен реагировать на меньшие раздражения при более длительном их воз-

действии. Наименьшей интенсивность становится при бесконечно длительном времени действия раздражителя. Эту зависимость характеризует кривая «интенсивность-время» (рис. 2.2). Такая зависимость, в частности, объясняет, почему при низкой интенсивности раздражения увеличивается время реакции.



Рис. 2.2. Кривая зависимости между порогами интенсивности и временем воздействия

Переход от подпороговых раздражителей, не вызывающих ощущения, к воспринимаемым, пороговым происходит скачкообразно. Если воздействие уже почти достигло порогового значения, то достаточно бывает едва заметно изменить интенсивность раздражителя, чтобы он из полностью невоспринимаемого превратился в полностью воспринимаемый. Вместе с тем, даже значительные изменения интенсивности раздражителя в пределах допорогового диапазона не порождают никаких ощущений. Аналогично, существенные изменения значения уже достаточно сильных, сверхпороговых раздражителей тоже могут не вызвать никаких изменений в уже имеющихся ощущениях: они либо переходят в болевые, либо просто перестают восприниматься как ощущения определенной силы.

Эта закономерность обычно представляется в виде специальной кривой, которую в психофизике называют *психометрической*. Она может быть получена для различных органов чувств и всех видов

Иллюзия Мюллера-Шумана
После многократного поднимания тяжелого груза более легкий груз кажется легче, чем он есть в действительности. И наоборот, после поднимания легкого груза более тяжелый кажется еще тяжелее

ощущений. Значение интенсивности, примерно соответствующее 50% случаев возникновения и отсутствия ощущений, обычно и принимается за абсолютный порог.

Для каждого вида ощущений существуют свои пороги чувствительности. Чтобы вызвать слуховое ощущение, достаточно энергии в 10^{-12} эрг. Для появления зрительного ощущения достаточно 10^{-10} эрг. Можно также привести следующие качественные оценки пороговых значений для органов чувств [18]:

- *зрение* — способность воспринимать ясной темной ночью пламя свечи на расстоянии до 48 км от глаза;
- *звук* — различение тиканья ручных часов в полной тишине на расстоянии до 6 м;
- *вкус* — ощущение присутствия одной чайной ложки сахара в растворе, содержащем 8 л воды;
- *запах* — ощущение наличия духов при лишь одной их капле, пролитой в помещении, состоящем из 6 комнат;
- *осознание* — ощущение падения крыла мухи на поверхность кожи с высоты около 1 см.

Воспринимаемая интенсивность раздражения от порогового значения до границы болевого ощущения для большинства видов раздражений лежит в больших пределах:

- для яркости — $1:10^{14}$;
- для громкости звука — $1:10^6$:
- для высоты звука — $1:10^3$ и т. д.

Позже мы рассмотрим интенсивность раздражения (в разделе о законе Вебера–Фехнера).

Следующим рассматриваемым показателем является порог времени раздражения — минимальное время, в течение которого должен действовать раздражитель, чтобы вызвать возбуждение. При этом нужно понимать, что общее время реакции на раздражение (*латентное*, или *скрытое*, время) — это существенно больший временной отрезок, чем просто порог времени раздражения.

Рассмотрим некоторые значения общего времени реакции как представляющего интерес для динамичных мультимедиа-приложений. Для акустических (звуковой импульс) и оптических (включение лампочки) сигналов время реакции составляет для человека 100–250 мс до ответа, состоящего в том, что испытуемый нажимает кнопку [5]. Для более сложных заданий время реакции заметно увеличивается (прочитать указанное слово — 350–550 мс, назвать указанный предмет домашнего обихода — 600–800 мс). Эти оценки, конечно же, являются усредненными, — например, у некоторых мастеров боевых искусств время реакции «включение лампочки — удар рукой» может уменьшаться до 30–50 мс.

Все это говорит о том, что процесс восприятия — не только функция рецепторов. Сюда также входят прохождение раздражения по нервным путям, его переработка в головном мозге, а также проведение ответа к эффектору. При этом на глаз как на воспринимающий орган приходится около 20–40 мс, а на срабатывание мышц руки как передающего органа — около 30–50 мс.

Учитывая длину нервных волокон, скорость прохождения возбуждения по нервным путям составляет для нерва ноги виноградной улитки — 0,4 м/с, для седалищного нерва лягушки при 18 °C — в 70 раз больше (28 м/с), а для двигательных нервных волокон человека — в 300 раз больше (120 м/с).

Если включить неяркий свет, а затем очень медленно увеличивать его яркость, то глаз может не заметить такое увеличение яркости

Еще один показатель — минимальный градиент нарастания силы раздражителя во времени. Это минимальная скорость увеличения силы раздражителя во времени, достаточная для вызова возбуждения. Если сила раздражителя увеличивается очень медленно, то рецепторы приспособливаются к его действию и не отвечают возбуждением. Такое приспособление возбудимой ткани к медленно увеличивающейся силе раздражителя называют *адаптацией*, или *аккомодацией*. Чем больше минимальный градиент, тем ниже возбудимость ткани и тем более выражена в ней способность к аккомодации [9]. Одни из анализаторов обнаруживают высокую скорость адаптации, другие — низкую. Очень быстро,

например, способны адаптироваться рецепторы, расположенные в коже (кроме болевых). Гораздо медленнее происходит зрительная адаптация, а следом идут слух, обоняние и вкус.

При проектировании различных мультимедиа-устройств в ряде случаев можно избежать сильных болевых и шоковых воздействий, меняя скорость нарастания силы и время воздействия. В первую очередь, это касается яркости изображения и громкости звука.

Психофизический закон Вебера–Фехнера

Закон Вебера говорит о том, что чем сильнее раздражение, тем больше шаг разрешающей способности — минимального приращения раздражения, которое в состоянии уловить человек

Вернемся к вопросу об интенсивности раздражения, чтобы рассмотреть одну из фундаментальных зависимостей, носящую название «закон Вебера–Фехнера».

Сначала рассмотрим факт, экспериментально установленный французским ученым, создателем фотометрии П. Бугером и уточненный немецким психофизиком Э. Вебером: разрешающая способность (способность воспринимать раздельно два различных раздражения) пропорциональна интенсивности раздражения. Э. Вебер впервые сформулировал его в 1834 г. для осязания.

Если через S обозначить интенсивность раздражения, а через δS — разрешающую способность, т. е. минимальное изменение раздражения, которое приводит к еще улавливаемому различию ощущений, то закон Бугера–Вебера утверждает, что:

$$\delta S = k \cdot S, \text{ где } k \text{ — константа.}$$

Значения постоянной безразмерной величины k , получившей название *константы Вебера*, распределены в широкой области и зависят от рассматриваемого ощущения и индивидуальных качеств испытуемого.

Опытным путем были получены минимальные значения величины k для особенно «тонко чувствующих» испытуемых:

- яркость света — $k \approx 0,015$;
- длина отрезков — $k \approx 0,025$;

- громкость звука — $k \approx 0,03$;
- высота звука — $k \approx 0,003$;
- вес — $k \approx 0,019$;
- вкус — $k \approx 0,25$;
- запах — $k \approx 0,35$.

По нервным путям пробегают импульсы электрохимической природы с максимальной амплитудой 80 мВ и длительностью порядка 1 мс [5]. Интенсивность раздражения определяет частоту таких импульсов: она в общем случае пропорциональна логарифму интенсивности раздражения. Этот результат согласуется с постулированным Г. Фехнером в 1850 г. и подтвержденным психологическими экспериментами законом, утверждающим, что интенсивность ощущения пропорциональна логарифму интенсивности раздражения (рис. 2.3):

$$R = C \lg(S / S_0).$$

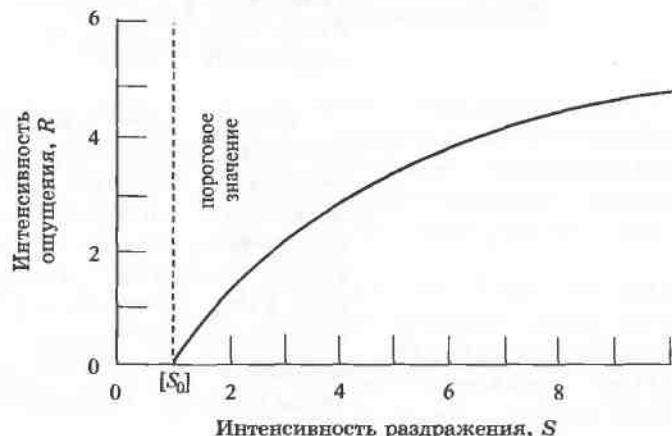


Рис. 2.3. Закон Фехнера

Чтобы орган вообще мог что-либо воспринять, интенсивность раздражения должна превосходить пороговое значение S_0 . Например, для слуха пороговое значение составляет около $2 \cdot 10^{-7}$ мбар, — это и есть рассмотренное выше тикание часов с расстояния в 6 м. С другой стороны, ограничивающий болевой порог для уха находится рядом со значением

$2 \cdot 10^{-1}$ мбар. Шоковые гранаты разработаны военными с учетом превышения этого болевого порога в зоне поражения.

Если для графика, в соответствии с законом Фехнера для интенсивности раздражения, взять логарифмическую шкалу, то разрешающая способность окажется постоянной, как только раздражение превзойдет пороговое значение. Иными словами, можно считать для простоты, что ощущения растут в арифметической прогрессии, когда раздражители растут в геометрической прогрессии.

В итоге мы получаем *психофизический закон Вебера–Фехнера*: интенсивность ощущения R логарифмически зависит от физической интенсивности раздражителя S :

$$R = k \log S + c,$$

где k и c — некоторые константы, определяемые данной сенсорной системой. Эта зависимость была выведена при дополнительном предположении о субъективном равенстве едва заметных различий ощущений.

Выводя свой логарифмический закон, Фехнер ошибочно предполагал, что минимальный прирост ощущения будто бы есть постоянная величина на всем протяжении психологической шкалы. Существует также *степенной закон Стивенса*, утверждающий, что шкала должна быть не логарифмической, а степенной, однако к этому закону тоже есть свои нарекания. *Обобщенный психофизический закон Забродина* частично примиряет между собой законы Стивенса и Фехнера [15].

Поскольку для двух максимально близких еще отличимых друг от друга интенсивностей раздражения S и S' , согласно закону Вебера, справедливо соотношение:

$$S' = (1 + k)S,$$

то можно получить следующие верхние оценки для общего количества различимых между собой интен-

сивностей раздражения исходя из приведенных ранее минимальных значений величины k :

- $14/\lg 1,015 = 14/0,0064 \approx 2^{11}$ степеней яркости;
- $6/\lg 1,03 = 6/0,013 \approx 2^9$ степеней громкости;
- $3/\lg 1,003 = 3/0,0013 \approx 2^{11}$ высот звука.

Совершенно иная картина наблюдается, когда речь идет о количестве интенсивностей раздражения, которые способен одновременно уловить пользователь. Если говорить о слухе, то это, в среднем, всего лишь от 5 до 7–8 различных высот звука. Хотя, конечно же, к данным оценкам не стоит относиться абсолютно. Известен исторический пример, когда лионские ткачи — представители сложившихся за столетия династий этой профессии — могли различать свыше 100 оттенков одного только черного цвета.

Воздействие мультимедиа-оборудования на рецепторы

Разумеется для компьютерного формирования адекватных, лежащих в допустимых пределах раздражителей необходимо специализированное оборудование. Классификация мультимедиа-оборудования, предназначенного для воздействия на органы чувств человека [8], приведена в табл. 2.2.

Конечно, приведенный в табл. 2.2 список групп оборудования не является окончательным; кроме того, к мультимедийному оборудованию также относят устройства обработки мультимедиа-данных, такие как звуковые платы, видеомонтажное оборудование, трехмерные сканеры и т. п.

Приведенная здесь таблица требует некоторых комментариев касательно редко встречающегося мультимедиа-оборудования.

Вначале рассмотрим *ощущение*. Оно является результатом сложного комбинирования четырех других, более простых видов ощущений: давления,

Таблица 2.2

**Классификация мультимедиа-оборудования
по воздействию на разные группы рецепторов**

Чувство	Мультимедиа-оборудование	
	узкоспециализированное	универсальное
<i>Экстерорецепторы дистанционные</i>		
Зрение	Проекционные экраны различных типов, плазменные, CRT и LCD дисплеи; осветительные устройства с компьютерным управлением; стереоочки, стереопроекторы	
Слух	Мембранные динамики; струнные, духовые, ударные и прочие музыкальные инструменты с электронным управлением	устройства виртуальной реальности (шлемы, костюмы, студии)
Обоняние	Игровые приставки с генераторами запахов; принтеры с ароматическими чернилами; синтезатор запахов iSmell	
<i>Экстерорецепторы контактные</i>		
Осязание	Манипуляторы с обратной связью; киберперчатки; шоковые жилеты	
Вкус	Устройство «печати» вкусов на вафельной подложке Scent Dome [16, 17]	
<i>Проприорецепторы (рецепторы глубокой чувствительности)</i>		
Ощущение положения человека в пространстве и инерционные ощущения формируются в современных тренажерах за счет того, что кабина тренажера, управляемая компьютером, передает часть ускорений, которые в реальности должно испытывать моделируемое устройство.		
<i>Интерорецепторы</i>		
Серийное оборудование практически не представлено. Однако уже сегодня существуют кардиостимуляторы и управляемые микроэлектронные устройства, которые могут транспортировать лекарства не только по пищеводу, но и по кровеносной системе в любые области человеческого организма и, соответственно, контролировать обменные процессы в заданных органах. Это говорит о том, что и на данные рецепторы со временем можно будет воздействовать с помощью мультимедиа		

боли, тепла и холода, причем для каждого из них существует свой специфический вид рецепторов, неравномерно расположенных в различных участках кожной поверхности [18].

Понятие «*осознательные манипуляторы*» чрезвычайно широко. Так могут быть названы и компьютерная мышь, и сложнейшее устройство, передающее движения руки и кисти, и руль с педалями, позволяющий играть в компьютерные игры. Так, современные киберперчатки снабжены сенсорами, измеряющими позицию и перемещения пальцев и всей кисти. Наличие вибrotактильных устройств, которые размещены в киберперчатке, позволяет ощущать прикосновение к виртуальным объектам. Добавление устройств, передающих переменное усилие, синхронизированное с виртуальным изображением, позволяет не только касаться рукой виртуальных объектов, но и выполнять над ними сложные манипуляции, требующие существенных усилий руки.

Например, манипулятор-наперсток — это устройство, отслеживающее движения пальца. Когда пользователь дотрагивается до виртуального объекта, наперсток воздействует на палец, оказывая на него соответствующее давление [19]. Такой способ позволяет различать гладкие сферические поверхности, плоские стены, острые углы, ощущать эффект трения и даже различную фактуру поверхности. Существует и дополнительная функция, основанная на использовании двух пальцев руки, одним из которых является большой палец. Действия ими, пользователь может как бы «подцеплять» объекты, сгенерированные компьютером. Это устройство может быть использовано для имитации работы хирургов и обучения рабочих сложным действиям.

Основное новшество современных игровых манипуляторов — способность передавать интерактивные усилия за счет механизма имитации отдачи и вибрации (I-Force-feedback). В джойстик или мышь для этого интегрируется устройство, которое может реагировать на команды, генерируемые компьютером, — например, обеспечивает обратные тактильные ощущения, когда при ударе или пуле, попавшей в персонаж в процессе игры, играющий ощущает легкую вибрацию мыши.

В качестве примера оборудования, воздействующего на тактильные ощущения туловища, можно рассмотреть *геймер-жилеты*. В них встраиваются 20–30-ваттные усилители звука и динамики, которые играющий прикрепляет к своей груди. Допустим, в игровом эпизоде играющий вступил в схватку с врагом. Если ему нанесли удар или в него попала пуля, то звук, соответствующий выстрелу или удару, проходит через усилитель в динамики и оказывает воздействие на грудную клетку играющего, создавая иллюзию реальности происходящих событий. В других моделях таких жилетов звуковые сигналы, соответствующие игровому эпизоду, проходят через усилитель и подаются на находящийся в жилете магнитный соленоид, который генерирует импульсы, вызывающие вибрации в теле играющего. Сила получаемых при этом ударов может регулироваться по желанию игрока — от легкого прикосновения до мощной пульсации в груди. Производители такого оборудования предусматривают также возможность отделения музыкального сопровождения от звука ударов и выстрелов.

Воздействие на все органы чувств в виртуальной среде затруднено не столько техническими сложностями создания генераторов вкуса и запаха, сколько необходимостью в этом случае генерировать все возможные вкусы и запахи, — что вряд ли понравится пользователю

Теперь перейдем к обонянию и вкусу.

Вкусовые ощущения имеют четыре основные модальности: сладкое, соленое, кислое и горькое. Все остальные ощущения вкуса представляют собой разнообразные сочетания этих четырех.

Обоняние — вид чувствительности, порождающий специфические ощущения запаха. Это одно из наиболее древних, простых, но жизненно важных ощущений. Путь от рецепторов обоняния до мозговых структур, где принимаются и перерабатываются получаемые от них импульсы, наименее короткий. Нервные волокна, отходящие от обонятельных рецепторов, непосредственно, без промежуточных переключений попадают в головной мозг.

Основные вопросы синтеза ощущений вкуса и обоняния заключаются не столько в технических сложностях изготовления соответствующего оборудования, сколько в достижении полной реалистичности имитируемых ощущений. Действительно, для эффекта глубокого погружения в виртуальную среду необходимо воздействовать на пользователя пол-

ным, правдивым спектром *сенсорных впечатлений*. В частности, концепция глубокого погружения подразумевает, что на «виртуальной экскурсии» оборудование должно:

- уметь генерировать не только запахи роз, но и, если вы подошли близко к мусорному баку, запахи разложения;
- при попытке «попробовать» ядовитые растения или грибы воспроизводить неприятный, отталкивающий вкус;
- при контактах с вымышленными персонажами имитировать специфические, ни на что не похожие запахи и т.п.

Приведенные выше примеры подчеркивают, что разработчики виртуальных сред (особенно компьютерных игр) для достижения реалистичности помещают в среду разнообразные объекты из нашей действительности, которые не всегда хорошо выглядят и пахнут. И необходимость присутствия в игровом мире таких объектов одновременно очень затрудняет их полноценную имитацию воздействием на все органы чувств одновременно — хотя бы из соображений безопасности пользователя.

Тем не менее при аккуратном подборе сцен комплексное воздействие, безусловно, усиливает эффект виртуального присутствия. Например, в Берлине в экспериментальном театре публике предлагали смотреть на лежащих на льдинах тюленей, и при этом из подлокотников сидений в воздух поднимался рыбный аромат. Когда же на экране животные соскальзывали с льдин в воду, кресла начинали покачиваться, и у зрителей возникало ощущение, что они сами сидят на качающейся льдине. Из распылителей же, вмонтированных в спинки стоящих впереди кресел, в это время летели мелкие брызги воды [20].

Кратко рассмотрим существующие нетрадиционные образцы подобного оборудования, выпускаемого в промышленных масштабах.

Генераторы запахов используются в ряде компьютерных игр (например, *Leisure Suit Larry*); их применяют также в некоторых японских кинотеатрах: сме-

яться принято под запах апельсина, грустить — под аромат мяты. Принтеры с ароматическими чернилами умеют, в зависимости от модели, генерировать от 2 до 10–20 различных запахов. Используются они, как правило, для распечатки поздравлений и писем любовного характера.

Устройство *вкусовой* печати тоже представляет собой принтер, который формирует изображение съедобными красителями на вафельных подложках. Очевидно, такой подход представляет собой ограниченную экспериментальную версию, и сложно предсказать появление полноценного генератора вкусовых ощущений в обозримом будущем.

По указанным причинам органы обоняния и вкуса далее подробно рассматриваться не будут, а основной фокус нашего внимания будет уделен органам зрения и слуха.

Оборудование виртуальной реальности

Напомним, что сенсорные впечатления (виртуальные ощущения) формируются на основе искусственно созданных представлений. Тогда вполне естественно будет ввести следующее определение.

Система виртуальной реальности — это комплекс программно-аппаратных средств, создающих эффект погружения пользователя в искусственно созданную трехмерную среду на основе сенсорных впечатлений.

Полноценный эффект погружения заключается не только в ощущении человеком своего пассивного присутствия в виртуальной сцене. Главным условием здесь является возможность *интерактивного взаимодействия пользователя с окружающей его виртуальной средой*.

Большинство используемых сегодня в Интернете виртуальных сред являются игровыми. Однако зачастую бывает трудно провести грань между профессиональными инструментами подготовки виртуаль-

ных сред и игровыми редакторами игр класса FPS (first person shooter — «шутер от первого лица»). Например, редакторы уровней для большинства продвинутых FPS-игр позволяют детально воссоздавать виртуальные помещения, открытые местности, предметы и обстановку интерьера. В свою очередь, профессиональные инструменты часто тоже используются для создания игр.

По мнению автора, к программным VR-технологиям следует относить только те, которые позволяют организовать свободное взаимодействие пользователя с объектами и персонажами виртуальной сцены. Согласно этому критерию, приведенный в нашем примере игровой редактор *не относится* к рассматриваемому классу программного обеспечения, поскольку возможность полноценного взаимодействия с предметами и элементами обстановки обычно ограничена специфическим «военным» характером FPS-игр.

На сегодня известно достаточно много областей, в которых используются VR-технологии: это визуализация, моделирование, навигация, перемещение в виртуальном пространстве при поиске информации, развлечения (в частности, игры). Виртуальная реальность помогает инженерам и ученым визуально представить сложные системы в случаях, когда создать реальный объект очень сложно или дорого. Работа с визуальной моделью составляет основу имитационного моделирования. Визуализация и моделирование — это важные области практического применения VR-технологий, но они менее ориентированы на Интернет, чем навигация, воспроизведение эффекта присутствия и игровые среды.

Для создания эффекта полного погружения пользователя в искусственно созданную среду мультимедиа-оборудование объединяют в имеющую единый центр управления систему виртуальной реальности (СВР) [21].

Прежде всего, к СВР относятся:

- различные тренажеры (транспортные, инженерные, медицинские, спортивные и др.);

- ситуационные центры, центры принятия стратегических решений (для военных, спецслужб, служб МЧС и т.д.);
- системы CAD/CAM/CAE (проектирование «изнутри» виртуальной среды);
- развлекательные системы виртуальной реальности (интерактивное кино, аттракционы);
- высокореалистичные компьютерные игры;
- обучающие и познавательные системы («погружение» в исторические, архитектурные, природные, туристические и прочие «ландшафты»).

Основные отличительные признаки систем СВР [22]:

- 1) пользователь воздействует на модель реальности, при этом обеспечиваются сенсорные впечатления операций, возможных с аналогичными реальными объектами;
- 2) в системе виртуальной реальности применяются методы высококачественной визуализации с достаточно высоким разрешением и быстродействием, чтобы пользователь был «погружен» в поступающую информацию и у него возникали ощущения, похожие на ощущения восприятия реального мира, — *виртуальные впечатления*;
- 3) пользователь должен иметь возможность интерактивно взаимодействовать с виртуальной средой и влиять на нее в режиме реального времени;
- 4) присутствие трехмерной зрительной обратной связи — в СВР пользователь обычно может менять точку наблюдения или поворачивать и перемещать объекты для удобства наблюдения. Также должна присутствовать тактильная, двигательная, силовая и звуковая обратная связь, чтобы, например, пользователь мог почувствовать прикосновение к объекту, услышать соударение объектов и т. п.

Заметим, что на сегодня ни один центр виртуальной реальности не умеет создавать общие ощущения вроде голода, насыщения, жажды и т. п.

Стерео зрение подробно рассматривается в главе 6

Системы виртуальной реальности могут быть предназначены для **коллективного** или для **персонального использования**.

В случае коллективного использования один и тот же виртуальный мир исследует группа пользователей. Например, группа зрителей, сидящих в зале стереокинотеатра, оборудованного цилиндрическим или сферическим экраном, при помощи стереоскопических очков может смотреть трехмерный фильм о подводном мире, осматривать достопримечательности того или иного города, экспонаты картинной галереи и т.д. Обычно в таком зале имеется кресло ведущего («навигатора»), оснащенное джойстиком. Ведущий управляет процессом перемещения и ориентации, а все остальные довольствуются пассивным созерцанием изображений. Возможен также вариант, когда каждый из сидящих в зале имеет джойстик и может управлять на экране одним из персонажей коллективной компьютерной игры.

Более сложная система реализуется, когда навигатор имеет *виртуальный шлем*, оборудованный так называемым *хэд-трекером* (от англ. «head-tracker») — устройством, которое отслеживает повороты головы и показывает ту часть виртуального мира, которая видна под данным углом зрения. При этом каждый зритель тоже имеет виртуальный шлем, но уже пассивный, и видит то же самое, что и навигатор.

И наконец, в наиболее сложном варианте каждый из участников имеет шлем с индивидуальным хэд-трекером и может исследовать свою часть виртуального мира, а имея средства воздействия на этот мир, может видеть еще и те изменения, которые вносят он и его коллеги.

Кроме систем виртуальной реальности выделим также *системы дополненной реальности*. Дополненная реальность (*augmented reality*), или смешанная реальность (*mixed reality*), формируется посредством комбинирования реальной и виртуальной среды. Искусственные данные, сгенерированные компьютерной системой, комбинируются с воспринимаемыми человеком данными из реальной среды для дополнения у пользователя ощуще-

ний восприятия реальности. Например, инженер надевает головной дисплей, который нужен для полупрозрачного наложения компьютерной графики на наблюдаемую реальную сцену строящегося объекта. Когда инженер смотрит вниз, на пол, то видит «сквозь него» синие прямые линии, отмечающие положение водопроводных труб, а когда смотрит на стену, то видит красные линии, обозначающие электрические провода [22].



Мультимедийное резюме

Подведем итоги второй главы, значимые для технологий мультимедиа.

- Все ощущения, испытываемые человеком, можно разделить на *реальные* и *виртуальные*. Одна из основных целей средств виртуальной реальности — так воздействовать на органы чувств человека, чтобы создать у него сенсорные впечатления об искусственной обстановке виртуального мира. При этом для полноты впечатлений необходимо стараться воздействовать на все рецепторы: зрительный, слуховой, обонятельный, вкусовой, вестибулярный, тактильный, температурный, болевой.
- По принципу воздействия на рецепторы все мультимедиа-оборудование делится на *дистанционное* и *контактное*, где обоняние занимает промежуточное положение. Предполагается, что сила воздействия лежит в адекватных пределах — от минимального порога чувствительности до болевого порога для данного органа чувств. Для большинства органов сила воздействия может меняться в очень широких пределах, например 1:10¹⁴. Однако, несмотря на такие широкие пределы, количество интенсивностей раздражения, которые способен одновременно уловить пользователь, невелико. Например, зрение в среднем способно отследить всего лишь от 100 до 150 различных цветов.
- Величина порогового значения зависит от времени действия раздражителя. Если время действия раздражителя увеличивать, то его пороговая ин-

тенсивность будет снижаться. Поэтому при низкой интенсивности раздражения увеличивается время реакции. Для каждого вида ощущений существуют свои пороги чувствительности.

- При разработке динамичных мультимедиа-приложений необходимо обращать внимание на величины порога времени раздражения и общего времени реакции, которые могут существенно различаться в зависимости от сложности предполагаемого действия пользователя.
- При проектировании различных мультимедиа-устройств в ряде случаев можно избежать сильных болевых и шоковых воздействий, изменения скорость нарастания силы и время воздействия. В первую очередь это касается яркости изображения и громкости звука.
- Закон Вебера утверждает, что чем сильнее раздражение, тем больше минимальное приращение раздражения, которое в состоянии уловить человек. Закон Фехнера говорит о том, что интенсивность ощущения пропорциональна логарифму интенсивности раздражения.
- Из рассмотренной классификации мультимедиа-оборудования видно, что промышленное оборудование для органов вкуса, обоняния и интероцепторов практически отсутствует. Это связано не столько с технологическими ограничениями, сколько с необходимостью достижения полной реалистичности имитируемых ощущений, что не всегда может оказаться уместным.
- Главным условием для достижения максимально-го эффекта погружения пользователя в виртуальную реальность является возможность полноценного интерактивного взаимодействия пользователя с окружающей его виртуальной средой.

Контрольные вопросы и задания



1. Приведите примеры рецепторных полей, дистанционно воспринимающих раздражение.
2. Какие неадекватные раздражители могут существовать для органов слуха? Осязания?

3. Вам наступили на ногу. О какой аккомодации может идти речь в этом случае?
4. Какой орган чувств, по вашему мнению, способен улавливать больше интенсивностей раздражения одновременно — глаз или язык?
5. Можно ли привести еще какие-нибудь примеры (кроме указанных в тексте данной книги) использования оборудования для интерорецепторов?
6. Люди, несомненно, способны погружаться в воображаемую среду и без всякого технологического оборудования, а только силой своей фантазии, — например, во время чтения книги. Какие из перечисленных в этой главе четырех признаков систем виртуальной реальности наблюдаются при этом, а какие — нет? Аналогично — при просмотре кинофильмов? Пользовании видеоиграми?
7. Предположим, что хирургическая операция выполняется группой из нескольких хирургов. Можно ли обеспечить возможность, чтобы каждый из них, надев головной дисплей, видел схему операции и анатомические структуры, наложенные на сцену с реальным пациентом? Поясните, как можно было бы это сделать или почему это сделать невозможно.

Глава 3

Общая физиология зрения

- Внутреннее устройство глаза
- Фотопическое и скотопическое зрение
- Зрительные нервные импульсы
- Эффект туннельного зрения
- Поле активного зрения
- Адаптация глаза к средней освещенности
- Резкость и яркостная чувствительность

В этой главе мы начнем подробно рассматривать работу зрительного аппарата как важнейшего источника получения человеком информации о внешнем мире, применительно к технологиям мультимедиа.

Зрительный анализатор — это совокупность структур, воспринимающих световое излучение и формирующих зрительные ощущения. Анализатор состоит из фоторецепторов и связанных с ними нейронов глаза, проводящих путей (зрительный нерв, зрительный тракт и др.) и нервных клеток, расположенных на разных уровнях центральной нервной системы: в сетчатке глаза, среднем и межуточном мозге и в затылочной доле коры больших полушарий.

Зрительный анализатор позволяет различать освещенность предметов, их цвет, форму, размеры, характеристики передвижения, расстояние, на котором они расположены, пространственную ориентацию в окружающем мире.

Электромагнитные волны, воспринимаемые человеческим глазом, заключены в диапазоне (по раз-

Считается, что через зрение в мозг поступает от 80 до 90% всей информации об окружающей среде

ным оценкам) от 380–390 до 670–780 нм. Для возбуждения фоторецепторов достаточно всего 1–2 квантов света.

Впрочем, визуальные ощущения можно вызвать и без воздействия световых волн. Для появления таких ощущений достаточно, например, надавить на глазное яблоко (см. ранее рассмотренное понятие о *неадекватных раздражениях*). Этот пример подтверждает, что световое ощущение — это явление, связанное со свойствами самой зрительной системы [23].

Строение и оптическая система глаза

Рассмотрим структуру человеческого глаза в разрезе (рис. 3.1).

Глазное яблоко — это орган почти сферической формы диаметром около 2–2,5 см, немного выдающийся вперед в районе *роговицы* (жесткой оболочки, закрывающей переднюю поверхность глаза). Роговица не снабжается кровью, что обеспечивает ее хорошие оптические качества. Продолжением роговицы является *склеры* — непрозрачная оболочка, закрывающая остальную часть глазного яблока.

Линия, соединяющая передний и задний полюса глазного яблока, называется его *анатомической осью*. Расстояние между передним и задним полюсами глазного яблока является его наибольшим размером и равно примерно 24 мм.

Глаз окружен тремя оболочками: роговица со склерой образуют внешнюю оболочку, под которой последовательно расположены сосудистая оболочка (*хориоидия*) и нейроглиальная оболочка (*сетчатка*). Внутри полость глаза заполнена прозрачным *стекловидным телом* — опорной тканью глазного яблока.

Хориоидия расположена непосредственно под склерой. В этой оболочке проходит сеть кровеносных сосудов, обеспечивающих питание глаза. Внутренний поверхностный слой хориоидии сильно пигментирован, что снижает интенсивность попадаю-



Рис. 3.1. Структура человеческого глаза в разрезе

щего через роговицу внешнего света, мешающего восприятию из-за его отражения и рассеяния внутри глаза [24]. Поэтому зрачок человека снаружи выглядит черным.

Радужная оболочка («радужка») — это кольцевая мембрана, расположенная спереди хрусталика. Это пигментированная часть глаза, которую можно увидеть снаружи. От цвета пигмента на передней поверхности радужки зависит цвет глаз человека, а пигмент на задней поверхности радужки имеет черный цвет, что также снижает внутреннее рассеяние света.

Зрачок — отверстие в центре радужной оболочки, играющее роль диафрагмы, которая при изменении интенсивности света может сужаться или расширяться, контролируя тем самым количество попадающего через зрачок на роговицу света. Диаметр зрачка (апerture глаза) при низкой освещенности равен 7,5 мм, а при высокой — 1,8 мм. Когда зрачок сужается, четкость изображения на сетчатке увели-

Поскольку зрачок является диафрагмой, зрение более чувствительно к скорости изменения общей яркости фона, чем к ее абсолютному значению

чивается (эффект диафрагмирования) [25]. Оптимальные условия для высокой остроты зрения обеспечиваются при ширине зрачка 3 мм. Зрачок — это необычайно чувствительный орган, легко реагирующий на различные психоэмоциональные состояния (страх, радость и т.п.) или на заболевания.

Хрусталик (хрусталиковая двояковыпуклая линза), состоящий из наружной капсулы и внутрихрусталикового вещества, закреплен внутри глаза с помощью волокон, проходящих между отростками цилиарного тела и вплетающихся в сосудистую оболочку глаза. Капсула и внутрихрусталиковое вещество содержат от 60 до 70% воды, около 6% жиров и больше белков, чем любые другие ткани глаза. Внутрихрусталиковое вещество имеет слабую желтую пигментацию, которая с возрастом усиливается. Ускоренное помутнение вещества хрусталика, связанное с нарушением его питания, приводит к заболеванию, называемому *катарактой*, при котором ухудшается цветовое восприятие и острота зрения. В видимом диапазоне спектра хрусталик поглощает около 8% света и практически не пропускает более коротковолновое излучение. Свет инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов существенно поглощается белком хрусталика и при высокой интенсивности может привести к необратимому нарушению зрения, что необходимо помнить при разработке мультимедиа-оборудования.

Оптическая система глаза состоит из следующих светопреломляющих сред: роговицы, водянистой влаги передней камеры, хрусталика, и стекловидного тела. Роговица совместно с хрусталиком, расположенным внутри глаза, фокусирует перевернутое изображение на светочувствительной поверхности задней стенки глазного яблока (на *глазном дне*).

Визуальная информация, проецируемая в правый глаз, поступает в зрительный центр мозга, который находится в левом полушарии, а из левого попадает в зрительный центр правого полушария. Такая «перекрестная» обработка зрительной информации обеспечивает нам правильное ее отражение в реальном, а не в перевернутом изображении, формирующемся в глазном яблоке.

Преломляющую силу глаза называют *рефракцией* и измеряют в *диоптриях* (1 диоптрия (Д) — это преломляющая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м). Для роговицы рефракция равна в среднем 43 Д, а для хрусталика, в зависимости от расстояния до рассматриваемого объекта, — 19–33 Д. Суммарная преломляющая сила оптической системы глаза изменяется в пределах от 62 до 76 Д.

При имитации погружения под воду необходимо изменить характеристики виртуальной камеры до 100 диоптрий

Изменение преломляющей силы роговицы в зависимости от граничащей с ней среды можно наглядно проиллюстрировать на примере человека, плывущего под водой. Для пловца без маски все предметы теряют свои очертания, кажутся размытыми. Это объясняется тем, что преломляющее действие роговицы становится меньше, когда она граничит не с воздухом, а с водой, показатель преломления которой равен 1,33. В результате оптическая сила глаза в воде уменьшается и изображение объекта фокусируется уже не на сетчатке, а позади нее [26]. Чтобы получить резкое изображение объекта на сетчатке, пловец при погружении в воду может надеть очки с положительными линзами. Учитывая, что разница в показателях преломления стекла и воды невелика, оптическая сила линз при этом должна быть очень большой — примерно 100 диоптрий.

Цилиарные мышцы воздействуют на хрусталик через подвешивающие связки, расслабляя хрусталик при взгляде на дальние объекты и напрягая его при взгляде на близкие [27]. Благодаря эластичности хрусталика обеспечивается фокусирование изображения от объектов, находящихся на разных расстояниях, — так называемая *аккомодация*.

Аккомодация — это механизм, обеспечивающий ясное видение разноудаленных предметов путем изменения кривизны хрусталика и, соответственно, его оптической силы. Нормальный человеческий глаз может аккомодировать на очень большие расстояния. Так называемая *самая удаленная точка ясного видения* лежит для него в бесконечности, а *ближайшая точка ясного видения* — на расстоянии 14 см от глаза [28]. Для ясного видения предметов необходимо, чтобы приходящие от них световые

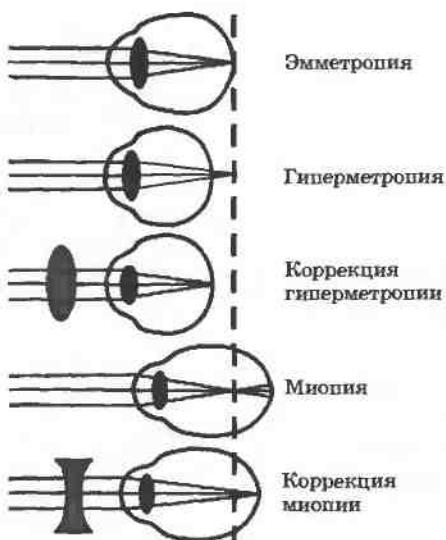


Рис. 3.2. Виды рефракции и линзы для коррекции ее нарушений

лучи фокусировались на сетчатке (**эмметропия**, рис. 3.2; для наглядности глазное яблоко представлено здесь нормальным, сжатым или вытянутым в зависимости от ситуации).

В процессе проектирования таких устройств, как, например, стереоочки или визиры видеокамер, не нужно забывать про возможные нарушения эмметропии.

Миопия (близорукость) — вид нарушения рефракции, при котором световые лучи, отраженные от предмета после прохождения через светопреломляющий аппарат глаза, фокусируются не на сетчатке, а впереди нее. В этом случае у человека нарушено восприятие далеких предметов. Коррекция такого нарушения производится с помощью очков с двояковогнутыми линзами (см. рис. 3.2).

При **гиперметропии (дальнозоркости)** лучи от далеко расположенных предметов из-за слабой преломляющей способности глаза или малой длины глазного яблока фокусируются за сетчаткой.

Чтобы при работе с фото- и видеоаппаратурой пользователь не прибегал к очкам, в окуляры, как правило, встраивают **корректор диоптрий**, устраняющий в небольших пределах отклонения от эмметропии.

Устройство сетчатки. Сумеречное зрение

Зрительное восприятие образов становится возможным благодаря распределению дискретных светочувствительных клеток (рецепторов) по внутренней поверхности сетчатки. *Сетчатка (ретина)* — это светочувствительная поверхность, выстилающая заднюю стенку глаза и имеющая три основных слоя, клетки которых послойно объединяются в *триады*:

- 1) слой, состоящий из *палочек* и *колбочек* — светочувствительных клеток (фоторецепторов), преобразующих световую энергию в нервные сигналы. Светочувствительная область колбочки имеет приблизительно коническую форму, тогда как у палочек она цилиндрическая;
- 2) слой, состоящий из *биполярных клеток*, обеспечивающих контакт с палочками и колбочками;
- 3) слой, включающий так называемые «*ганглии*» — клетки, формирующие оптический нерв, через который зрительные сигналы передаются в область мозга, ответственную за обработку изображения.

При правильной оптической фокусировке глаза — эмметропии свет от наружного объекта проецируется в виде изображения на сетчатку. Сетчатка человеческого глаза имеет 110–125 миллионов цилиндрических палочек и 6–7 миллионов колбочек. Таким образом, на одну колбочку приходится примерно 17 палочек.

Колбочки обеспечивают *фотопическое зрение*, т. е. они активизируются только в условиях достаточно сильного, главным образом дневного, освещения и позволяют различать как яркостную информацию (монохромные или ахроматические оттенки, например, градации серого), так и цвета. Человек различает мелкие детали изображения в основном благодаря колбочкам, поскольку каждая из них соединена с отдельным нервным окончанием (высокое пространственное разрешение).

Область наибольшей концентрации колбочек на сетчатке — центральная зона, известная как

желтое пятно (см. рис. 3.3). В центре желтого пятна имеется так называемая **центральная ямка** — область наибольшей остроты зрения с угловыми размерами 1...3°. Она находится в 3–4 мм к виску и несколько вверх от диска зрительного нерва, поэтому оптическая ось глаза не совпадает с анатомической осью. Наружные мышцы глаза обеспечивают вращение глазного яблока так, чтобы изображение интересующего нас объекта попадало в область желтого пятна.

Поговорка «в темноте все кошки серы» имеет под собой научную основу — систему сумеречного зрения

Палочки работают в основном в условиях слабой освещенности и входят в систему **скотопического зрения**, которая не способна различать цвета и позволяет различать только яркость. Поэтому скотопическое зрение называется бесцветным, или **ахроматическим**. Содержащийся в палочках белок **родопсин**, или зрительный пурпур, имеет максимум поглощения в области 500 нм (сине-зеленый свет). Для ночного зрения характерно низкое пространственное разрешение, но зато — высокая световая чувствительность. Последняя обусловлена тем, что сигналы от большой группы палочек (от 10 до 400) объединяются вместе.

Переходное зрение между ночным (скотопическим) и дневным (фотопическим) называется **сумеречным, или мезопическим, зрением**.

На сетчатке также присутствует **слепое пятно**, в котором из глазного яблока выходит оптический нерв. Оно не имеет фоторецепторов, начинается на расстоянии 12° от центральной ямки и соответствует

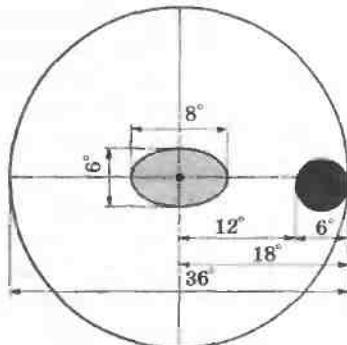


Рис. 3.3. Геометрическая схема глазного дна

Говорят, что Мариотт научил французского короля Людовика XIV любопытному развлечению: так смотреть на неугодивших ему подданных, чтобы видеть их «без головы» (т. е. так, что голова попадала как раз на слепое пятно королевского глаза)

ет углу 6° (на рис. 3.3 серая область соответствует желтому пятну, а черная — слепому) [29].

Фраза «слепое пятно» стала нарицательной, символизирующей важный объект, находящийся в поле зрения наблюдающего, но информация о котором не воспринимается. Слепое пятно впервые открыл в 1668 г. известный французский физик Э. Мариотт. В обычных условиях человек не замечает этого пятна, во-первых, потому, что изображения предметов, приходящиеся на слепое пятно в одном глазу, в другом проецируются не на слепое пятно, а во-вторых, потому, что «выпадающие» части этих предметов непроизвольно (подсознательно) дополняются образами соседних частей, находящихся в поле зрения. Для одноглазого человека считается безопасным водить легковой автомобиль, т. е. в непрофессиональных целях, потому что в область слепого пятна в этом случае попадает не более 15% всей визуальной информации. Однако, например, при проектировании некоторых приборных панелей самолетов специально проверяют, чтобы наиболее критичные приборы не попадали в область слепого пятна при взлете и посадке, поскольку поглощенный работой пилот вынужден контролировать приборы боковым зрением.

Вернемся к устройству сетчатки. Между слоем с колбочками/палочками и слоем биполярных клеток располагается система горизонтальных клеток. Она осуществляет регуляцию передачи сигналов от фоторецепторов к биполярным клеткам, т. е. через систему горизонтальных клеток осуществляется обратная связь [25]. Благодаря ее наличию происходит перекодировка сигналов, вследствие которой распределение освещенности на сетчатке преобразуется в распределение возбуждений биполярных клеток, пропорциональных распределениям локальных и временных контрастов. Другими словами, величина возбуждения (выходной сигнал) оказывается пропорциональной дроби, в числителе которой — разница между локальной освещенностью и средней освещенностью на сетчатке, а в знаменателе — средняя освещенность сетчатки. Результат принимает положительное значение, («on») при включении света (или

при переводе взгляда на светлый участок наблюдаемой сцены) и отрицательное («off») при выключении света (или переводе взгляда на темный участок).

Описанный выше процесс обеспечивает адаптацию зрительной системы к уровню освещенности наблюдаемой сцены или изображения. Благодаря такой адаптации динамический диапазон сигналов, представленных в виде возбуждений биполярных клеток, уменьшается до 2 логарифмических единиц, тогда как общий динамический диапазон освещенностей, в котором способна работать зрительная система, составляет около 9 логарифмических единиц.

При передаче сигналов от биполярных клеток к ганглиозным клеткам происходит также их преобразование из аналоговой формы в импульсную. Эксперименты с крабами, чья зрительная система хорошо поддается изучению, показали, что информация об интенсивности света, попадающего на каждую светочувствительную клетку — рецептор, передается в мозг посредством изменения частоты возбуждения зрительного нерва, т. е. каждому значению интенсивности соответствует своя частота следования нервных импульсов от рецептора.

Далее информация об изображении с каждого глаза в отдельности обрабатывается в промежуточных участках мозга — в *наружном коленчатом теле*, после чего транслируется в зрительные центры коры затылочной доли мозга.

Существует достаточно обоснованная теория [27], которая утверждает, что в наружном коленчатом теле производится обработка сигнала аналогично его разложению в ряд Фурье: в зрительный центр сначала передаются низкие частоты, отвечающие за большие однородные области того, что видит испытуемый, а затем — высокие, содержащие информацию о более мелких деталях и контурах. Например, у посетителя выставки, рассматривающего картину, при первом взгляде на нее появляется только общее видение композиции, а при более пристальном рассмотрении в зрительный центр начинают поступать

Один из эффектов маскировки объектов заключается в нанесении на них большого количества разноцветных маскировочных пятен — высокочастотных шумов, затрудняющих распознавание контуров

высокочастотные информативные импульсы о деталях изображения.

Если низкие частоты сильно зашумлены большим количеством разнообразных высоких частот, то распознавание человеком крупных объектов сильно замедляется, потому что требуется больше времени на передачу данных. На этом принципе основана военная маскировка, при которой «высокочастотная» окраска разноцветными пятнами делает контуры крупной военной техники или каких-либо сооружений неузнаваемыми при быстром осмотре противником.

Такие приемы, основанные на восприятии, взяли на вооружение и специалисты по рекламе. В современной pop-up интернет-рекламе место с активной областью закрытия рекламного окна — крестиком сознательно маскируется разнообразными пространственными и цветовыми приемами. Таким способом пользователя непроизвольно заставляют ознакомиться с «универсальными продающими моментами» рекламного окна, пока он беспорядочно двигает мышкой по экрану в поисках кнопки закрытия.

Поле зрения. Погружение в виртуальный мир

Поле зрения обычно определяется как область окружающего мира, видимая человеком при отсутствии движений глазами и головой. Выделяют *физиологическое поле зрения*, включающее в себя всю теоретически доступную для сетчатки область, и *анатомическое поле зрения*, которое не содержит участки, закрываемые выступающими частями лица. Для создания максимального эффекта виртуального погружения проецируемые на глаза компьютерные изображения должны учитывать именно анатомическое поле, более естественное для восприятия. Такой подход, например, реализован в ряде компьютерных игр «от первого лица», — это так называемый «эффект надетого респиратора».

Вместе с тем, существует также *оперативное поле зрения* — такая часть общего поля зрения, ко-

При визуализации трехмерных сцен со взглядом от первого лица лучше учитывать более естественное для восприятия анатомическое поле зрения

торая практически одномоментно воспринимается и опознается человеком. Его величина зависит от многих условий: от состояния наблюдателя и задачи восприятия, от внимательности, пространственных признаков предмета и т. п.

Для быстрого опознавания объектов, визуализируемых мультимедиа-приложениями, важна как раз зона оперативного поля зрения. При этом различают *бинокулярное* (двумя глазами одновременно) и *моноокулярное* зрение, когда в восприятии участвует только один глаз.

При бинокулярном зрении поле четкого видения человеком в горизонтальной плоскости составляет примерно $30\text{--}40^\circ$ [30]. Вверх оно простирается в среднем на $10\text{--}15^\circ$, вниз — примерно на 20° (рис. 3.4). Здесь «I» — зона четкого бинокулярного зрения, «II» — зона периферического бинокулярного зрения, «III» — зона периферического моноокулярного зрения. Зоны I и II объединяются в *медиальную* часть поля зрения — доступную обоим полушариям мозга. Зона III же называется *латеральной*, информация из нее попадает только в одно (противоположное) полушарие.

Общие границы моноокулярного поля зрения, по разным оценкам, таковы. По горизонтали: к виску — $90\text{--}110^\circ$, к носу — $50\text{--}70^\circ$ (всего $140\text{--}170^\circ$). По вертикали: вверх — $50\text{--}60^\circ$, вниз — $60\text{--}75^\circ$ (всего $110\text{--}135^\circ$).

Поле, одновременно охватываемое двумя глазами, по горизонтали несколько больше 180° , а по вертикали составляет около 120° . При вращении глаз наибольшее отклонение их зрительных осей составляет $\pm 45\text{--}50^\circ$.

Размеры поля зрения зависят от многих факторов, в частности таких, как:

- *аметропия* (при высокой близорукости поле зрения сужается);
- анатомическое строение лица (высокая переносица, глубокое расположение глаз в глазнице);
- физиологические колебания размера зрачка (широкий зрачок способствует расширению поля зрения);

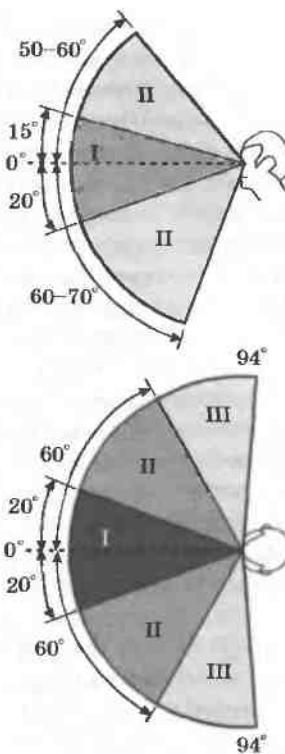


Рис. 3.4. Поле зрения человека

- яркость, контраст, размеры и цвет тестового образца, время его предъявления;
- зрительное утомление (при утомлении поле зрения уменьшается);
- возраст (максимальное поле зрения характерно для людей в возрасте 20–24 лет, а затем с возрастом поле зрения уменьшается).

Судить о состоянии поля зрения только по наружным его границам недостаточно: внутри поля бывают участки с пониженной или отсутствующей световой чувствительностью (*скотомы*), что может отрицательно сказаться на зрительной работе. Анализ дефектов поля зрения используется при диагностике целого ряда заболеваний.

То, что здоровый человек обладает большой зоной восприятия окружающей действительности, имеет свои плюсы и минусы при работе с мультиме-

дийными устройствами отображения информации. Например, для пользователя, работающего за монитором с диагональю 21 дюйм и находящегося в 70 см от него, поле зрения, охватывающее рабочую область данных, составляет $30 \times 20^\circ$. При этом взгляд пользователя также воспринимает многочисленные изображения окружающих посторонних предметов, что отвлекает, а иногда просто раздражает. Компьютерный мир при этом виден как картинка на фоне окружающей обстановки, не создавая иллюзии погружения.

Чтобы преодолеть этот барьер и создать эффект погружения, применяются различные способы. Наиболее простой из них — увеличить размер воспринимаемого глазами изображения, чтобы оно составляло более 60 градусов в горизонтальной плоскости. Например, введение стандарта экранов с отношением сторон 16:9 вместо 4:3 призвано более реалистично вписать габариты изображения в поле зрения человека (рис. 3.5).

Следящие, или прослеживающие, движения — плавные, медленные движения глаз — возникают через 0,15–0,17 с после появления движущегося объекта и начинаются сразу со скоростью, соответствующей скорости движения этого объекта. Ученые обнаружена линейная зависимость между скоростями движения объекта и слежения за ним до скорости 10 градусов в секунду. Глаза следят за объектом плавно с редкими скачками, необходимыми для ликвидации рассогласования из-за несовпадения скорости движения глаза и объекта. Относительно

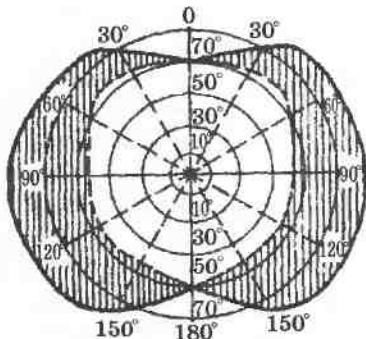


Рис. 3.5. Поле зрения обоих глаз человека

точное длительное непрерывное слежение возможно при скорости, не превышающей 30–40 градусов в секунду; при более высоких скоростях движения объекта скачкообразные смещения глаза вытесняют собой плавные, следящие движения, и фиксация объекта нарушается. Если же вместе с глазами движется и голова, то верхний предел длительного прослеживаемого движения достигает 60 градусов в секунду, при этом рассогласование глаза и объекта достигает 1°. (Подробнее о слежении за движущимися объектами см. в главе 8.)

Другой способ погружения в виртуальный мир состоит в «отсечении» посторонних изображений с помощью специальных устройств, — например, шлемов виртуальной реальности. Общий принцип действия таких устройств заключается в сужении поля зрения человека, принимающего информацию, до величины экрана, что позволяет сконцентрировать внимание на экранном изображении.

Отрицательной стороной использования этих приборов является появление эффекта туннельного зрения, или трубчатого поля зрения, сопровождаемого неизбежным дискомфортом. Название этого эффекта связано с ощущениями водителя, едущего на высокой скорости. Если ехать очень быстро, то начинает казаться, что машина едет в туннеле, потому что взгляд водителя сконцентрирован прямо перед автомобилем на некоторой точке на дороге, отчего скорость кажется еще большей. Точно объяснить этот сложный эффект затруднительно, но, по-видимому, он появляется вследствие очень высоких нагрузок на пропускную способность зрительного тракта, а также в связи с интуитивным отсечением мозгом существенной, жизненно важной в этот момент информации от второстепенной. Существует также и ряд заболеваний, при которых появляется туннельное зрение, — например, глаукома или пигментация сетчатки. Это явление приводит к значительному сужению поля обзора, из-за чего больному становится трудно ориентироваться в пространстве.

Существует изобразительный прием, использующий эффект туннельного зрения, когда изображение затемняется и сматывается по краям и ярко проясняется в центре

Яркостная адаптация и контрастная чувствительность

При разработке динамичных мультимедиа-игр можно повысить скорость прорисовки объектов сцен, предположительно приходящихся в этот момент на периферическое зрение пользователя, за счет понижения количества градаций цветности объектов

При проектировании мультимедиа-приложений важно знать допустимые пределы восприятия освещенности виртуальных сцен и скорости чередования ярких и темных сцен с учетом времени показа (экспонирования) каждой сцены.

Минимальный предел, при котором палочки могут видеть, эквивалентен освещенности в пасмурную безлунную ночь, причем максимальная световая чувствительность достигается после достаточно длительной темновой адаптации. Ее определяют под действием светового потока в телесном угле 50° при длине волны 500 нм (максимум чувствительности палочек). В этих условиях пороговая энергия света эквивалентна всего лишь нескольким квантам.

Самая слабая освещенность, при которой могут видеть колбочки, соответствует освещенности ночью при 50%-й фазе Луны. При сумеречном зрении (меозипической зоне перехода между фотопическим и скотопическим зрением) ни палочки, ни колбочки не дают пиковой эффективности в этом диапазоне, но оба этих типа фоторецепторов активно вносят вклад в визуальное восприятие.

При постоянном и равномерном освещении устанавливается динамическое равновесие между скоростью распада и восстановления зрительных пигментов. При уменьшении потока света это равновесие сдвигается в сторону увеличения запасов зрительных пигментов, и чувствительность фоторецепторов увеличивается. Эта закономерность лежит в основе темновой адаптации — процесса, в течение которого каждый глаз независимо приспосабливается при переходе от высокой светимости к низкой. При дефиците витамина А процессы синтеза зрительного пигмента палочек — родопсина замедляются и возникает нарушение сумеречного зрения — «куриная слепота».

Полностью адаптированный к темноте глаз восстанавливает чувствительность сетчатки до ее максимального уровня. Палочки и колбочки отличаются

При быстрой смене ярких и темных сцен необходимо предусматривать определенное время на адаптацию глаз. Темновая адаптация после яркого света начинается через 5–7 минут и заканчивается в течение 30 минут

Таблица 3.1

**Диапазон яркости, в котором человеческий глаз
может адекватно функционировать**

Время суток	Ночь	Сумерки	День
Зрение	скотопическое (палочковое)	мезоптическое (палочково- колбочковое)	фотоптическое (колбочковое)
Логарифмическая шкала яркостей (по Ламберту, кд/м ²)	-6 -5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5		
Пример яркостного объекта			Значение по шкале яркостей
Палочковый порог темновой адаптации	-6		
Снег при пасмурной погоде	-5		
Снег при свете звезд	-4		
Колбочковый порог темновой адаптации	-3		
Снег при полной Луне	-2		
Снег в темных сумерках	-1		
Белая бумага в 0,3 м от колеблющегося пламени свечи	0		
Белая бумага в 1 м от лампы мощностью 100 Вт	+1		
Белая бумага при нормальном солнечном освещении	+2		
Снег или облака под прямыми солнечными лучами	+3		

по скорости темновой адаптации. Колбочки достигают максимальной чувствительности через 5–7 минут, в то время как палочки требуют от 30 до 45 и более минут абсолютной темноты, чтобы достигнуть максимальной чувствительности после экспонирования ярким светом. Чувствительность сетчатки глаза может быть очень низка, когда только-только наступает темнота, но она увеличивается в 10 раз за 1 минуту. Через 20 минут чувствительность сетчатки увеличивается в 6 000 раз, а через 40 минут — возрастает в 25 000 раз. Начальное быстрое увеличение чувствительности вызвано быстрой адаптацией колбочек, которые имеют более высокую скорость фотохимической регенерации пигментов. Палочки же

приспособливаются медленнее, но в конечном счете достигают намного большей чувствительности, чем колбочки. Вообще же темновая адаптация заканчивается приблизительно на 80 % в течение 30 минут, но могут потребоваться часы или даже дни, чтобы достичь полной темновой адаптации [31].

Другим механизмом световой адаптации является *нервная адаптация*. Когда интенсивность света начинает уменьшаться, интенсивность сигналов, передающихся к сетчатке глаза нейронами, очень низка. Однако интенсивность этих сигналов быстро увеличивается в течение нескольких секунд и может улучшить ночное видение в 30 и более раз. Кроме того, необходимость в этом втором механизме адаптации обусловлена тем, что в практически любой наблюдаемой сцене встречаются как затемненные участки, так и места с высокой освещенностью. При наблюдении таких сцен ось зрения скачками, с интервалом в десятые доли секунды перемещается в пространстве, что приводит к мгновенным изменениям сигнала, иногда довольно большим.

Малоинерционный механизм адаптации уменьшает динамический диапазон сигналов до одной логарифмической единицы. Выполняемое им преобразование сводится к локальному центрированию возбуждающих сигналов относительно среднего значения в пределах поля ясного видения. Иными словами, происходит адаптация к среднему уровню яркости наблюдаемой сцены, а яркость более темных или светлых объектов воспринимается хуже.

В связи с преобладающим присутствием в сетчатке палочек яркостная информация воспринимается человеком более чутко и с более быстрой реакцией на изменение, чем цветовая. Палочки распределены на задней стенке глаза более равномерно, что обусловлено эволюцией: чтобы увидеть движение хищника в сумерках и успеть среагировать на него, необходимо хорошо развитое боковое зрение. Поэтому поля цветового фотопического и яркостного скотопического зрения различаются, что также нужно учитывать при разработке мультимедиа-приложений.

Глаз более чувствителен к изменению яркости вблизи уровня общей яркости фона и менее чувствителен при увеличении этой разницы. Начиная с некоторого момента все области ярче или темнее субъективного диапазона будут казаться белыми или черными

В предыдущей главе отмечалось: Вебером и Фехнером экспериментально показано, что субъективная яркость (т. е. яркость, воспринимаемая зрительной системой человека) является логарифмической функцией от физической яркости света, попадающего в глаз. На рис. 3.6 изображен график такой зависимости субъективной яркости от истинной физической яркости [24]. Длинная сплошная кривая представляет здесь диапазон яркостей, в котором способна адаптироваться зрительная система. При использовании одного только фотопического зрения этот диапазон составляет около 10^6 значений яркости. Постепенный мезопический переход от скотопического зрения к фотопическому происходит в диапазоне приблизительно от 0,003 до 0,3 $\text{кд}/\text{м}^2$ (т. е. от -2,5 до -0,5 по логарифмической шкале), что указывалось ранее в табл. 3.1 и показано ниже в виде двух ветвей кривой адаптации в этом диапазоне яркостей.

Как также уже отмечалось, зрительная система человека способна адаптироваться к огромному (порядка 10^{10} – 10^{14}) диапазону значений яркости — от порога чувствительности скотопического зрения до предела ослепляющего блеска. Для правильной ин-

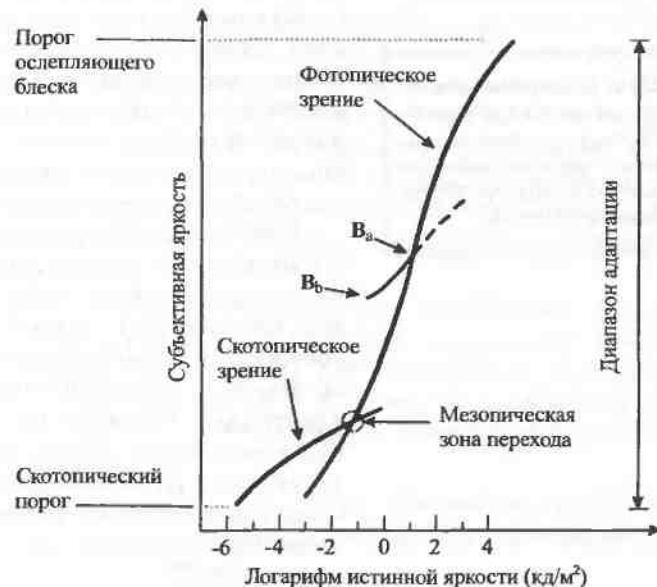


Рис. 3.6. Диапазон субъективно воспринимаемой яркости и конкретный уровень адаптации

терпретации столь впечатляющего динамического диапазона важно понимать, что зрительная система не способна работать во всем этом диапазоне одновременно. Она охватывает такой большой диапазон за счет изменения общей чувствительности. Как говорилось выше, это явление известно как яркостная адаптация зрительной системы к средней освещенности наблюданной сцены. Например, находясь ночью в ярко освещенной комнате, мы практически ничего не видим за окном.

Общий диапазон одновременно различаемых уровней яркости относительно мал по сравнению со всем диапазоном адаптации. Кроме того, контрастная различительная способность глаза так же дискретна, как и его разрешающая способность. Для любого заданного набора внешних условий текущий уровень чувствительности зрительной системы, называемый уровнем яркостной адаптации, соответствует некоторой яркости — например, точке B_a на рис. 3.6. Короткая кривая, пересекающая основной график, представляет собой диапазон субъективной яркости, которую способен воспринимать глаз при адаптации к указанному уровню. Иными словами, при полной адаптации глаза к текущему уровню яркости фона пользователь реагирует на гораздо меньший диапазон значений яркости, распределенный вокруг уровня адаптации к освещенности. Скорость адаптации к яркости неодинакова для различных частей сетчатки, но, тем не менее, очень высока. При этом глаз менее чувствителен к изменению яркостей больших площадей, чем маленьких.

Сам диапазон изменения яркостей достаточно ограничен: все уровни яркости ниже B_b субъективно воспринимаются зрением как «черные», а значит, практически неразличимы. Минимальное (пороговое) значение яркости светового пятна, обнаруживаемое глазом на черном фоне при темновой адаптации, называют абсолютным порогом световой чувствительности. Верхняя же (пунктирная) часть этой кривой реально не ограничена, но теряет смысл при большой длине кривой, поскольку при повышении яркости просто повышается уровень адаптации B_a .

Для снижения утомления зрения рекомендуется устанавливать среднюю яркость изображения примерно равной $30 \text{ кд}/\text{м}^2$.

При всем этом, как уже говорилось в разделе «Устройство сетчатки. Сумеречное зрение», величина сигнала на выходе i -й биполярной клетки оказывается пропорциональной дроби, где в числителе стоит разность между локальной освещенностью (освещенностью i -го рецептора) и средней освещенностью на сетчатке \bar{I} , а в знаменателе — средняя освещенность сетчатки [25]. Например, величина сигнала S_{ki} на выходе биполярной клетки, передающей возбуждение от колбочки, имеющей максимум чувствительности в области красных излучений, будет равна:

$$S_{ki} = C_k \frac{I_i - \bar{I}}{I},$$

где C_k — постоянный коэффициент, согласующий размерности, величина которого определяется спектральной чувствительностью фоторецептора и спектральным составом излучения. Аналогично отыскиваются значения сигналов на выходах биполярных клеток, соединенных с фоторецепторами, имеющими максимумы чувствительности в области зеленых и синих излучений.

Рассмотренная формула представляет собой математическое описание закона преобразования распределения освещенности на сетчатке в распределение возбуждений (сигналов). Эта формула для фотографического зрения отражает две важные особенности преобразования распределения освещенности на сетчатке I_i в распределение сигналов на выходе биполярных клеток S_{ki} , осуществляемых триадой «фоторецептор — горизонтальная клетка — биполярная клетка»:

- увеличение освещенности изображения в n раз не приводит к изменению сигналов S_{ki} , так как при этом числитель и знаменатель в формуле возрастают в одно и то же число раз, что, собственно, и обеспечивает адаптацию (изменение уровня B_o);
- сигналы S_{ki} являются линейными функциями освещенностей I_i , т. е. данное преобразование *квазилинейно*.

Из основных законов колориметрии следует, что восприятие цветов колбочками не меняется при изменении общей яркости сцены для фотографического зрения

Благодаря этому выполняются основные законы колориметрии: в частности, восприятие цветового тона и насыщенности не зависит от яркости, а воспринимаемая яркость источника является взвешенной суммой цветовых компонентов. (Подробнее о законах колориметрии см. в главе 4.)

Практикой установлено, что средняя яркость $30 \text{ кд}/\text{м}^2$ вполне достаточна для наблюдения изображения и рассматривания его деталей без особого утомления зрения [32]. При этом яркость в белых местах изображения может максимально достигать $100\text{--}300 \text{ кд}/\text{м}^2$. Изображение одной и той же сцены будет иметь различную среднюю яркость в зависимости от того, в какое время дня она воспроизводится — в солнечный полдень или в сумерки, но в каждом изображении в большинстве случаев должны быть детали с яркостью, близкой к максимальной. Для смягчения восприятия при смене сцены, если при этом меняется средняя яркость основного передаваемого объекта, то средняя яркость всего изображения также должна пропорционально изменяться.

Отношение Вебера. Зрительный закон Вебера–Фехнера

Прежде чем рассматривать зрительный закон Вебера–Фехнера, необходимо найти способ измерения *субъективного изменения яркости при данном уровне адаптации*. Сложность этой задачи состоит в том, что органы чувств не могут фиксировать уровень ощущения. Они дают возможность установить только тождество или различие двух сопоставляемых ощущений, в частности восприятия яркости [33].

На этом свойстве органов зрения основан метод измерения яркости, называемый *методом пороговых приращений*. Его суть заключается в фиксировании минимально обнаруживаемого приращения ощущения по сравнению с уже возникшим (*порогового приращения*).

Принцип измерений при этом состоит в следующем.

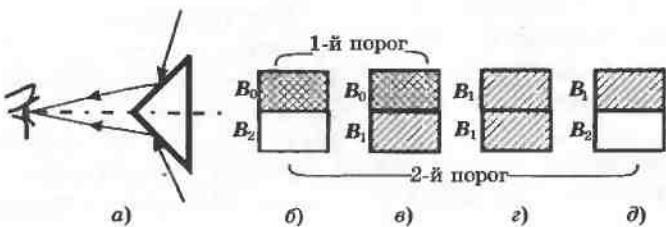


Рис. 3.7. К выводу зрительного закона Вебера–Фехнера

На фотометрическую призму направляются строго одинаковые световые пучки (рис. 3.7а). Тогда яркости обеих половин поля будут равными. Испытуемый не сможет увидеть их разницу и при небольшом различии яркостей половин поля, т.е. при небольших вспышках света на одной половине. И только когда соотношение световых потоков станет больше некоторого значения, испытуемый заметит, что половины поля уже не равносветлы. Наименьшее, едва ощутимое приращение яркости называется *порогом различения*. Он определяется довольно надежно, и это позволяет сделать его мерой яркости.

Рассмотрим сущность метода определения числа порогов. Выберем объект измерения. Установим, например, такое соотношение яркостей, при котором половины поля различаются заметно (рис. 3.7б), и определим количество порогов между ними.

Уменьшим поток, направляемый на нижнюю грань призмы, так, чтобы половины поля едва различались по яркости (рис. 3.7в). Это действие отменяет от верхней половины один порог.

Увеличим теперь поток, направляемый на верхнюю грань призмы, чтобы уравнять светлоту верхней и нижней половин (рис. 3.7г).

После этого вновь увеличим поток, падающий на нижнюю грань, поставив целью снова получить едва заметное различие, но теперь уже при больших яркостях, чем раньше (рис. 3.7д). Таким способом будет отмерен второй порог различия от только что достигнутого уровня.

Предположим, что теперь нижняя грань призмы стала такой же, как на рис. 3.7б. В этом случае яркости половин поля, показанного на этом рисунке, различаются на два порога.

Рассмотренный метод имеет две особенности. Во-первых, порог — это не физическая величина, а мера, основанная на человеческой способности ощущать изменения яркости, — *мера ощущения*. Величины такого рода называются психологическими. Во-вторых, нельзя найти абсолютное значение яркости. Ее можно отмерить только от некоторого уровня, т. е. указать лишь приращение этой величины.

Найдем теперь объективные яркости, при которых половины поля различаются на один порог, на два и т. д. Зная их, можно психологическую величину — субъективную яркость выразить через психофизическую — объективную яркость.

Измерив яркости половин поля в случае, когда они различаются на один порог (например, как на рис. 3.7б), обозначим наименьшую разность яркостей, обеспечивающую различие полей, как $\Delta B = B_1 - B_0$. Величина порога различия, выраженная через разность яркостей, называется *разностным порогом*. Если бы он был постоянным, т. е. если данная разность яркостей всегда обеспечивала бы минимальное различие, то громоздкое, плохо воспроизводимое измерение субъективных яркостей можно было бы заменить простым определением объективных яркостей и по их изменению судить о приросте субъективной яркости. Однако эксперименты показали, что порогу различия соответствуют различные разностные пороги ΔB , значение которых зависит от первоначально взятой яркости B и увеличивается с ее возрастанием. Например, участок с яркостью $B_0 = 1 \text{ кд} \cdot \text{м}^2$ можно отличить от смежного с ним участка, имеющего яркость не менее $B_1 = 1,01 \text{ кд} \cdot \text{м}^2$. Следовательно, в этих условиях $\Delta B = 0,01$. При возрастании же исходной яркости до $100 \text{ кд} \cdot \text{м}^2$ разностный порог увеличивается до $\Delta B = 1$.

Величина $\Delta B_c / B$, где ΔB_c — величина приращения яркости, различимая в 50% случаев на фоне яркости B , называется *отношением Вебера*. Малое значение $\Delta B_c / B$ означает, что различаются очень малые относительные изменения яркости, т. е. име-

ет место «высокая» контрастная чувствительность. И наоборот, большое значение $\Delta B_c / B$ означает, что требуется большое относительное изменение яркости, чтобы его заметить; это говорит о «низкой» контрастной чувствительности.

Эмпирический закон Бугера–Вебера показывает, что разностный порог пропорционален исходной яркости:

$$\Delta B = kB_0.$$

Здесь коэффициент пропорциональности k указывает соотношение объективных яркостей участков, при котором их субъективные яркости едва различаются:

$$k = \frac{\Delta B}{B_0} = \frac{B_1 - B_0}{B_0}.$$

Этот коэффициент называется *дифференциальным порогом, или пороговым контрастом*.

Таким образом, пороговый контраст выражает величину порога различия через отношение разностного порога к исходной яркости. Бугер полагал, что пороговый контраст — величина постоянная. Но позднее было обнаружено, что и эта характеристика неизменна лишь в некотором интервале объективных яркостей, — хотя в этом интервале дифференциальный порог может служить мерой субъективной яркости: приращение яркости в соответствии с его величиной обеспечивает минимальную различаемость сравниваемых участков.

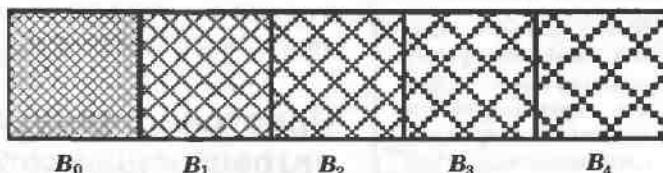


Рис. 3.8. Определение количества порогов различия по яркости

Представим себе шкалу, светлота участков которой возрастает на каждом шаге на один порог (рис. 3.8). Определим, в каком соотношении должны находиться ее световые характеристики, чтобы указанное условие было обеспечено.

Обозначим начальное поле такой шкалы нулевым индексом в знак того, что это начало отсчета субъективно воспринимаемых яркостей. Из последней формулы получаем для яркости первого, соседнего с нулевым, поля:

$$B_1 = B_0 (1 + k).$$

Аналогично — для второго поля и следующих за ним:

$$B_2 = B_1 (1 + k).$$

Найдем соотношение яркостей нулевого и второго полей. Подставим во второе уравнение выражение для B_1 , взятое из первого:

$$B_2 = B_0 (1 + k)^2.$$

Отсюда понятно, что в общем случае, когда разница субъективных яркостей между начальным и заданным полями составляет n порогов различения, яркости этих полей связаны соотношением:

$$B_n = B_0 (1 + k)^n.$$

После ее логарифмирования и преобразования находим количество порогов различения в зависимости от яркостей:

$$n = \frac{1}{\lg(1+k)} \lg \frac{B_n}{B_0}.$$

Эта формула есть математическое выражение закона Вебера–Фехнера, связывающего субъективные и объективные яркости. Согласно ему, приращение уровня зрительного опущения, определяемое количеством порогов различения, пропорционально приращению логарифмов яркости.

Пространственная и яркостная разрешающие способности

Обычно пространственную разрешающую способность зрительной системы определяют в терминах остроты зрения.

Острота зрения — чувствительность зрительного анализатора, отражающая способность различать

Выбор угловой минуты в качестве интернациональной единицы измерения остроты зрения связан с исследованиями Гука, который установил, что минута является наименьшим углом зрения, под которым глаз может различать две точки

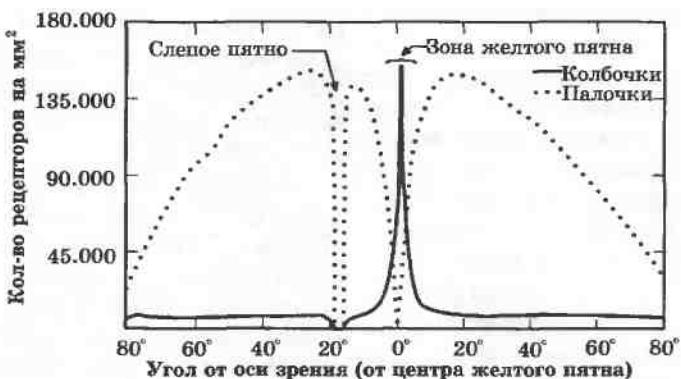


Рис. 3.9. Зависимость остроты зрения от места раздражения на сетчатке

границы и детали видимых объектов. Она определяется как отношение расстояния, с которого наблюдатель различает какую-либо деталь объекта, к расстоянию, с которого эта деталь видна под углом в одну угловую минуту.

На рис. 3.9 показана зависимость остроты зрения от положения различаемой детали на сетчатке. Из этого рисунка видно, что только очень небольшая часть сетчатки характеризуется высокой острой зрения (высоким разрешением), в то время как острота зрения остальных участков в десятки раз ниже. Измерения показывают, что лишь не более 20 угловых минут зрительного пространства глаза приходятся на область сетчатки с высоким разрешением (область фoveолы — область ясного зрения), тогда как все остальное изображение попадает на область сетчатки с малым разрешением [25].

Из этого следует, что при наблюдении сцен мы не способны видеть их одновременно целиком и вынуждены рассматривать по частям, формируя их об-

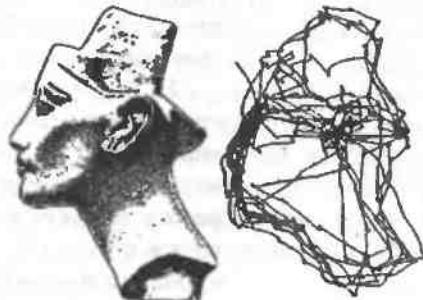


Рис. 3.10. Запись движений глаза при рассматривании скульптурного изображения головы Нефертити

раз в зрительной памяти. Это подтверждают исследования советского психофизика А.Л. Ярбуса, в которых испытуемым предлагали для наблюдения те или иные изображения и записывали движения их глаз (рис. 3.10).

Процесс такого рассматривания объекта сопровождается непроизвольными движениями глазного яблока — *тремором*, когда ось зрения совершают скачкообразные движения — *саккады*. Длительность скачка независимо от угла, на который перемещается ось зрения, составляет 50–60 мс, причем во время скачка происходит подавление зрительного восприятия. Скорость движения глаз довольно быстро нарастает от нуля до максимума, далее сохраняется равномерной, а затем довольно быстро падает до нуля. При углах поворота более 15–20° движение глаз складывается из 2–3 скачков.

С увеличением амплитуды движения скорость произвольных и непроизвольных скачков глаз возрастает. При этом скорость движения глаз не может быть изменена произвольно: для одного и того же испытуемого она остается относительно постоянной при повороте на один и тот же угол; она зависит только от угла, на который должен повернуться глаз. При скачке на 5° максимальная скорость движения глаза равна 200 градусам в секунду, а при скачке на 20° — 450 градусам в секунду. Благодаря более высокой скорости при скачке на больший угол глазодвигательная система переводит взор в любое место поля зрения за относительно постоянное время (примерно 0,05–0,06 с). Чтобы возник новый скачок, новое изображение объекта должно находится на угловом расстоянии не менее $48' \pm 6'$ от прежней точки фиксации: это значение характеризует зону *нечувствительности*.

В результате проведенных исследований было также показано, что в зависимости от решаемой зрительной задачи расположение точек фиксации взгляда на изображении может варьироваться в широких пределах, но неизменным остается одно — точки фиксации всегда располагаются вблизи контуров изображений, обеспечивая тем самым высо-

кое разрешение их наиболее информативных частей.

Упрощая вопросы измерения разрешающей способности глаза, можно сказать, что минимальный угловой размер, который человек может увидеть, составляет от 0,5 до одной угловой минуты. Причем использование угловых величин в качестве единицы измерения остроты зрения позволяет отказаться от двух показателей: удаленности предмета от глаз и размеров его проекции на сетчатке глаза.

Таким образом, зная остроту зрения человека (примем ее равной одной угловой минуте) и учитывая поле зрения человека, приведенное выше, можно определить *максимальное общее разрешение взгляда* в угловых минутах [30]:

- при бинокулярном зрении — $(180^\circ \times 135^\circ) \cdot 60'/1' = 10800' \times 8100'$;
- при монокулярном зрении — $(140^\circ \times 135^\circ) \cdot 60'/1' = 8400' \times 8100'$.

Однако, как уже говорилось, нам важен вопрос именно об оперативном поле зрения, когда основная зрительная информация поступает в *область ясного зрения*. В телевидении принято несколько сужать эту область (см. рис. 3.9), принимая размеры поля ясного зрения равными 12° по вертикали и 16° по горизонтали.

Если считать разрешение глаза равным $1'$, то количество регистрирующих информацию элементарных участков в поле ясного зрения в итоге будет равно:

$$(16^\circ \times 12^\circ) \cdot 60'/1' = 960' \times 720'.$$

От экрана со сторонами 4:3 лучше располагаться на расстоянии, равном высоте экрана, умноженной на 5

Поэтому в телевизионных стандартах PAL и SECAM, чтобы изображение полностью попадало в угол ясного зрения, рекомендуется находиться от экрана на оптимальном расстоянии просматривания $l_{\text{опт}} = 5h$, где h — высота кадра с отношением сторон 4:3. При меньшем расстоянии изображение не полностью проецируется в зону сетчатки с максимальной разрешающей способностью, а при большем — в эту зону попадают и посторонние объекты, окружающие экран.

Следует также заметить, что поскольку глазная сетчатка имеет очень большое количество рецепторов (их значительно больше, чем нейронов), то информация до мозга по одному нейрону передается сразу от группы соседних рецепторов. Эта особенность существенно осложняет человеку возможность отличить скопление очень мелких предметов от единого целого.

Яркостным (или полутоновым) разрешением, по аналогии, называется мельчайшее различимое изменение яркости. И, как уже отмечалось в предыдущем разделе, процесс измерения различных уровней яркости является весьма субъективным.

Следует отметить, что информация о контурах предметов и цвето-яркостная информация воспринимается разными полушариями мозга. При этом информация о деформации контуров улавливается с гораздо меньшей скоростью, чем информация об изменении цвета или яркости. Особенностью восприятия контуров является низкая чувствительность к незначительным искажениям контурных линий без изменений направлений изгиба.

Знание таких фактов необходимо, чтобы иметь возможность оценивать степень проявления искажений на изображениях, что широко используется в методах компрессии видеопоследовательностей с частичной потерей качества.

Мультимедийное резюме



- Зрительный аппарат человека является важнейшим источником получения информации о внешнем мире (до 70–80%).
- Подробно рассмотренное строение глаза позволяет понять принципы работы зрительного аппарата как оптической системы с апертурой от 1,8 до 7,5 мм.
- Светло-желтый пигмент хрусталика практически не пропускает свет инфракрасного и ультрафиолетового диапазона.
- Расстояния, на которые способен видеть человеческий глаз, варьируются от бесконечности до

так называемой *ближайшей точки ясного видения*, расстояние до которой равно 14 см.

- Суммарная преломляющая сила оптической системы глаза изменяется в пределах 62–76 диоптрий. При создании иллюзии погружения под воду при взгляде от первого лица разработчикам видеосцен необходимо предусматривать дополнительное искажение примерно на 100 диоптрий.
- Поскольку зрачок является диафрагмой, зрение более чувствительно к скорости изменения общей яркости фона, чем к ее абсолютному значению.
- Различают *фотопическое* — цветное дневное зрение и *скотопическое* — яркостное ночное зрение. В последнем случае максимальная чувствительность приходится на диапазон 500 нм (сине-зеленый свет). Ночное зрение имеет низкое пространственное разрешение, но зато характеризуется высокой световой чувствительностью.
- Зрительная система обеспечивает адаптацию к уровню освещенности и сокращает динамический диапазон возможных возбуждений. Скорость адаптации к яркости неодинакова для различных частей сетчатки, но, тем не менее, очень высока. При этом глаз менее чувствителен к изменению яркостей больших площадей, чем маленьких.
- Считается, что информация в зрительный центр передается аналогично разложению сигнала в ряд Фурье: сначала поступают низкие частоты с общей информацией об изображении, а потом — высокие, содержащие данные о мелких наблюдаемых деталях. Это приводит к тому, что человек хуже воспринимает мелкие детали, чем крупные области или объекты, особенно на быстро движущихся изображениях.
- При визуализации трехмерных сцен со взглядом от первого лица лучше учитывать не физиологическое поле зрения, а более естественное для восприятия анатомическое поле. Такой подход иногда называют «эффектом надетого респиратора».

- В процессе создания стереоизображений нужно учитывать, что зона четкого бинокулярного зрения составляет всего лишь 30–40° по горизонтали и 30–35° по вертикали (при общем поле зрения в 140–170° по горизонтали и 110–135° по вертикали).
- Способ погружения в виртуальный мир, состоящий в «отсечении» посторонних изображений с помощью специальных устройств, приводит к негативному эффекту «туннельного зрения». Существует специальный изобразительный прием, имитирующий взгляд от первого лица, — например, водителя быстро едущей автомашины, когда изображение затемняется и смазывается по краям и ярко проясняется в центре.
- Процесс перехода от ярких сцен к темным называется *темновой адаптацией*. Она начинается через 5–7 минут и заканчивается на 80% в течение 30 минут, поэтому при монтаже видеороликов необходимо следить за средним уровнем яркости чередования ярких и темных сцен. Для смягчения восприятия (например, при смене сцены), если при этом меняется средняя яркость основного передаваемого объекта, то средняя яркость всего изображения также должна пропорционально изменяться.
- В практически любой наблюдаемой сцене встречаются как затемненные участки, так и места с высокой освещенностью. При наблюдении реальных сцен ось зрения скачками перемещается в пространстве, что приводит к мгновенным изменениям сигнала, иногда довольно большим. Здесь на помощь приходит механизм *нервной адаптации*, существенно уменьшающий динамический диапазон сигналов.
- Глаз более чувствителен к изменению яркости вблизи уровня общей яркости фона и менее чувствителен при большем их различии. Поэтому, начиная с некоторого момента все области ярче или темнее субъективного диапазона кажутся белыми или черными.

- Яркостная информация воспринимается человеком более чутко и с более быстрой реакцией на изменение, чем цветовая. Поле цветового фотографического зрения в основном сконцентрировано в районе центральной ямки. Яркостное скотопищеское зрение представлено более равномерно: боковым зрением хорошо различаются именно яркости. Это также нужно учитывать при разработке мультимедиа-приложений.
- Отдельная проблема — определение минимального приращения яркости, которое может заметить пользователь (так называемый *порог различения*). Метод пороговых приращений приводит к *отношению Вебера*, которое показывает, что порог различения зависит от первоначально взятой яркости и увеличивается с ее возрастанием.
- Закон Вебера–Фехнера связывает субъективные и объективные яркости. Согласно ему, увеличение порога различения пропорционально приращению логарифма яркости.
- Наилучшая острота зрения (равно как и наилучшее восприятие цветов) обеспечивается в районе центральной ямки, на которую приходится не более 20 угловых минут. Из этого следует, что при наблюдении сцен пользователь не способен различить мелкие детали одновременно на всем изображении, а вынужден рассматривать его по частям. При этом главные точки фиксации взгляда всегда располагаются вблизи контуров объектов.
- Информация о деформации контуров улавливается с гораздо меньшей скоростью, чем информация об изменении цвета или яркости. Особенностью восприятия контуров является низкая чувствительность к незначительным искажениям контурных линий без изменений направлений изгиба.



Контрольные вопросы и задания

1. Почему человеческий глаз не видит в ультрафиолетовом диапазоне?
2. Какая часть человеческого глаза больше всего преломляет световые лучи?

3. В нормальном состоянии глаз человека установлен на бесконечность, т. е. фокус всей системы расположен на сетчатке. При более близком расположении предметов изображение должно было бы оказываться сзади сетчатки и становиться нечетким. Почему же мы отчетливо видим и близкие предметы?
4. Когда хрусталик глаза становится более выпуклым: когда глаз рассматривает более близкий предмет или более далекий?
5. Два наблюдателя — близорукий и дальтоник — рассматривают предмет через лупу, располагая ее на одинаковом расстоянии от глаза. Какой из наблюдателей должен расположить предмет ближе к лупе?
6. Почему с наступлением темноты очертания предметов перестают быть резкими?
7. Почему глазам больно, когда ночью внезапно включают свет?
8. Почему изменения яркости замечаются быстрее, чем изменения цветности?
9. В чем заключается суть метода пороговых приращений? Какое отношение можно вывести на его основе?
10. Почему глаз человека вынужден совершать саккадические движения?

Глава 4

Восприятие цвета

- Видимый спектр
- Ощущение цветов
- Законы колориметрии
- Трихроматы и дальтоники
- Восприятие сумеречных цветов
- Виды aberrации
- Психологические аспекты
- Цветовой баланс белого
- Синестезия

Цветовое зрение — это способность зрительного анализатора воспринимать световые волны различной длины. Световые излучения, которые воспринимает зрительный аппарат человека, лежат в диапазоне длин волн от 380 до 780 нм. Этот диапазон излучения принято считать *видимым спектром*.

Видимый спектр (спектральная чувствительность человеческого глаза) лежит в очень небольших пределах возможного диапазона электромагнитных волн, упрощенно представленного на рис. 4.1.

Исаак Ньютона открыл, что солнечный свет, проходя через призму, разлагается в систему цветовых полос (*спектр*). Человеческое зрение способно достаточно четко различать в видимом спектре семь различных цветов:

- красный — 640–730 нм;
- оранжевый — 590–640 нм;
- желтый — 560–590 нм;



Рис. 4.1. Цвета видимой части спектра электромагнитных излучений

- зеленый — 490–560 нм;
- голубой — 450–490 нм;
- синий — 410–450 нм;
- фиолетовый — 380–410 нм.

Человек может достаточно четко различать эти цвета видимого спектра потому, что они соответствуют различным участкам диапазона длин волн. Объекты же воспринимаются как цветные потому, что они тоже отражают световые волны в определенных диапазонах. Ощущение цвета возникает при раздражении сетчатки световым потоком с резко выраженной неравномерностью спектра. Например, нарцисс выглядит желтым потому, что он отражает световые волны в диапазоне около 570 нм [34].

Равные по интенсивности, но различные по спектральному составу световые раздражения вызывают различное яркостное восприятие. Относительное визуальное восприятие яркости в зависимости от длины волны (рис. 4.2) характеризует относительную спектральную чувствительность глаза и называется *кривой относительной видности*. Максимум чувствительности по яркости лежит в области 555 нм (желто-зеленая область). Как в сторо-

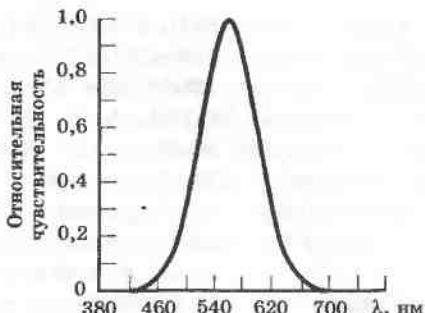


Рис. 4.2. Относительное визуальное восприятие яркости в зависимости от длины волны

ну коротких волн (сине-фиолетовая область), так и в сторону длинных волн (красная область) яркостная чувствительность зрительной системы падает [32].

При наблюдении окружающего мира глаз видит предметы, различающиеся не только по яркости, но и по цвету (окраске). Кривая относительной видности позволяет сравнивать предметы как по цвету, так и по относительной (т.е. субъективной) яркости — *светлоте*. Например, из этого графика видно, что два равноизлучающих поля (желтое и синее) воспринимаются как поля с разной светлотой.

Свойством постоянства цветов мы назовем ситуацию, когда при разном освещении два цвета считаются одинаковыми, если они вызывают одинаковую реакцию рецепторов независимо от длины волны.

Свойство постоянства цветов необходимо для определения цвета поверхности в ситуации цветового контраста, когда, например, поверхность, выглядящая розоватой на белом фоне, выглядит как голубоватая на розовом фоне. Исходя из данного свойства, можно определить:

- каким будет цвет поверхности при освещении белым светом (что обычно и называют цветом этой поверхности);
- каким будет цвет при освещении цветным светом. Таким освещением часто пользуются художники и осветители сцен.

Ощущение белого цвета соответствует раздражению сетчатки зрительной системы световым пото-

Люди способны устойчиво определять цвет участков поверхности даже при изменении условий освещенности, в том числе при освещении светом, содержащим только два основных цвета

ком, имеющим равномерный спектр в видимом диапазоне 380–780 нм. При одинаковом воздействии на рецепторы цвет может восприниматься как белый, серый или, если общее возбуждение достаточно мало, — как черный. Такие цвета называются *ахроматическими*.

Ощущение цвета, отличающегося от белого, возникает лишь в том случае, если излучение содержит не все длины волн указанного диапазона либо является существенно неравномерным. Цвета, имеющие неравномерный спектр, называются *хроматическими*.

Дополнение любого цвета белым не меняет его цветового тона, а лишь «разбавляет» его — создает впечатление блеклой окраски (пастельного цвета).

Физиологически (субъективно) световой поток характеризуется *светлотой* — определенным количеством цветового излучения, эквивалентным излучению некоторого поля серой шкалы, и *цветностью* — качественным отличием данного цвета от других.

Цветность светового потока, в свою очередь, определяется *цветовым тоном* и *насыщенностью*.

Цветовым тоном называют характерное свойство потока, отличающее его от белого и серого. Это свойство, которое мы подразумеваем, называя цвет предмета — красный, оранжевый и т. д. Цветовой тон определяется теми рецепторами, которые получили наибольшее раздражение.

Насыщенность — это степень отличия ощущения цветности данного излучения от ощущения цветности белого. Насыщенность связана с перевесом в раздражении рецепторов одного или двух типов над раздражением оставшихся. Чем больше этот перевес, тем больше насыщенность.

Перечисленные выше параметры — светлота, цветовой тон и насыщенность — являются субъективными, так как не могут быть объективно измерены. Однако им соответствуют физические параметры излучения: яркость, доминирующая (преобладающая) длина волны и чистота цвета. Наибольшей чистотой цвета обладают чистые спектральные цвета, наименьшей — ахроматические цвета, не имеющие цветового тона.

Психологическим величинам — светлоте, цветовому тону и насыщенности — соответствуют физические параметры: яркость, длина волны и чистота цвета

Субъективные и физические параметры связаны между собой. Так, яркость определяет светлоту, доминирующая длина волны — цветовой тон, а чистота цвета — насыщенность. В силу этого цвет является *трехмерной величиной*. Между объективными и субъективными параметрами существует качественное соответствие, но прямо приравнивать одни к другим нельзя в силу различной природы их происхождения [32].

Количество различных глазом цветов очень велико и зависит от многих факторов, таких как условия наблюдения, тренированность наблюдателя и др. Наш глаз в целом способен различать, по разным оценкам, от 7 до 10 млн различных цветов, отличающихся один от другого по трем параметрам — светлоте, цветовому тону и насыщенности. Однако количество цветов, различаемых одновременно, гораздо ниже: от 100 до нескольких тысяч.

Возникновение цветового ощущения. Законы Грассмана

Учение об измерении цвета называется *метрологией цвета*, или *колориметрией*. В основе изучения цветового зрения лежит *трехкомпонентная теория цветового восприятия*, высказанная русским ученым М.В. Ломоносовым еще в 1756 г. и наиболее полно разработанная спустя более полутора столетий Г. Гельмгольцем. Трехкомпонентная теория подразумевает существование в нашем органе зрения трех видов колбочек, содержащих три различных типа светочувствительных химических реагентов, различающихся спектральной чувствительностью. Они селективно (выборочно) реагируют на красный (*R*), зеленый (*G*) и синий (*B*) цвета (рис. 4.3). Обозначения *R*, *G* и *B* являются общепринятыми и даны по начальным буквам слов «красный», «зеленый», «синий» (по-английски — *red, green, blue*; по-немецки — *rot, grün, blau*).

Процесс восприятия произвольного цвета можно представить в виде наложения трех отдельных фотокимических процессов: процесса ощущения крас-

ного цвета в низкочастотной (длинноволновой) области, зеленого цвета — в среднечастотной области и синего цвета — в высокочастотной области. Максимумы соответствующих кривых (рис. 4.3), по данным Дж. Уолда, приходятся на 430, 540 и 575 нм. Обращает на себя внимание широкополосность и сильное взаимное перекрытие кривых спектральной чувствительности — особенно для колбочек, имеющих максимумы спектральной чувствительности в области красных и зеленых излучений [25]. Количество таких колбочек, чувствительных к красному и зеленому свету, намного превышает количество синих рецепторов.

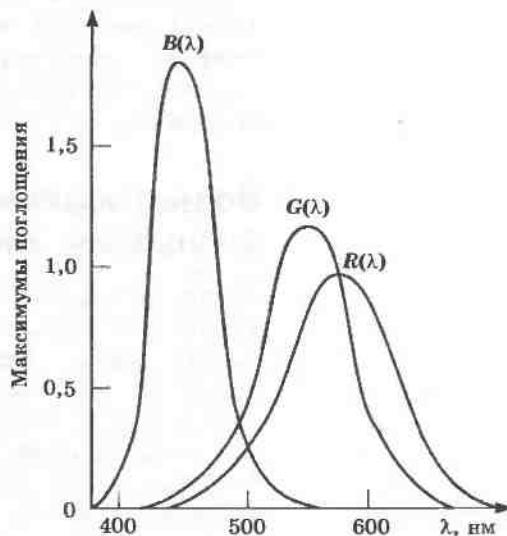


Рис. 4.3. Цветовая чувствительность трех типов колбочек

В 1931 г. на VIII сессии МКО было принято решение выбрать в качестве основных цветов (основных стимулов) три монохроматических излучения с длинами волн $\lambda_R = 700$ нм (ало-красный), $\lambda_G = 546,1$ нм (желтовато-зеленый) и $\lambda_B = 435,8$ нм (синевато-фиолетовый). Выбранные цвета удобны еще тем, что два из них (B и R) близки к краям видимого спектра, а третий (G) близок к его середине.

Когда на сетчатку падает свет с определенной длиной волны, начинается работа частотно-селективного механизма, и реакция, соответственно,

тоже будет селективной. При сильном длинноволновом (низкочастотном) воздействии и слабых среднечастотных и высокочастотных воздействиях человек видит красный объект. Объект синего цвета стимулирует коротковолновый (высокочастотный) процесс и т. д. Если же человек видит объект промежуточного цвета, например желтого, то это означает одновременное действие двух процессов, вызванное наложением двух частотно-селективных механизмов. В этом случае желтый цвет возбуждает одновременно как длинноволновой «красный» процесс, так и средневолновой «зеленый».

Цветовая мультимедиа-иллюзия (соответствующий технический термин — метамерия) заключается в обратном воздействии: можно заставить пользователя увидеть на экране дисплея желтый цвет, если одновременно включить два прожектора электронно-лучевой трубы — красный и зеленый, т. е. возбудить светочувствительные элементы глаза также, как это бы сделал настоящий желтый цвет.

Метамерия — вызывание ощущения какого-либо цвета воздействием трех основных цветов

Медицинское название дихроматизма и монохроматизма — болезнь « дальтонизм».

Джон Дальтон (Dalton) (1766–1844) — английский химик и физик, создатель химического атомизма. Он ввел понятие «атомный вес», первым определил атомные массы ряда элементов, открыл газовые законы, названные его именем. Именно Джон Дальтон первым (в 1794 г.) описал дефект зрения, которым страдал сам, позже названный дальтонизмом.

Поскольку в зрительном механизме человека работают три отдельных процесса цветового зрения, то человек относится к *трихроматам*. У людей, страдающих недостатками цветного зрения (например, дальтоников), обычно отсутствует один из трех указанных выше процессов, присущих нормальному человеку. Таких людей называют *дихроматами*, у них — нетипичный цветовой отклик. Существует также и небольшое количество *монохроматов*. Но ни разу не удавалось обнаружить ни у людей, ни у животных систему цветового зрения, основанную более чем на трех цветах [23]. Ахромазия же — это полная цветовая слепота, возникающая вследствие поражения колбочкового аппарата сетчатки. При этом все предметы видятся человеком лишь в разных оттенках серого цвета (табл. 4.1).

Примерно 8 процентов людей страдают одной из разновидностей цветовой слепоты [22]. Поэтому при проектировании мультимедиа-интерфейсов следует аккуратно выбирать комбинации цветов. Здесь автору вспоминается один реальный случай, когда в

Таблица 4.1

Основные разновидности аномалий цветового восприятия

Разновидность	Признаки
Протанопия — «краснослепые»	Не отличают красных цветов от зеленых
Дейтеранопия — «зеленослепые»	Не отличают зеленых цветов от темно-красных и голубых
Тританопия — «фиолетовослепые»	Не отличают лучи синего и фиолетового цвета от зеленого и желтого
Ахромазия	Полная цветовая слепота: все предметы видны лишь в разных оттенках серого

нашей команде разработчиков в 1991 г. ответственным за интерфейс был дальтоник. Смотреть без слез на его цветовые решения было невозможно... ☺

В большинстве случаев естественный однородно окрашенный свет оказывается не вполне спектрально чистым, т. е. он содержит разные длины волн видимой области спектра. Таким образом, для создания натуралистических мультимедиа-сцен к чистым цветам *RGB* необходимо примешивать «грязь», добавляя немного красного, зеленого и синего даже для наиболее отчетливо окрашенных источников света. Например, если исследовать значения *RGB* в оцифрованной фотографии, то, скорее всего, обнаружится большой разброс значений красного, зеленого, синего и совсем немного пикселей любого из чистых цветов *RGB* [11].

Восприятие некоторых пар цветов так влияет друг на друга, что их смесь не воспринимается. Например, мы ясно воспринимаем смесь красного и желтого (оранжевый с преобладанием красного) или синего с зеленым (голубой с преобладанием синего), но смесь красного с зеленым воспринимается как чисто желтый без каких-либо следов исходных цветов. Аналогично, смесь желтого и синего вызывает ощущение чистого белого цвета.

В целом люди обладают субъективным цветовым восприятием. Например, для окраски стен помещений обычно выбираются ненасыщенные пастельные

Почему запрещающий сигнал светофора — красный? Он стимулирует внимание, тогда как, например, голубой и зеленый успокаивают

цвета. Красный цвет стимулирует внимание, а голубой и зеленый цвет на многих людей действует успокаивающее. Поэтому в технических приложениях смысл цветовых обозначений достаточно жестко определяет применение каждого цвета:

- красный — опасность, запрет;
- желтый — осторожно, внимание;
- зеленый — безопасность, экологичность.

Причины выбора сигнальных цветов связаны с цветовым и яркостным контрастом. Так, желтый участок спектра имеет максимальную светлоту, поэтому чередование желтых полос с черными обеспечивает восприятие на наибольшем расстоянии. Дополняя такую «осиную» предупреждающую раскраску нанесением косых полос, обеспечивают улучшение распознавания опасных технических объектов — балок, кранов, столбов (обеспечивается их визуальное отделение от вертикальных и горизонтальных природных объектов, преимущественно формирующихся в поле силы тяжести).

Синий сигнальный свет применяется для небольших расстояний, так как его лучи сильно рассеиваются на удалении (военная сигнализация, семафоры на железной дороге).

Кроме трехкомпонентной существует и ряд других теорий светового восприятия — четырехкомпонентная, семикомпонентная, а в последнее время разрабатывается нелинейная теория восприятия цветов. Однако в теории и практике мультимедиатехнологий, цветного телевидения, фотографии и кино в настоящее время широко используется именно трехкомпонентная теория цветового зрения. Именно для нее в середине XIX в. немецкий ученый Герман Грассман сформулировал три закона аддитивного синтеза цвета — законы Грассмана.

Первый закон (принцип трехцветности): любой цвет однозначно выражается тремя другими цветами, если они линейно независимы. Линейная независимость здесь заключается в том, что ни один из этих трех цветов нельзя получить сложением

Вообще в качестве основных цветов не обязательно выбирать именно **RGB**. Любой цвет может быть описан комбинацией трех произвольных независимых цветов. Например — в модели **CMY(K)** используются голубой, лиловый и желтый оттенки

двух остальных. Несоблюдение условия независимости показывает, что, по существу, выбрано не три, а только два основных цвета. Такая система цветовых измерений могла бы устроить лишь дихромата.

Второй закон (принцип непрерывности): при непрерывном изменении длины волны цвет смеси также меняется непрерывно. Отсюда следует, что не существует такого цвета, к которому нельзя было бы подобрать бесконечно близкую смесь.

Третий закон (принцип аддитивности): цвет смеси излучений зависит только от их цвета, а не от спектрального состава. Следствием является *аддитивность цветовых уравнений*: если цвета смешиваемых излучений описаны цветовыми уравнениями, то цвет смеси выражается суммой цветовых уравнений. Иными словами, цвет, получающийся в результате смешивания двух цветных источников света, может быть точно предсказан.

Исключения. Трехцветность и законы Грассмана справедливы настолько же, насколько могут быть справедливы любые законы, описывающие биологические системы [35]. Исключения из этих закономерностей наблюдаются:

- у людей с искаженным восприятием цвета — вследствие ошибки на генетическом уровне (такие люди могут подобрать любую пару с помощью меньшего количества основных цветов);
- у людей с искаженным восприятием цвета — вследствие заболевания нервной системы (у таких людей могут проявляться различные отклонения, включая полное отсутствие чувствительности к цвету — ахромазию);
- у некоторых пожилых людей — их выбор весовых коэффициентов отличается от нормы из-за появления в глазу пигментных пятен;
- при очень ярком свете, который из-за оттенка и насыщенности отличается от менее ярких вариантов того же света;
- при очень темном освещении, когда механизм передачи цвета несколько отличается от наблюдаемого в более яркой среде.

Эффект Пуркинье. Хроматическая аберрация

В предыдущей главе говорилось, что колбочки человеческого глаза, отвечающие за восприятие цвета, менее чувствительны в условиях слабого освещения, чем палочки, воспринимающие свет и темноту. При слабом освещении человек хуже воспринимает цвет.

Пробираясь по комнате в темноте, можно воспринимать форму и расположение отдельных объектов, но не их окраску

Многие носители мультимедиа-данных в силу технических ограничений еще больше ограничивают цвет, видимый на темных участках изображения. Цвет на очень темных участках может плохо воспроизводиться при выводе на печать, видеоленту или цветную пленку. По мере приближения окраски каждого пикселя к черному его оттенок становится менее заметным [11]. Поэтому, если требуется создать ощущение темноты в трехмерной сцене, но в то же время избежать «недодержанного» вида этой сцены, не позволяющего зрителям нормально воспринимать происходящее действие, целесообразно подбирать менее насыщенные цвета для ее визуализации.

Самая чувствительная длина волны для колбочек — 555 нм (желто-зеленая область). Самая чувствительная длина волны для палочек — 505 нм (сине-зеленая область). Поэтому, например, сине-зеленые огни будут выглядеть ночью более яркими, чем красные. Это — одна из причин того, почему люминесцентные экраны работают в зеленой части видимого спектра. Относительно большую яркость синего или зеленого света по сравнению с желтым или красным светом при переходе от фотоптического к скотоптическому зрению называют **эффектом Пуркинье**. Он заключается в том, что при переходе от дневного зрения, для которого максимум соответствует длине волн желто-зеленых тонов (555 нм), к сумеречному, для которого максимум соответствует голубовато-зеленым тонам (505 нм), цвета «холодеют»: красные и желтые оттенки становятся тусклее, а голубые и зеленые — ярче.

Красный цвет способен оказывать стимулирующее влияние в основном только на колбочки. Ношение очков с красными стеклами ускоряет темновую

Фотографы используют красный цвет при проявлении отчасти потому, что он практически не действует на палочковое (темновое) зрение и при нем сохраняется высокая контрастная чувствительность

Для имитации ночных событий при визуализации принято использовать слабый голубой свет, который сохраняет ощущение темноты

адаптацию, а поскольку на палочковое зрение красный цвет практически не действует, высокая чувствительность глаза, необходимая для работы в темноте, при красном свете сохраняется. Причину того, что красный цвет не влияет на палочковое зрение, мы можем обнаружить, вспомнив спектральный максимум чувствительности палочек (500 нм, сине-зеленый свет).

Также вследствие этого максимума голубая окраска сцены сохраняет ощущение темноты. Поэтому для освещения темных участков сцены в технологиях мультимедиа и в кинематографе принято использовать слабый голубой свет. Это, как правило, делается, когда участки, которые по логике вещей должны быть темными, в действительности оказываются чрезмерно освещенными из-за необходимости обеспечить достаточный уровень света для съемочных камер. В компьютерной графике и анимации, где достаточно часто фигурируют вымышленные персонажи (например, инопланетные пришельцы), могут быть использованы и другие цвета окраски заливающего света для контраста с тонами кожного покрова подобных персонажей.

Хроматическая аберрация — окрашивание изображения в цвета радуги, искажение самого изображения и неясность (расплывчатость) его очертаний, являющиеся следствием разложения светового солнечного луча с различными коэффициентами преломления в оптической системе.

Как правило, этот термин используют при оценке оптических свойств различных линзовых систем — например, фотоаппаратов и видеокамер. В механической системе фотокамеры хроматическую аберрацию корректируют, склеивая линзы с различной взаимокомпенсирующей преломляющей способностью. Однако, как мы помним, человеческий глаз тоже является оптической системой, и для него данный эффект также имеет место. Хроматическая аберрация глаза является неотъемлемым свойством хрусталика и возникает из-за того, что он, как и простая линза, преломляет свет с более короткой длиной волны (например, фиолетовый) силь-

нее, чем длинноволновые лучи (например, красные). Из-за этого лучи всех длин волн фокусируются не в одной точке, давая четкое изображение, а одни — ближе, другие — дальше, и изображение получается расплывчатым. Это же явление может служить и объяснением кажущейся удаленности синих тонов.

Глаз человека решает эту проблему путем «отсекания» большей части коротковолнового света. Желтоватый хрусталик глаза действует как желтый фильтр: он поглощает почти весь ультрафиолет (отчасти поэтому человек его и не воспринимает) и часть сине-фиолетового участка спектра.

Кроме хроматической аберрации, в оптической системе человеческого глаза также выделяют **сферическую аберрацию**, при которой положение фокальной точки на оптической оси меняется в зависимости от длины волны.

Сферическая аберрация глаза обусловлена тем, что лучи, проходящие через периферические зоны зрачка, преломляются сильнее, чем проходящие через его центральную зону. Влияние сферической аберрации на качество изображения относительно мало при суженном зрачке (2–4 мм). При расширенном зрачке влияние сферической аберрации становится заметнее, качество изображения на сетчатке глаза значительно ухудшается. Иными словами, сферическая аберрация зависит от аккомодации — она, как правило, увеличивается с ростом аккомодационного напряжения.

Особенность глаза по сравнению с обычной оптической системой состоит в том, что в глазу сферическая аберрация частично компенсируется, во-первых, благодаря тому, что периферические зоны хрусталика имеют более слабую рефракцию (меньшую оптическую силу), а во-вторых, благодаря некоторому увеличению радиусов кривизны периферической части роговицы. Поэтому для достижения иллюзии естественной съемки в мультимедиа-технологиях при визуализации трехмерных сцен применяются специальные эффекты *«lens flare»*, эмулирующие появление оптических аберраций.

В обычных условиях освещения белым светом мы не различаем цветных каемок вокруг наблюдаемых предметов. Это объясняется наложением цветных ореолов один на другой и малыми угловыми размерами цветных каемок

Психология цветового восприятия

Почему для логотипа банка, страховой компании или лечебницы обычно выбирается синий цвет, а для закусочной — оранжевый? Цвет из выбранной цветовой схемы способен создать едва уловимое впечатление и вызвать определенные ассоциации у зрителей.

Неосознаваемая психологическая коррекция цвета заключается в том, что зрительные рецепторы являются в некотором смысле «частью мозга, вынесенной на поверхность тела». Неосознаваемая обработка и коррекция зрительного восприятия обеспечивают кажущуюся правильность восприятия зрения, и она же является причиной ошибок при оценке цвета в определенных условиях. Так, устранение фоновой засветки глаза (например, при разглядывании удаленных предметов через узкую трубку — при *туннельном зрении*) существенно меняет восприятие цветов этих предметов.

Цвету посвящено много интересных публикаций, в том числе в сети Интернет. Прежде чем перейти к использованию цвета в дизайне, остановимся немного на *колористике* — науке о цвете, включающей знания о природе цвета, основных, составных и дополнительных цветах, цветовых контрастах, смешении цветов, колорите, цветовой гармонии, цветовом языке, цветовой культуре, а также на том, какое влияние цвет оказывает на человека на физиологическом, эмоциональном и духовном уровнях.

Определений цвета как физической величины существует много. Но во многих из них с колориметрической точки зрения часто опускается упоминание о том, что однозначность восприятия цвета достигается лишь в стандартизованных условиях наблюдения, освещения и т. д. Не учитывается изменение восприятия цвета при изменении интенсивности излучения того же спектрального состава (*эффект Бецольда — Брюкке*), не принимается во внимание так называемая *цветовая адаптация глаза* и т. п. Поэтому многообразие цветовых ощущений, возникающих при реальных условиях освещения,

Эффект Бецольда — Брюкке заключается в изменении оттенка света при изменении его интенсивности. При увеличении интенсивности относительно длинноволнового света — такого как желто-зеленый или желто-красный, он будет казаться не только более ярким, но и «более желтым»

вариациях угловых размеров сравниваемых по цвету элементов, их фиксации на разных участках сетчатки, разных психофизиологических состояниях наблюдателя и т. д., всегда богаче колориметрического цветового многообразия [36].

Например, в колориметрии одинаково определяются некоторые цвета (такие как оранжевый или желтый), которые в повседневной жизни воспринимаются, в зависимости от светлоты и самой ситуации, как «светло-каштановый», «коричневатый», «оливковый» и т. д.

Кроме культурных ассоциаций, которые будут рассмотрены в последней главе этой книги, определенные цвета вызывают общие ассоциации во всем мире. Так, желто-оранжевый — это цвет солнца. Синий цвет часто воспринимается как цвет океана или неба. Пастельные синие тона придают изображению умиротворяющий или спокойный вид [2].

При раскрашивании предметов, находящихся на одинаковом удалении от наблюдателя, одни цвета обычно воспринимаются как *холодные*, удаленные (в частности, синий, иногда — зеленый или темные оттенки красного), а другие — как *горячие*, приближенные (особенно красный, оранжевый и, в отдельных случаях, ярко-голубой) [37].

На этот счет существуют разные теории. Одна из причин подобного явления может состоять в том, что в природной среде многие объекты наблюдаются на фоне синего неба или зеленой листвы, поэтому для наблюдателя вполне естественно относить синий и зеленый к цветам «фона». Кроме того, человеку свойственно сосредоточивать больше внимания на более теплых коричневых тонах, красных и желтых объектах (скажем, на ломтике красного фрукта, ране или телесных тонах кожного покрова людей и животных), чем на листве и небе.

«Горячие» цвета, в том числе красный, оранжевый и желтый, обычно считаются энергичными, возбуждающими, живыми, привлекающими внимание. Возможно, именно эти свойства подобных цветов и заставляют рестораны и закусочные выбирать оранжевый и желтый цвета для своих логотипов.

Густые, насыщенные синие тона создают впечатление «солидности» и «внушительности». Возможно, поэтому многие банки и страховые компании выбирают для своих логотипов синий цвет, хотя на их выбор могут оказывать влияние и другие соображения и ассоциации

Человеку свойственно сосредоточивать больше внимания на более теплых коричневых тонах, красных и желтых объектах, чем на цветах листвы и неба

Однако избыток красного цвета может вызвать чувство тревоги, ассоциируясь с кровью и огнем.

Даже едва заметная окраска освещения сцены помогает создать нужное впечатление. Другими словами, освещение сцены заливающим светом определенной окраски меняет восприятие цвета конкретного объекта, умаляя его исключительность. Так, свет синей окраски позволяет создать впечатление зимы или вечерней атмосферы и придать местности или персонажу холодный вид, а свет с едва заметной красной или желтой окраской — теплый, уютный или интимный вид [11]. Однако синий цвет объектов может гнетуще смешиваться с голубой вечерней атмосферой и изменить впечатление, создаваемое сценой, с зимнего на тревожно-ужасное.

Восприятию объемности сцены может способствовать тот факт, что более насыщенные цвета выдвигаются на передний план по сравнению с менее насыщенными. Выбранный цвет может оказывать влияние на восприятие, выполняя функцию ориентира глубины (*depth cue*) — своего рода подсказки для правильного восприятия изображения зрителями. Ориентир глубины способствует созданию впечатления, будто одни объекты выдвинуты на передний план, а другие отступают на задний.

Специалистам по рекламе известно, что отчетливый, привлекательный цвет выделяется на фоне серого, белого или черного цветов, которые менее заметны в силу специфики палочкового зрения и поэтому воспринимаются как фон.

Профессиональная калибровка цветных мониторов требует использования соответствующего фонового освещения комнаты, оператор надевает черный халат и шапочку.

Визуальные оформительские элементы программных продуктов должны иметь нейтральный цвет.

Туман или любое другое атмосферное явление может стать причиной смещения цвета в сторону менее насыщенных тонов на расстоянии. Вследствие этого в тумане объекты кажутся дальше, чем на самом деле. А насыщенный зеленый цвет, например, воспринимается ближе, чем менее насыщенные зеленые тона.

Если рисовать синим по голубому, то воспроизводится тревожное, гнетущее впечатление

Ограниченный фокус и разрешение человеческого зрения также позволяют оставить самые яркие, чистые цвета лишь для переднего плана. Яркие цвета для заднего плана теряют свою эффективность, потому что на нечетко сфокусированном фоне либо на объектах, кажущихся на расстоянии мелкими, тона от соседних объектов могут смешиваться, разбавляя любые отчетливые, привлекающие внимание цвета, которые иначе были бы видны вблизи.

Контекстные ассоциации

В художественном фильме значение отдельных цветов, как, впрочем, и других символов, может быть переопределено. Кадр фильма в виде части общего сюжета воспринимается иначе, чем то же самое изображение, напечатанное на бумаге или взятое в отдельности. Присутствие на экране чего-то важного для сюжета фильма или персонажа превращается в многозначительный символ.

Астрологи считают, что человек интуитивно, не осознавая этого, предрасположен к «своему» цвету согласно знаку Зодиака и что он наиболее комфортно должен чувствовать себя в цвете, соответствующем его знаку. Цвета в кольце Зодиака располагаются в таком порядке:

- Овен — красный;
- Телец — светло-зеленый;
- Близнецы — все цвета радуги;
- Рак — зеленый;
- Лев — оранжевый, желтый, белый;
- Дева — синий;
- Весы — темно-зеленый;
- Скорпион — пурпурный;
- Стрелец — все цвета радуги;
- Козерог — белый, черный, лиловый;
- Водолей — фиолетовый;
- Рыбы — сине-зеленый.

С давних времен люди знали и целительную силу цвета. Еще в 1878 г. доктор Эдвин Брабитт по-

Когда у древних греков беременела женщина, ее окружали красивыми предметами (вазами, цветами и т. д.), так как думали, что все, что она видит, будет оказывать на нее и на развитие ребенка положительное воздействие

казал, что каждый цвет обладает терапевтической ценностью. Например, голубой цвет, наиболее часто используемый при *цветолечении*, оказывает антисептическое действие на человеческий организм и уменьшает интенсивность приступа астмы. Красный цвет, который находится на противоположном конце спектра, повышает кровяное давление, способствует проявлению активности и помогает при анемии.

Нельзя не учитывать и психофизиологические аспекты использования цвета, т.е. последствия его чисто физиологического воздействия на человека. Например, экспериментально доказано, что воздействие зеленого цвета понижает внутрглазное давление, повышает слуховую чувствительность, способствует нормальному кровенаполнению сосудов [38]. Красный цвет имеет обратное воздействие, поэтому его избыточное использование при создании мультимедийных презентаций, программ и т. п. может оказывать негативное воздействие на пользователя.

При создании мультимедийных продуктов важно также акцентировать внимание на идее, композиции, стиле, выборе цветовой гаммы, сопровождающих создаваемый ресурс. Цветовая гамма не должна быть слишком пестрой и вызывающей.

Цветовая температура и цветовой баланс

Цветовой баланс белого определяет, какой цвет освещения будет воспроизведен как белый свет и какие цвета придадут свету дополнительную окраску

Вспомним, что человеческий глаз автоматически приспосабливается к среднему уровню текущей освещенности сцены. Адаптировавшись к внешнему освещению, человек начинает воспринимать преобладающий цвет освещения как белый, поэтому окружающие его объекты приобретают нормальную окраску. Подобный механизм коррекции, называемый *балансом белого*, выполняется и в электронных схемах цифровых фотоаппаратов и видеокамер.

При компьютерной визуализации трехмерных сцен также необходимо учитывать цветовой баланс в процессе настройки цвета источников света. В отличие от обычной видеокамеры или фотоаппарата у

Начинающие фотографы иногда удивляются, почему, фотографируя в помещении при флуоресцентном освещении, они получают голубоватую сцену, а фотография той же сцены при уличном освещении может иметь теплый оранжевый оттенок

виртуальной камеры в большинстве программ трехмерной визуализации отсутствуют какие-либо элементы управления для имитации разного цветового баланса. Поэтому прежде чем выбирать реалистичный цвет для источника света, необходимо узнать характерную окраску имитируемого реального источника света и общий цветовой баланс, который требуется передать в визуализируемой сцене [11].

Цветовой баланс описывается с помощью *цветовой температуры*, измеряемой в кельвинах (К). Шкала температур Кельвина начинается с абсолютного нуля (при температуре -273°C). Такое описание цветов освещения является стандартным для фотографии и кино, поэтому здесь имеет смысл остановиться более подробно на этих понятиях, чтобы получить возможность выбирать более реалистичные цвета для источников света при визуализации трехмерных сцен.

В конце XIX в. британский физик Уильям Кельвин писал, что кусок черного угля светится разным цветом при различной температуре нагрева. Сначала нагретый уголь излучал тусклый красный свет, который постепенно становился ярко-желтым по мере увеличения температуры и в итоге превращался в яркое голубовато-белое свечение при максимальной температуре.

В табл. 4.2, заимствованной из [11], приведены цветовые температуры в кельвинах, сопоставляемые с источниками света, встречающимися в реальном мире. Низкая цветовая температура (начиная с пламени спички и свечи) соответствует более красному цвету, а высокая — более голубому.

Четкой взаимосвязи между цветовыми температурами, приведенными в табл. 4.2, и значениями *RGB*, выбираемыми для цвета источника света, не существует. Тем не менее цветовые температуры помогают выбрать реалистичные цвета источников света после установки цветового баланса.

Один из самых распространенных цветовых балансов, равный 5500 К, предназначен для съемки при дневном свете (при *наружном освещении*). Однако цвета дневного освещения не ограничиваются только цветами самих источников света. В реаль-

Таблица 4.2

Цветовые температуры различных источников света

Источник света	Цветовая температура, К
Пламя спички	1700–1800
Пламя свечи	1850–1930
Солнце при восходе или на закате	2000–3000
Бытовая лампочка накаливания	2500–2900
Лампа накаливания мощностью 500 Вт – 1 кВт	3000
Кварцевые источники света	3200–3500
Флуоресцентные источники света	3200–7500
Лампа накаливания мощностью 2 кВт	3275
Лампа накаливания мощностью 5 – 10 кВт	3380
Прямой солнечный свет в полдень	5000–5400
Солнце, пробивающееся сквозь облака	5500–6500
Небо в пасмурную погоду	6000–7500
RGB-монитор (белая точка)	6500
Области тени снаружи	7000–8000
Облачное небо	8000–10000

Если цветовая температура источника света совпадает с цветовым балансом, выбранным для сцены, то мы получим белую или серую окраску. Если цветовая температура будет ниже — то зеленую или красную. Если выше — то голубую.

ной жизни часть солнечного света перед тем, как осветить объект, отражается от различных поверхностей в окружающей среде. Эффект окраски света при отражении от поверхностей называется *окрашиванием* (*color bleeding*). Любые цвета, преобладающие в окружающей обстановке (в частности, зеленый на зеленой лужайке), должны быть включены в окраску освещения [11].

Другим распространенным цветовым балансом является 3200 К — для съемки в помещении при свете лампы накаливания. Реальная сцена при этом обычно освещена светом самой разнообразной окраски. Даже если весь свет исходит от одинаковых лампочек, окраска стен может способствовать окрашиванию заливающего света, а цветовые тона абажуров примешиваются к окраске источников

внутреннего освещения. Твердого правила для выбора окраски внутреннего освещения не существует, поэтому в каждой сцене следует учитывать, до какой степени окрашенный абажур или стена оказывают влияние на цвета наблюдаемой обстановки.

Связь цветов и звуков. Синестезия

Музыкальные образы являются более отвлеченными, более обобщенными, чем зрительные. Они допускают расхождения в понимании даже в пределах программы, взятой композитором, и могут производить различные впечатления на слушателей. всякая попытка уточнения и конкретизации музыкальных образов в зримых или словесных формах неизбежно оказывается в той или иной мере субъективной, зависящей от индивидуальных склонностей [39].

Австрийский музыкальный критик и эстетик середины XIX в. Э. Ганслик решительно отрицал всякую способность музыки выражать чувства и мысли. По его утверждению, музыка представляет собой движущиеся звуковые формы, нечто вроде беспорядочно вертящихся в калейдоскопе разноцветных стекляшек.

Советский инженер К.Л. Леонтьев создал аппаратуру, позволяющую соединить музыку с игрой окрашенных лучей света на экране, подчиненной цветозвуковым закономерностям: переход от синего цвета в самых высоких нотах через зеленый и желтый к красному в басах.

Конец 1970-х гг. открыл эру видеоклипов. Начало ей было положено группой Queen. В 1975 г. музыканты этой группы создали видеоклип на композицию «Богемская рапсодия». Это произведение представляло собой синтез синхронизированного видеоряда и музыки. Отличительной чертой всех видеоклипов является конкретность форм, что мешает восприятию музыки и нарушает гармоничность произведения в целом.

Попытки создать формальный подход к визуализации звука не были удачными, как правило, по техническим причинам и из-за недооценки психологических и математических взаимосвязей звука и

видео. Однако, например, С.М. Эйзенштейн предложил свою точку зрения на средства достижения соответствия цвета звучанию. Прежде всего он считал, что штриховой мультипликационный рисунок с резко окаймленными контурами («диснеевский») подлежит замене мягкими цветными пятнами с размытыми краями. Примером подобного изобразительного решения является культура китайского пейзажа. По мнению Эйзенштейна, Диснею следовало бы придерживаться именно мягкой размытости форм обстановки и фона, способных переходить друг в друга и вторить смене настроений, творя в своем течении подлинно пластическую музыку. Достигнуть этого можно лишь определенной «дематериализацией» элементов пейзажа, когда создалась бы «цветовая мелодия», а соответствие между цветом и музыкой стало бы не только эмоциональным, но и мелодическим.

Конечно, нельзя не упомянуть здесь и русского композитора А.Н. Скрябина, работавшего на рубеже XIX–XX вв. В своей пятой симфонии «Прометей» он создавал музыку и цвет с помощью оркестра, фортепиано, хора и специального цветового органа. Он утверждал, что можно слышать цвета [4]. Композитор даже говорил об осознательных симфониях и пытался заниматься их созданием. Считается, что у А.Н. Скрябина была синестезия (от греч. *synaesthesia*). У «синестетиков» взаимосвязаны два или даже более чувственных ощущения — источник одного выступает стимулатором и для другого (или других). Синестетики способны ощущать «вкус» звуков или «обонять» визуальные объекты; они «видят» музыку в цвете и различают на ощупь «мягкие» и «твёрдые» цифры.

В процессе наблюдений было зафиксировано множество возможных комбинаций синестезии. Хорошо известна и довольно распространена графемно-цветовая синестезия, при которой люди воспринимают цвет буквы или цифры, когда видят ее написанной, слышат, как ее называют, или просто думают о ней. Цвета, которые синестетики видят, когда им показывают цифры или (в некоторых случаях) когда они слышат определенные звуки, устойчивы, но вовсе не одни и те же для всех.

Синестезия означает смешанное ощущение, когда при раздражении одного органа чувств наряду со специфическими для него ощущениями возникают и ощущения, соответствующие другому органу чувств

Ш. Дэю удалось выделить 19 различных типов данного феномена. Цифры и буквы вызывают ощущение цвета в 121 случае из 175 (69%). Промежутки времени ассоциируются с цветами в 42 случаях (24%). Звуки речи вызывают ощущение цвета в 24 случаях (14%), а звуки музыки — в 21 случае (12%). Окрашенные в различные оттенки музыкальные ноты синестетики видят в 16 случаях из 175 (9%). Волевые ощущения ассоциируются с цветами в 6 случаях (3,4%). Запахи вызывают ощущение цвета в 5 случаях (3%). Также в 5 случаях из 175 (3%) цвета вызываются личностями людей либо вкусовыми ощущениями. По 3 случая (2%) приходится на такие типы синестезии, когда звук вызывает вкус, звук вызывает чувство прикосновения или вид вызывает вкус. Прикосновение вызывает вкус лишь в 2 случаях (1%). И наконец, по 1 случаю из 175 (0,6%) приходится на такие смешения чувств, когда звук вызывает запах, температура воздуха вызывает цвета, вкус вызывает чувство прикосновения, прикосновение вызывает запах или вид предметов вызывает чувство прикосновения [40].

Неявная синестезия присутствует у всех людей в той или иной степени

Не следует, впрочем, забывать, что классическая синестезия — это достаточно редко (по некоторым оценкам, в одном случае на 25 000 человек) встречающийся феномен. Тем не менее обычные люди также подвержены частичному связыванию звуков и цветов. Например, один из известных авторов в этой области, лингвист А.П. Журавлев приводит следующие данные о гласных звуках русского языка (обобщенные по результатам нескольких экспериментальных процедур) [41]:

- «А» — ярко-красный;
- «И» — синий, голубой;
- «О» — светло-желтый;
- «У» — сине-зеленый;
- «Ы» — черный, темный;
- «Э» — желто-зеленый.

Наиболее универсальной в этом отношении оказалась характеристика «светлоты». Немецкий психолог Э.М. Хорнбостель показал в 1920-х гг., что

светлыми и темными могут быть не только зрительные, но и осязательные, органические, обонятельные и слуховые ощущения. Так ощущения голода, прикосновения гладким и твердым предметом оценивались как светлые, а противоположные им ощущения — сътости, прикосновения шершавым и мягким предметом — как темные. Характеризуя неизвестные запахи, испытуемые использовали те же определения: запах духов казался им светлым, а запах дегтя — темным.

Существует много объяснений синестезии, и чаще всего ее квалифицируют как «функциональное отклонение». Встречаются, правда, мнения [42], что она является нормой человеческой психики (восприятия, воображения, творчества), специфическим проявлением невербального мышления. А самая сенсационная версия — что все мы без исключения (!) рождаемся синестетиками — в мозгу младенцев импульсы от всех органов чувств перемешаны, но в возрасте примерно полугода происходит их разделение по полушариям: звуки — «направо», зрительная информация — «налево». Ученые считают этот процесс отмиранием нейронов, создающих синаптические мостики. У синестетиков же эти синаптические мостики остаются неповрежденными, так что они всю жизнь пребывают в счастливом младенчестве, когда чувства нераздельны. В явной форме, по данным ряда исследований, синестезия наблюдается примерно у 50% детей и не более чем у 0,5% взрослых.

Для рассматриваемых в данной книге мультимедиа-технологий изложенные факты важны прежде всего с точки зрения *визуализации музыки*. Сегодня уже созданы и довольно популярны визуализаторы музыки, интегрированные в компьютерные программы — проигрыватели музыки [43].

Визуализатор музыки — это программа, анализирующая физические характеристики музыки. По результатам такого анализа производится алгоритмический синтез двумерного или трехмерного изображения. В результате изображение постоянно перемещается и изменяется синхронно звучанию музыки. Слушатель (являющийся одновременно и

Среди синестетиков много известных личностей. Некоторые ученые полагают, что смешение ощущений способно создавать гениев

зрителем) наблюдает превращение музыки в зримые формы на экране. Например, когда музыканты играют *forte*, объекты становятся большими и приближаются к зрителю, а если музыка затихает, то объекты исчезают за линией горизонта. Форма, цвет и другие параметры визуальных объектов зависят от звуковых характеристик исполняемой музыки.

Другим важным вопросом для наших технологий является ощущение вибрации, возбуждаемое звуковыми волнами. Слуховая система человека полностью или частично не воспринимает колебания воздуха с частотой ниже двадцати герц. Более низкие тоны воспринимаются нами в виде вибрационных ощущений кожно-мышечной системы, а не с помощью слуха, что доказывается существованием вибрационной чувствительности у глухих. Для возникновения ощущения вибрации важно, чтобы раздражение передавалось костными тканями и распространялось на возможно большую часть тела. Этот прием используется, например, для более полноценной передачи виртуального присутствия на концертах.

Мультимедийное резюме



Приведем основные выводы, имеющие высокую актуальность при разработке мультимедийных приложений и визуализации трехмерных сцен, использующих эффекты яркости и цветности.

- Световое излучение, воспринимаемое зрительным аппаратом человека, лежит в относительно небольшом диапазоне электромагнитных волн, называемых *видимым спектром*.
- Максимум visualной чувствительности глаза человека по яркости находится в желто-зеленой области излучения волн, а при смещении к краям спектра яркостная чувствительность снижается.
- Следствием свойства постоянства цвета является то, что при разных условиях наблюдения различные цвета вызывают у человека одинаковые цветовые ощущения.

- Цветовые ощущения раскладываются на три субъективные физиологические составляющие: светлоту, цветовой тон и насыщенность. Им соответствуют объективные физические параметры: яркость, длина волны и чистота цвета.
- Несмотря на большое (7–10 млн) количество цветов, которые человек может различить в принципе, одновременно различается всего лишь от 100 до нескольких тысяч оттенков.
- Цветовое зрение человека является *трихроматическим*: в зрительном механизме представлены три отдельных процесса цветового ощущения, имеющих максимумы чувствительности в области синих, зеленых и красных световых волн. При этом количество клеток, чувствительных к красному и зеленому цветам, превышает количество синих рецепторов.
- Благодаря свойству *метамерии* можно заставить человека ошибочно воспринимать любой цвет видимого спектра за счет воздействия комбинации трех основных цветов. Это свойство является базовым в телевидении и компьютерных технологиях. Оно подтверждается законами Гассмана.
- При визуализации искусственных трехмерных сцен не следует забывать, что большинство природных цветов не являются спектрально чистыми, поэтому к текстурам одного цвета для большей реалистичности желательно добавлять немного соседних цветов.
- Определенные цвета вызывают у людей устоявшуюся психологическую реакцию. Например, красный цвет — теплый, стимулирующий внимание, связанный с опасностью; синий — успокаивающий, холодный. Слабый голубой цвет также принято использовать для освещения темных участков сцен (которые по логике событий должны быть затемненными).
- При сумеречном и темновом (скотопическом) зрении процессы цветового восприятия несколько нарушаются. Более высокую различимость в сумерках сине-зеленого цвета, чем желто-красного, объясняет *эффект Пуркинье*.

- Аберрации глаза, являющиеся особенностями оптической системы человека, объясняют эффект появления цветных (радужных) каемок вокруг наблюдаемых предметов при пристальном боковом взгляде. Существуют специальные компьютерные фильтры, позволяющие имитировать оптические аберрации для создания иллюзии естественной съемки. Кроме того, аберрация глаза частично объясняет кажущуюся удаленность объектов, окрашенных в синие тона.
- Кроме физиологических особенностей важно помнить про психологическую коррекцию наблюдаемых цветов, часто происходящую непривычно (неосознаваемо). Из-за нее один и тот же физический цвет может восприниматься с различными психологическими оттенками: например, желтый как «канареечный», «лимонный», «оливковый» или «светло-каштановый».
- Более насыщенные цвета неосознанно выдвигаются зрителем на передний план по сравнению с менее насыщенными, что может быть использовано для создания дополнительного эффекта глубины создаваемой сцены. Туман или дымка в атмосфере частично отодвигают и обесцвечивают объекты.
- Понятие *цветового баланса белого* определяет, какой цвет освещения будет воспроизведен как белый свет и какие цвета придаут свету на сцене дополнительное окрашивание. Регулировать баланс белого в искусственных сценах можно за счет изменения цветовой температуры размещенных на сцене источников света.
- Свойство *синестезии* объясняет эффект возникновения смешанного ощущения, когда при раздражении одного органа чувств возникают ощущения, соответствующие другому органу. Считается, что синестезия в неявной форме существует у всех людей (например, как частичное связывание звуков и цветов), что позволяет использовать мультимедиа-технологии для комплексного воздействия на органы чувств.



Контрольные вопросы и задания

1. Часто кажется, что в густом еловом лесу нет ни красных, ни синих, ни желтых цветов, а одни только белые или бледно-розовые. Чем это объясняется?
2. Приведите примеры светлоты, цветового тона и насыщенности.
3. Какие селективные процессы возбуждает оранжевый цвет?
4. Почему в телевидении в качестве основных выбраны именно красный, синий и зеленый цвета? Можно ли использовать здесь другие основные цвета?
5. Почему синий цвет практически не используется в качестве сигнального?
6. Почему красные огни ночью выглядят более тусклыми, чем синие?
7. Когда мы видим вокруг наблюдаемых предметов цветовые каемки?
8. Какие предметы будут выглядеть выдвинутыми на передний план — окрашенные более насыщенно или менее насыщенно?
9. Приведите примеры окрашивания света.

Глава 5

Зрительные иллюзии

- Объемные рисунки
- Феномен образа
- Обратимая перспектива
- Латеральное торможение
- Одновременный контраст
- Бессознательная группировка
- Эвристические правила интерпретации
- Нахождение слепого пятна

Op-art и классификация иллюзий

Продолжая тему, поднятую нами при обсуждении психологии цветового восприятия, рассмотрим более общую проблему анализа возникновения и классификации зрительных иллюзий. Понимание механизмов их воздействия на восприятие важно для многих областей мультимедиа-технологий: для построения трехмерных сцен, приемов композиции и освещения, восприятия глубины, движения, чтения художественно оформленного текста и т. п.

Существует большое количество иллюзий, заставляющих человека ошибочно воспринимать и распознавать объекты. Процесс возникновения иллюзий сложно поддается формализации, но, помимо психологических и физиологических причин, ряд работ (например, [44]) позволяет говорить об эволюционных причинах появления иллюзий, когда человек неосознанно «дополняет» то, что видит, на основе накопленного опыта.

Появился даже особый вид искусства — «op-art», когда художник создает изображения объектов, не

Иллюзии вызывают закономерный вопрос: действительно ли мы видим то, на что смотрим?

существующих в пространстве. Задача «оп-арта» — обмануть глаз, спровоцировать его на ложную реакцию, когда визуально противоречивая конфигурация создает неразрешимый конфликт между фактической и видимой формами.

«Оп-арт» намеренно противодействует нормам человеческого восприятия, используя некоторые особенности последнего. Исследования психологов показали, например, что глаз всегда стремится организовать хаотически разбросанные пятна в систему (часть *гештальт-теории*, см. далее). В оптической живописи, напротив, простые однотипные элементы располагаются так, чтобы дезориентировать глаз, не допустить становления целостной структуры и тем самым добиться рассогласования зрительного и рационального восприятия. Такие зрительные эффекты могут быть использованы, в частности, в рекламе как торговые знаки, этикетки и т.д.

Частично к движению «оп-арт» можно отнести создание объемных рисунков на асфальте. Это очень интересный способ встраивания виртуальных объектов в действительность, когда фотoreалистичное изображение наносится на тротуар так, что с определенной точки зрения оно выглядит объемным (рис. 5.1).



Рис. 5.1. Объемный уличный рисунок Эдуарда Родлера

На самом же деле это изображение является плоским. Если немного сместиться в сторону, то изображение тут же потеряет свою объемность и при взгляде сверху будет выглядеть только лишь сильно вытянутым по вертикали. Специальная мультимедиа-программа — трехмерный обработчик масштабирует предварительный эскиз рисунка с учетом будущей (фиксированной в пространстве) точки расположения наблюдателя. Затем художник переносит «вытянутый» эскиз на асфальт.

Приведем одну из условных классификаций иллюзий, применяемых в психологии:

- зрительные искажения (иллюзии Геринга, Поггендорфа, Цельнера);
- иллюзии восприятия размера (иллюзии Эббингауза, Мюллера-Лайера, Ястрова, Понцо);
- иллюзии цвета и контраста (решетки Геринга, ахроматический контраст, полосы Маха, иллюзия Вертгеймера-Коффки);
- эффект последействия (эффект Макколоф, иллюзии Маккея, Германа-Геринга);
- иллюзии движения (иллюзия Оучи и др.);
- двойственные изображения, соотношение фигуры и фона, кажущиеся фигуры (треугольник Каниша, куб Неккера и др.);
- иллюзии восприятия глубины (куб Неккера, рисунки Эшера и др.);
- невозможные фигуры (треугольник Пенроуза, иллюзия Рейтерсварда и др.).

Частично некоторые пункты классификации пересекаются друг с другом. Например, классический куб Неккера относится как к иллюзиям восприятия глубины, так и к двойственным изображениям. В дальнейшем мы рассмотрим некоторые из этих иллюзий более подробно.

Восприятие образов и глубины. Эффект гистерезиса

Сначала необходимо рассмотреть общий феномен образа (В. Кёлер, М. Вертахаймер, около 1920 г.). На

достаточно однородном фоне зрительным восприятием выделяются некоторые обособленные цельные замкнутые области с определенными очертаниями — фигуры [5]. На рис. 5.2а с первого взгляда видно, что все это — изображения одной и той же фигуры.

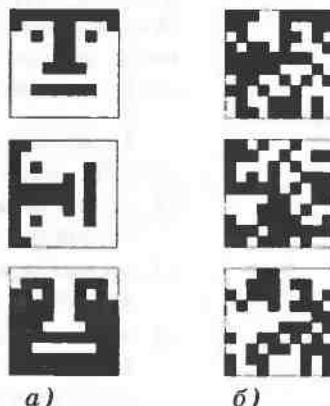


Рис. 5.2. Феномен образа:
а) — положительный,
б) — отрицательный

Совершенно аналогично построен и рис. 5.2б: здесь мы также имеем дело с поворотом одного и того же изображения и с заменой черных полей на белые и наоборот. Однако, чтобы обнаружить это, необходимо сравнивать друг с другом отдельные поля клетка за клеткой. Здесь нельзя распознать какую-либо фигуру, поворот которой можно было бы заметить.

Отсюда следует, что за окончательное формирование зрительного образа отвечает не только зрительный аппарат. Это ясно также и из того факта, что на некоторых изображениях можно распознать несколько различных фигур. Например, классический куб Неккера (по имени швейцарского естествоиспытателя Л.А. Неккера, впервые описавшего его в 1832 г.) иллюстрирует стереоскопическую двусмысленность — *обратимую перспективу* (рис. 5.3). Пристально глядевшись, можно заметить, что это рисунок-«перевертыш»: передняя грань куба может становиться задней, и наоборот. Эти изменения происходят сами по себе, они не зависят от органа зрения.

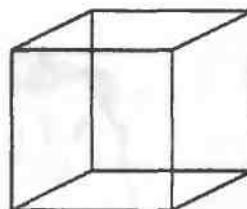


Рис. 5.3. Куб Неккера

А вот образ на рис. 5.4 зависит от того, считаем мы фон белым или черным. *Двойственные или многозначные изображения* объясняются тем, что при восприятии подобных рисунков у человека возникают различные *виртуальные представления*, одинаково соответствующие имеющемуся изображению. Поэтому достаточно мысленно выделить в рисунке какую-либо характерную деталь, соответствующую определенному представлению, чтобы сразу же увидеть определенный объект.



Рис. 5.4. Билл Клинтон и Моника

С этими явлениями тесно связан феномен *гистерезиса* (от греческого *hysteresis* — «отставание», «запаздывание»). Применительно к распознаванию образов он заключается в замедленном переключении наблюдателя с одного, уже распознанного образа на другой, еще не распознанный, на одном и том же изображении (рис. 5.5).

Если на этой иллюстрации последовательно, один за другим, рассматривать рисунки построчно слева направо, то сначала мы увидим мужское лицо, а потом — женскую фигуру. Переключение воспринимаемого образа обычно происходит на пятом шаге, т. е. на шестой картинке. Если же идти по цепочке рисунков в противоположном направле-

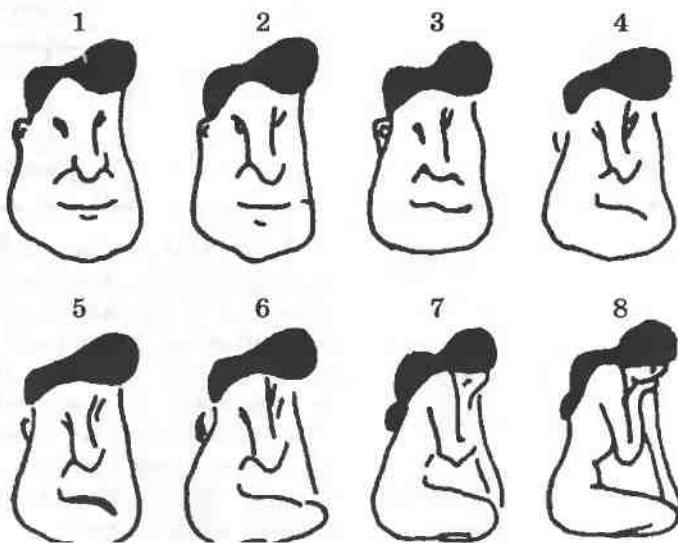


Рис. 5.5. Гистерезис при распознавании образов

нии, то «опрокидывание» зрительного образа происходит обычно тоже лишь на пятом шаге — уже на картинке номер три.

Феномен образа проявляется также и в случае, когда при обработке изображения в головном мозге оно дополняется деталями, отсутствующими в рассматриваемом рисунке (*дополнение образа*). Рис. 5.6 иллюстрирует такое мысленное достраивание второго (белого) треугольника.

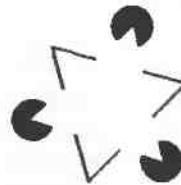


Рис. 5.6. Треугольник Ка-ниша. Сколько треугольников изображено на этом рисунке?

Яркостные иллюзии. Латеральное торможение. Иррадиация

Субъективное восприятие человеком перепадов яркости всегда отличается от их объективных значений (рис. 5.7). В итоге можно считать, что в определенном смысле мы умудряемся normally жить в иллюзорном мире [45].

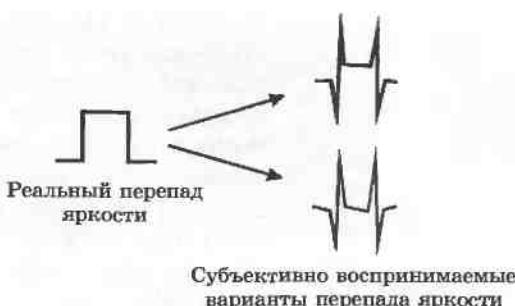
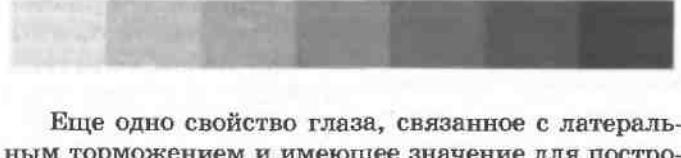


Рис. 5.7. Субъективное восприятие перепадов яркости

Целый ряд яркостных иллюзий объясняется с научной точки зрения *эффектом латерального торможения*. Обнаруженный в 1958 г. Ф. Ратлиффом, этот эффект объяснил контрастирование изображений, улучшающее возможности предметного зрения. Он обеспечивает центральным нейронам анализаторов избирательную настройку их рецептивного поля на определенные свойства раздражителя.

Самый простой способ увидеть собственными глазами последствия эффекта латерального торможения — обратиться к рис. 5.8, где изображена последовательность ступенчатых изменений яркости. Границы между соседними ступеньками воспринимаются совершенно четко, и их существование не вызывает сомнений. Однако достаточно закрыть какую-нибудь границу хотя бы тоненькой ниточкой, и перепад яркости исчезает, а соседние ступеньки воспринимаются как сплошная зона одной яркости. Объяснение этого эффекта — в том, что с помощью нитки мы закрываем границу и тем самым — зону усиления перепада яркости. Тогда выделение границ происходит уже не за счет измерения площадей, обладающих разными яркостями, а путем оценки тонкой зоны на их стыке — подчеркивания контуров.

Рис. 5.8. Эффект латерального торможения



Еще одно свойство глаза, связанное с латеральным торможением и имеющее значение для постро-

ения синтезированных изображений в мультимедиа, связано с тем, что границы областей постоянной интенсивности кажутся более яркими, а в результате области с постоянной интенсивностью воспринимаются как имеющие переменную интенсивность. Это явление называется *эффектом полос Маха* — по имени открывшего его австрийского физика Эрнста Маха (рис. 5.9 — наблюдение кажущихся серых точек на белых перекрестиях). Эффект полос Маха наблюдается, когда резко изменяется наклон кривой интенсивности (яркости) на изображении. Если кривая интенсивности вогнута, то в этом месте поверхность кажется светлее, а если выпукла — темнее.

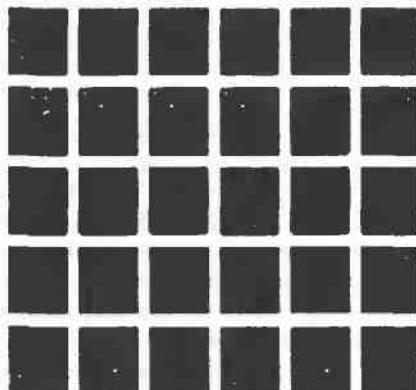


Рис. 5.9. Полосы Маха

Напомним, что глаз приспосабливается к средней яркости обозреваемой сцены. Поэтому область небольшого размера с постоянной яркостью (интенсивностью) на темном фоне кажется ярче или светлее, чем на светлом фоне. Это явление называется *одновременным контрастом*. Человеческий глаз (в отличие от уха) воспринимает не относительные изменения интенсивности сигнала, а абсолютные значения яркостей относительно общей яркости фона. Поэтому в отличие от аудиотехнологий логарифмическое представление видеосигнала не прижилось.

Еще одним хорошим примером одновременного контраста является рис. 5.10. Яркость всех центральных квадратов здесь одинакова, но чем светлее становится фон, тем они кажутся темнее.

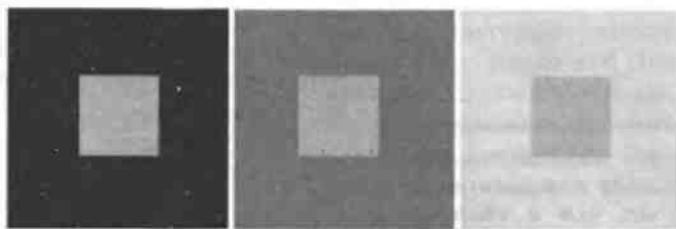


Рис. 5.10. Иллюзия квадратов: контраст и иррадиация

Величина скачка размера фигуры или фона составляет для черной на белом или белой на черном фигуры до 3% от ее геометрического размера

Этот же рисунок заодно иллюстрирует эффект *иррадиации*: центральный квадрат слева кажется больше, чем такой же квадрат справа. Эффект иррадиации проявляется в том, что светлые предметы на темном фоне кажутся крупнее своих настоящих размеров и как бы «захватывают» часть темного фона. Это явление известно с очень давних времен. Еще Витрувий (I в. до н. э.) — архитектор и инженер Древнего Рима — в своих трудах указывал, что на границе темного и светлого «свет пожирает мрак» [46].

Первоначальное объяснение эффекта иррадиации было дано Р. Декартом, который утверждал, что увеличение размеров светлых предметов происходит из-за распространения физиологического возбуждения на места, соседние с теми на сетчатке, которые подверглись действию света.

Более строгое объяснение сформулировал физик и физиолог Г. Гельмгольц. Согласно ему, первопричина иррадиации заключается в следующем. Каждая светящаяся точка изображается на сетчатке глаза в виде маленького *кружка рассеяния* из-за несовершенства хрусталика, неточной аккомодации и пр. Когда мы рассматриваем светлую поверхность на темном фоне, вследствие аберрационного рассеяния границы этой поверхности как бы раздвигаются, и поверхность кажется нам больше своих истинных геометрических размеров. Нагляднее всего иррадиация воспринимается расфокусированным, нерезким зрением. Иными словами, иррадиация — это привилегия близоруких.

Этот феномен хорошо известен и в фотографии, где он приводит к появлению ореолов на светочувствительных материалах. Фотографический метод

регистрации иррадиации — самый надежный. Он значительно усиливает данный эффект из-за того, что степень нерезкости объектива гораздо больше возможной нерезкости глаза.

Вообще говоря, возникновение феномена иррадиации при восприятии подобных рисунков на бумаге — это очередное обстоятельство, свидетельствующее о темновой адаптации, так как яркость света при наблюдении иррадиации в природе в десятки (если не в сотни) раз превышает яркость света, отраженного от самой белой бумаги: ведь это — свящающиеся объекты на фоне ночного неба, например восходящее и заходящее солнце или диск Луны, ветки дерева на фоне солнца, черная нить на фоне яркой лампы и т. д.

Геометрические иллюзии. Виртуальные прямые

Многие геометрические иллюзии связаны со стереоскопическим эффектом восприятия глубины и размера на плоских изображениях, который будет рассматриваться в главе 6.

Как показано на рис. 5.11, контуры и кривые могут быть *виртуальными* (*воображенными*). Известна гипотеза, согласно которой, если зрительная система человека воспринимает наличие перекрывающих друг друга объектов или объекта и фона, то отбрасывается интерпретация, по которой свойства объекта и фона считаются совпадающими [22].

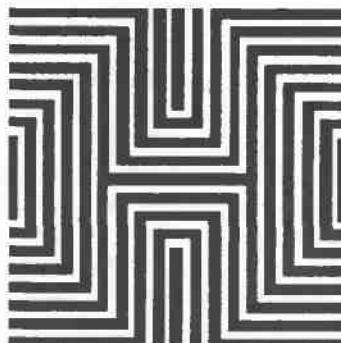


Рис. 5.11. Эффект Маккофф: большие и маленькие ромбы здесь — лишь кажущиеся, «виртуальные»

Эта особенность восприятия настолько сильна, что слева на рис. 5.12 человек легко видит куб Неккера, виртуально достраивая нехватавшие отрезки. Однако если фигура на левом рисунке воспринимается как куб, то на правом, где достаточно было лишь замкнуть кривые, она воспринимается только как набор отдельных кусков.

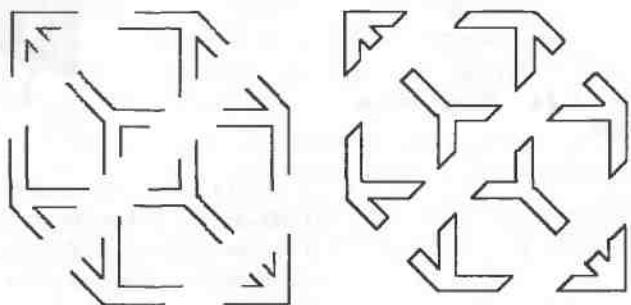


Рис. 5.12. Эффект стремления к замкнутому контуру

Виртуальные прямые (или кривые) образуются в процессе зрительного восприятия человеком вследствие бессознательной группировки похожих точек или объектов, расположенных вдоль воображаемой прямой или кривой на изображении. Однако бессознательная группировка похожих точек может подводить нас при оценке прямолинейности геометрических объектов, как, например, прямых под 45° в иллюзии Геринга (рис. 5.13).

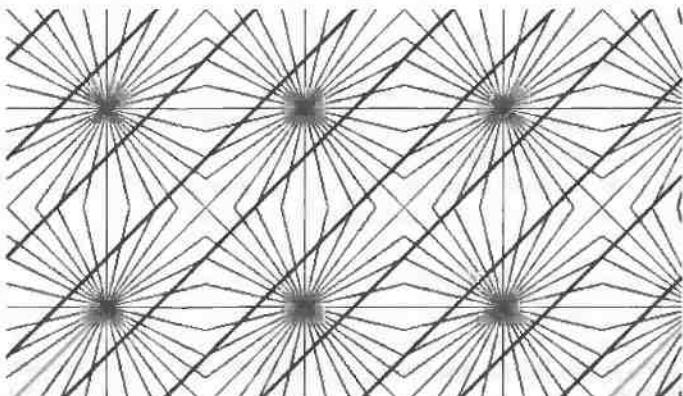


Рис. 5.13. Иллюзия Геринга: восприятие прямолинейности объектов

Этим свойством объясняется и аналогичное иллюзорное восприятие углов, под которыми сходятся прямые (рис. 5.14). Наблюдателю здесь кажется, что квадрат искривлен, хотя на самом деле все его углы — прямые.

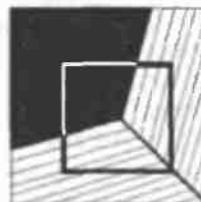
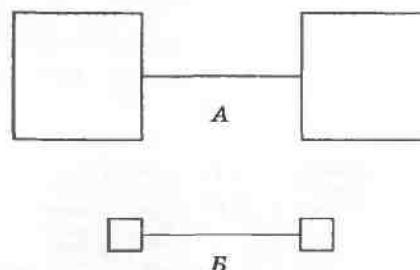


Рис. 5.14. Восприятие углов

В процессе синтеза компьютерных мультимедиаизображений необходимо обращать особое внимание на возможность проявления таких эффектов при наложении на неоднородный фон объектов, несущих смысловую нагрузку.

Рассмотрим теперь способы оценки человеком размеров объектов. На рис. 5.15 приведены две популярные геометрические иллюзии, которые, так же как и эффект виртуальных прямых, подтверждают тезис: *зрительная система человека при интерпретации изображения выбирает простейшую для объяснения гипотезу*.



Какая линия кажется длиннее — А или Б?

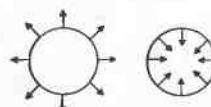


Рис. 5.15. Иллюзия Болдуина

Какая окружность имеет больший диаметр — справа или слева?

Этот тезис, высказанный в 1983 г. Ирвином Роком, объясняет многие оптические эксперименты и помогает установить причины принятия зрительных решений. Однако известен ряд экспериментальных фактов, который противоречит данному предположению.

Приведем несколько эвристических правил, которые были предложены для интерпретации изображений [22]. Эти правила нельзя считать строгими, ни одно из них не обеспечивает корректных интерпретаций во всех случаях (т. е. для каждого из них легко найти опровергающие примеры).

- Прямому краю на изображении часто соответствует прямой край в трехмерном пространстве.
- Ребрам, образующим стык на двумерном изображении, часто соответствуют края, образующие угол в пространстве.
- Похожие образы, лежащие вдоль кривой на изображении, часто соответствуют похожим объектам, расположенным вдоль кривой в пространстве.
- Симметричные области на изображении часто соответствуют симметричным объектам в пространстве.

Иллюзии интерпретации. Невозможные фигуры

Считается, что невозможные фигуры впервые были «изобретены» в 1950-х гг. Л. и Р. Пенроузами, а описание самого феномена «невозможной фигуры» было приведено в Британском психологическом журнале за 1958 г. Эти фигуры, наверное, представляют собой наиболее яркое выражение всех типов неоднозначных изображений. Действительно, их отличительная черта — не наличие неоднозначной трактовки, а просто невозможность существования (рис. 5.16).

Невозможные фигуры — это изображения объектов, которых нет и не может быть, но, тем не менее, они нарисованы! Существенно то, что отдельные части этих фигур вполне воспринимаемы, а



Рис. 5.16. Треугольник Пенроуза

причина парадокса — это невозможность интеграции этих частей (рис. 5.17).



Рис. 5.17. Невозможный объект Эшера

Иллюзии интерпретации геометрических искажений, в частности, касаются восприятия перспективы. Реальная глубина пространства в плоском изображении возникает при наличии перспективы размеров. Остальные признаки — заслонение, воздушная или тональная перспектива и т. д. — могут только усилить эту иллюзию, но не создать ее. Поэтому перспектива размеров (уменьшение размеров подобных объектов) — самое надежное средство создания в картине или рисунке сколь угодно глубокого иллюзорного картионного пространства.

При этом можно настроить свое сознание на то или иное восприятие. Совершенно плоское изображение без единого изобразительного признака перспективы (например, детский рисунок) можно представить пространственным, и наоборот, можно настроиться на плоское восприятие изображения с очевидными признаками линейной перспективы. Если же при этом линейная перспектива размеров

нарушена, то возникают иллюзии перспективы (рис. 5.18).

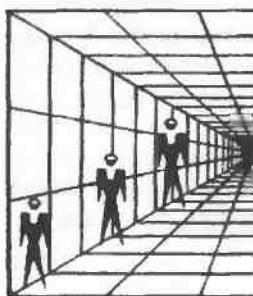


Рис. 5.18. Иллюзия перспективы. Какой человечек выше?

Если удастся настроиться на плоское восприятие, то черные человечки на рисунке будут одинаковыми по размеру. Но такое сознательное усилие действует недолго, оно непременно сменяется на противоположное. И тогда одинаковые человечки на плоском рисунке попадают в изобразительное пространство (уходящий вдаль коридор). В результате «далекие» человечки увеличиваются, а последний из них кажется самым большим. Это связано именно с *пространственным восприятием* рисунка.

Иллюзии движения. Эффект повозки

Почему, если смотреть на концентрические окружности или на спираль с небольшого расстояния, то создается впечатление «вращающегося пропеллера» (рис. 5.19, 5.20)? Этот эффект связан с явлением аккомодации. Дело в том, что напряжение аккомодирующей мышцы складывается из многочисленных, быстро следующих друг за другом сокращений множества волокон, поэтому хрусталик имеет колеблющуюся поверхность. В различные моменты оказываются более четко изображенными разные секторы окружности, и при их последовательной смене создается впечатление вращения этих секторов. Так как данный эффект зависит от напряжения аккомодирующей мышцы, то он сразу исчезает, если мышца расслабляется.

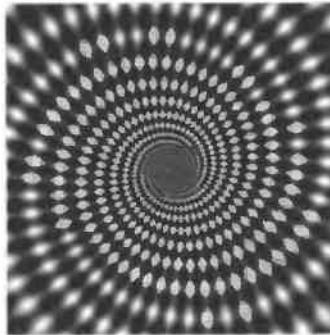


Рис. 5.19. Пульсирующая спираль

Добиться усиления эффекта вращения можно, если при рассмотрении рисунков немножко то приближать, то удалять книгу от глаз.

Эффект колеса повозки получил свое название от сцен погони известных вестернов, в которых фигурировали быстро движущиеся повозки. При просмотре таких фильмов часто создавалось впечатление, будто колеса вращаются в обратном направлении. Этот эффект можно наблюдать в кино при совпадении темпа снимаемого движения с частотой кадров, а также в реальной жизни при наблюдении за движущейся машиной с вращающимися колесами определенной формы.

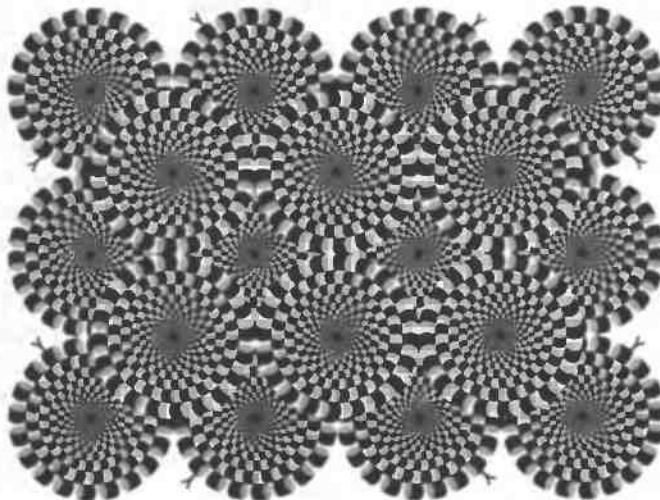


Рис. 5.20. Движущиеся круги

Эффект колеса повозки объясняется тем, что кажущиеся одинаковыми спицы колеса меняются местами, когда затвор камеры закрыт, и это затрудняет слежение за ними между кадрами. Аналогично происходит и в реальной жизни, когда скорость сканирования сетчатки глаза совпадает со скоростью вращения колеса.

При создании анимированных последовательностей для уменьшения эффекта колеса повозки можно добавить размытость движения либо изменить частоту кадров.

В заключение коснемся вопроса обнаружения слепого пятна у человека при помощи рисунка Мариотта (рис. 5.21). Эта методика определения наличия слепого пятна доступна любому человеку в обычных, домашних условиях. Исследование можно проводить в очках, если человек плохо видит, или без очков (это не важно — лишь бы он хорошо видел страницу книги).



Рис. 5.21. Определение слепого пятна по Мариотту

Чтобы обнаружить у себя наличие слепого пятна, закройте рукой правый глаз, не зажмуривая его (он должен оставаться открытым под ладонью). Левым глазом смотрите на правый крестик, который обведен кружочком, держа книгу перпендикулярно направлению взгляда. Не смешая взгляд с правого крестика, приближайте или отдаляйте книгу от лица и одновременно боковым зрением следите за левым крестиком, не переводя на него взгляд. В определенный момент он исчезнет. Значит, при данных масштабах рисунка ваше слепое пятно проявляет свое действие на этом расстоянии.

Мультимедийное резюме

- С одной стороны, при разработке мультимедиа-приложений нужно стремиться не допускать возникновения нежелательных оптических иллюзий.

С другой стороны, правильное использование визуальных эффектов, способных ввести в рассогласование зрительное и рациональное восприятие, может повысить «интенсивность» виртуальных ощущений, сделать сопровождаемую иллюзией информацию более запоминающейся. Этим пользуются художники направления *op-art*, а также дизайнеры, использующие иллюзии для усиления запоминания торгового знака или логотипа.

- В данной главе не только рассмотрены иллюзии, но и дана попытка частично объяснить причины их возникновения. Объяснен положительный и отрицательный феномен образа, обратимая перспектива как часть двойственных изображений.
- Важно понимать, что у разных пользователей могут возникать различные виртуальные представления от демонстрируемого изображения, — в частности, вследствие эффекта гистерезиса, иллюзий интерпретации или индивидуального дополнения образа (пример — виртуальные прямые).
- В мультимедиа-продукции часто (специально или непроизвольно) наблюдается использование эффектов латерального торможения, одновременного контраста, иррадиации.
- Рассмотрен способ нахождения слепого пятна, что может оказаться полезным при оценке видимости важных элементов управления проектируемых мультимедиа-интерфейсов.

Контрольные вопросы и задания



1. Что произойдет, если при наблюдении объемной картины на асфальте наблюдатель сделает шаг в сторону?
2. Какие иллюзии одновременно относятся к нескольким классификационным группам?
3. Объясните смысл стереоскопической двусмыслинности.
4. Благодаря чему происходит выделение границ объектов?
5. Можно ли наблюдать эффект Маха на изображении, состоящем не из черных квадратов на белом фоне, а из белых квадратов на черном фоне?
6. Как снизить эффект иррадиации?
7. Придумайте опровергающие примеры к приведенным в данной главе эвристическим правилам интерпретации изображений.

Глава 6

Стереозрение. Монокулярная оценка 3D-сцен

- Стереопара
- Бинокулярное стереозрение
- Глазной базис
- Конвергенция и дивергенция
- Угловой параллакс и порог глубинного зрения
- Виды стереооборудования
- Рациональное и зрительное восприятие
- Феномен картины и точки схода
- Главные монокулярные способы оценки глубины

Одной из главных особенностей человеческого зрения является *стереоскопическое восприятие* объектов окружающего пространства. Человек многими способами оценивает глубину пространства; в зависимости от расстояния до объекта, а также от используемых свойств человеческого зрения и мозга все эти способы условно подразделяются на *монокулярные* и *бинокулярные*.

Использование только монокулярных способов создания виртуальных изображений не дает возможности полностью «перенестись внутрь» созданного на экране мира. Создать эффект присутствия, полного погружения в виртуальную реальность можно, только обеспечив возможность полноценного восприятия.

По определению, *стереоскопическое зрение* (*стереопсис*) — это способность воспринимать глубину пространства и оценивать удаленность предмет-

тов от глаз. Экспериментальные результаты, описывающие стереовосприятие, впервые были получены в 1838 г. Ч. Уитстоном. Его работы объяснили механизм стереозрения, основанный на сравнении двух изображений объекта, проецируемых на сетчатку глаз. Уитстон сделал вывод, что ощущение глубины (т. е. возможность непосредственно увидеть, расположен объект дальше или ближе точки фиксации глаз) возникает, когда два изображения несколько смещены относительно друг друга на сетчатке в горизонтальном направлении — раздвинуты или, наоборот, сближены (если только это смещение не превышает примерно двадцати угловых минут, а вертикальное смещение при этом близко к нулю). Свое открытие Уитстон воплотил в жизнь, создав прообраз современных систем виртуальной реальности — *стереоскоп*. С помощью этого устройства зритель видел объемное изображение, складывающееся из двух почти одинаковых картинок — *стереопары* (рис. 6.1).

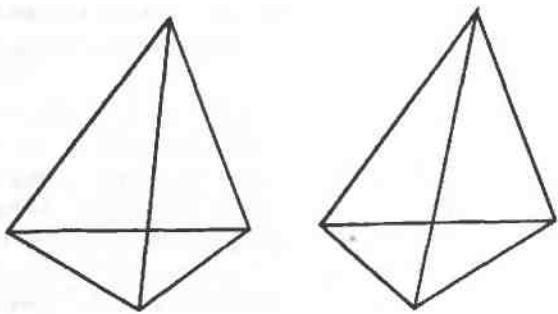


Рис. 6.1. Пример стереопары

Открытый еще в XIX в. принцип формирования стереоизображений успешно применяется и в современных мультимедиа-технологиях, например в стереочках и шлемах виртуальной реальности.

Стереозрение. Угловой параллакс

Участки окружающего мира или зрительные сцены, видимые обоими глазами, в физиологии называются зрительным полем, или полем зрения, а само такое зрение (двумя глазами одновременно) называют

бинокулярным [30]. Соответственно, зрение одним глазом (не важно — правым или левым) носит название монокулярного.

Доминирующую роль в глубинном зрении (восприятии глубины пространства) играет бинокулярное наблюдение одиночных предметов, а его определяющей характеристикой является *глазной базис* — расстояние между оптическими осями глаз, которое у разных людей колеблется в пределах от 55 до 73 мм (рис. 6.2а). Обычно глазной базис принимают равным 65 мм [32].

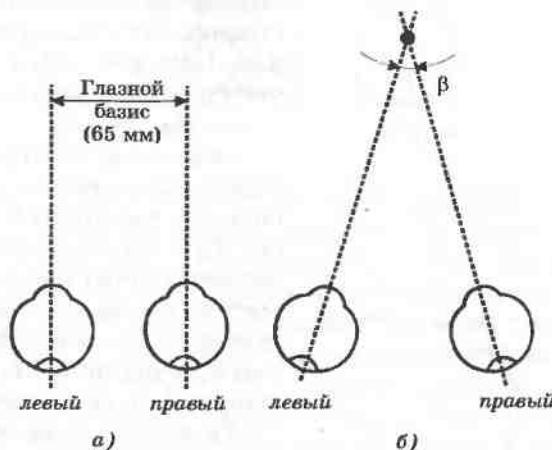


Рис. 6.2. Бинокулярное наблюдение одиночных предметов. Глазной базис

Бинокулярными способами оценки глубины являются специфические движения глаз: сведение (конвергенция) и разведение (дивергенция) зрительных осей. Конвергенция — это поворот зрительных осей внутрь при фиксации предметов, расположенных на конечном расстоянии. Конвергенция требуется при переводе взгляда с далекого объекта на более близкий (т. е. по мере приближения предмета к наблюдателю оптические оси сдвигаются, оставаясь скрещенными на наблюдавшемся предмете). Дивергенция, наоборот, соответствует переводу взгляда с близкого объекта на более далекий.

Угол β , под которым скрещиваются зрительные оси, называется углом конвергенции (рис. 6.2б). Точки с одинаковым углом конвергенции (нулевым расхождением) лежат на так называемой окружнос-

Определить состояние бинокулярного зрения можно с помощью пробы Геринга: испытуемому предлагается зрительно установить, спереди или сзади от натянутой нити падает шарик

ти Виета–Мюллера, которая проходит через наблюдаемые точки и передние полюсы глазных яблок. Точки, лежащие внутри этой окружности, имеют положительное расхождение (больший угол конвергенции), а точки, лежащие снаружи, — отрицательное (меньший угол). Это свойство позволяет упорядочить по глубине объекты, расположенные вблизи точки, на которой фиксируются глаза.

За наименьшую удаленность объекта, при которой конвергенция отсутствует, а зрительные оси глаз считаются параллельными, принимается расстояние до 6–10 метров. Другими словами, это расстояние является практическим порогом стереозрения. Начиная с него человеческое зрение переключается на монокулярные способы оценки глубины сцены (см. далее).

Более точные исследования показали, что конвергенция не вполне исключена и при значительно больших расстояниях. Конвергенция наступает через 0,16 – 0,20 с после начала осмотра сцены, начинается сразу с максимальной равномерной скоростью, которая остается постоянной около 200 мс, и затухает по экспоненте после фиксации наблюданной точки. Конвергенция совершается автоматически, непроизвольно, независимо от желания человека.

Различия в изображениях, даваемых правым и левым глазами, называются *бинокулярной диспаранностью*. Слияние изображений на сетчатках обоих глаз в единый зрительный образ называют *фузией*.

При наблюдении разноудаленных объектов M и Q углы (параллактические) конвергенции β_1 и β_2 для каждого предмета различны (рис. 6.3). Разность параллактических углов $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$, называемая *угловым параллаксом*, определяет восприятие глубинного расположения предметов.

Минимальный угловой параллакс, которому соответствует минимально различимое восприятие глубины, называется *порогом глубинного зрения*. Среднее его значение 10–20 угловых секунд. Острота глубинного, или стереоскопического, зрения определяется как величина, обратная порогу глубинного зрения.

В воздушной разведке известно, что объекты, закамуфлированные сложным фоном, очень трудно обнаружить, но они выделяются при стереоскопическом наблюдении

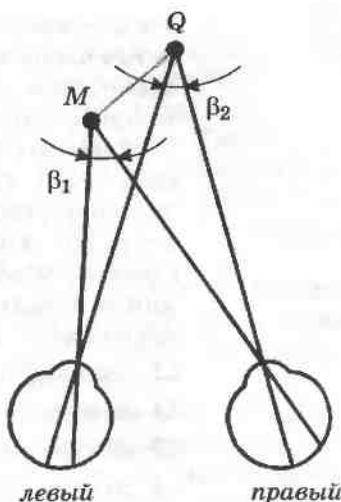


Рис. 6.3. К определению порога глубинного зрения

Наличие углового параллакса приводит к тому, что отрезок MQ имеет различные по длине проекции на сетчатки левого и правого глаза. Если глаза сконвергированы на точку Q , то ее проекции в левом и правом глазах будут расположены на равноудаленных (по величине и направлению) точках сетчаток от центральных углублений. Точка M же при этом будет проецироваться на различно удаленные от центральных углублений (и от проекций точки Q) участки на сетчатках левого и правого глаз, что и обуславливает явление бинокулярной диспарантиности.

Из краткого анализа особенностей восприятия объема зрительной системой следует, что для реализации стереоскопической мультимедиа-системы необходимо передавать пользователю два изображения (для правого и левого глаз), получаемые путем съемки сцены двумя виртуальными камерами с базисом не менее 65 мм.

Стереооборудование мультимедиа

Рассмотрим возможные способы воспроизведения заранее подготовленных стереоизображений. Все описанное ниже стереооборудование разбивается на

две основные группы. Это прежде всего *стереоочки* (в том числе встраиваемые в шлемы виртуальной реальности) и *стереоэкраны*, находящиеся на достаточно большом расстоянии от зрителя.

Стереоочки — это очки для разделенного (сепарированного) наблюдения изображений стереопары. Левый и правый светофильтры таких очков отличаются по своим оптическим характеристикам настолько, чтобы каждый глаз наблюдателя воспринимал только одно предназначеннное для него изображение. К стереоочкам относят:

- аналигические («красно-синие») очки;
- затворные жидкокристаллические очки;
- поляризационные стереоочки;
- призматические стереоочки.

Рассмотрим сначала *анаглифический метод* — один из старейших и самых простых в реализации, предложенный Д'Альмейда и Дюко дю Ороном в 1858 г. и впервые реализованный в кино Луи Люмьером в 1935 г. Этот метод воспроизведения стереоизображений основан на свойствах светофильтров пропускать лучи одного и задерживать лучи другого цвета и заключается в представлении двух изображений стереопары, каждое из которых окрашено в цвет, независимый по отношению к другому. Как правило, одно изображение — красное, а другое — сине-зеленое (*aqua*). При наблюдении стереопары через аналигические стереоочки каждый глаз воспринимает только одно изображение. Формируемое при этом изображение воспринимается как монохромное, но полное ощущение от восприятия изображения получается полноцветным благодаря слиянию разделенных цветовых образов в мозге в единое трехцветное пространственное изображение.

Метод аналигического разделения (сепарации) изображений с успехом можно использовать на обычном компьютере без наличия специального оборудования. Это достигается благодаря точному разложению цветного изображения стереопары на три монохромные составляющие *RGB*. В изображении левого ракурса оставляется только красная составляющая, а в изображении правого ракурса —

При подготовке анаглифических стереоизображений наиболее достоверно воспроизводятся зеленые, золотистые и серебристые тона, а также палитра цветов CMYK — черный, голубой, лиловый и желтый

две составляющие (синяя и зеленая). Эта операция легко производится в большинстве широко распространенных программ растровой обработки изображений, так же как и последующее «склеивание» трех слоев в единый кадр. Такое изображение будет иметь своеобразный «дихроичный кант», который проявляется на линиях рисунка объекта, где наблюдается пограничный световой контраст между элементами изображения.

При натурных съемках для стереопроекции по анаглифическому методу могут окрашиваться пучки проекционных лучей, например, при помощи цветных светофильтров.

Существует два способа воспроизведения анаглифического стереоизображения. В первом из них (*аддитивный способ*) оба изображения проецируются раздельно, и каждый глаз видит изображение только того цвета, что и соответствующий светофильтр в очках. Во втором случае (*субтрактивный способ*) два окрашенных в разные цвета и наложенных друг на друга изображения стереопары демонстрируются одним проектором (для получения такой стереопары можно использовать, например, два слоя одной цветной пленки). Тогда каждый глаз воспринимает изображение, окращенное в цвет другого светофильтра.

Простота подготовки и непосредственной работы со стереоизображениями обрачиваются и существенными недостатками. Как уже упоминалось, после обработки происходит нарушение цветовой палитры исходного рисунка и его искажение — контуры предметов становятся смазанными [47].

Кроме того, существуют значительные ограничения в подборе цветов объекта. В первую очередь, необходимо избегать чистого спектрального красного или синего цветов, в противном случае будет наблюдаться эффект «слепоты» на одном глазу [48].

Эти недостатки являются серьезным препятствием на пути распространения анаглифического метода, поэтому он применяется, как правило, лишь в образовательных целях и «бюджетных» стереокинотеатрах, а в шлемах виртуальной реальности используются другие методы, рассмотренные далее.

В очках поляризационного типа устанавливаются анализаторы — поляризационные светофильтры, по типу и ориентации соответствующие светофильтрам — поляризаторам, установленным на пути световых пучков, проецирующих левое и правое изображения стереопары. Поэтому, например, левое изображение, получившее, скажем, горизонтальную поляризацию при его проецировании, будет видно только левому глазу с горизонтальным поляризационным фильтром, но не правому, закрытому фильтром с вертикальной поляризацией.

На первых этапах развития поляризационного метода стереопроекции использовалась только линейная поляризация (плоскости поляризации взаимно перпендикулярны, при этом каждая из них находится под углом 45° к горизонту, — так называемая «V-ориентация»). Однако по мере развития этих технологий все большее распространение получают поляризационные светофильтры с циркулярной (круговой) поляризацией.

Очки, построенные *по затворному принципу*, имеют перед каждым глазом затворную жидкокристаллическую линзу и предназначены для наблюдения компьютерных стереоизображений, предъявляемых в виде поочередно сменяющих друг друга левого и правого изображений стереопар. При этом левая линза «закрывается» (затемняется), когда на экране появляется изображение для правого глаза, и наоборот. Как уже говорилось в предыдущей главе, когда частота смены изображения для левого и правого глаз превышает 50–60 Гц, человеческий мозг воспринимает изображение как объемную непрерывную картину.

Каждый из двух коммутационных элементов затворных очков представляет собой модулятор света, содержащий слой жидких кристаллов, расположенных между двумя поляроидами с взаимно перпендикулярной (либо параллельной) ориентацией плоскостей поляризации. Слой жидких кристаллов при подаче на него электрического напряжения поворачивает на 90° плоскость поляризации света, прошедшего через первый поляроид. В результате

Эклипсный метод стереопроекции основан на разделении изображений стереопары путем попеременного перекрытия левого и правого световых потоков перед объективами проекционного устройства и перед глазами зрителя

ЖК-элемент с взаимно перпендикулярной ориентацией плоскостей поляризации поляроидов пропускает свет, а в случае их параллельной ориентации свет полностью гасится. Световые потоки для левого и правого глаз перекрываются поочередно, синхронно с поочередным предъявлением левого и правого изображений.

При стереопроекции на обычный экран аналогичные светофильтры, установленные перед левым и правым объективами стереопроектора, перекрывают световые потоки синхронно с переключением светофильтров в стереоочках. Управление затворными очками может осуществляться по кабелю или беспроводным (чаще всего по инфракрасному каналу) способом [49].

Призматические стереоочки — это специальные очки для наблюдения спроектированных на экран несовмещенных изображений стереопары. В таких очках установлены две клиновидные призмы, направляющие зрительные оси глаз в центры соответствующих изображений. Призматические стереоочки изготавливаются для конкретных условий наблюдения, зависящих от взаимного расположения и размеров изображений стереопары, а также от расстояния между наблюдателем и экраном. Такие очки можно использовать, при необходимости, для просмотра отнятого материала на киноустановках, не оснащенных профессиональной стереопроекционной техникой.

Безочковая стереопроекция — виды стереопроекции, отличительной особенностью которых является отсутствие необходимости использования каких-либо наглазных устройств для разделения изображений стереопары. Их сепарация осуществляется благодаря свойствам специального растрового экрана. Если такой экран осветить направленным пучком света, то отраженный от него свет формируется в виде фокальных зон, и если при проекции изображения на такой экран глаз зрителя находится в фокальной зоне, то этим глазом зритель увидит предназначеннное ему изображение. При стереопроекции фо-

Существуют панорамные кинотеатры с цилиндрическим киноэкраном, угол обзора которого может быть 180° , 240° и 360°

кальные зоны образуются попарно, для левого и правого глаз, а зрительские места размещают так, чтобы глаза каждого сидящего зрителя находились в соответствующих фокальных зонах. Поэтому каждый глаз может видеть только одно, предназначенное для него, изображение стереопары.

Различные конструкции стереоочков встраиваются в *шлемы виртуальной реальности*. При этом различают простую комбинацию стереоочков и наушников и более сложный класс устройств, имеющий название «*хэд-сет-монитор*» (*Head Set Monitor*). «Хэд-сет» — это обычно более дорогое и более совершенное устройство, снабженное прибором для отслеживания движений головы пользователя. Такой прибор, называемый *хэд-трекером*, позволяет синхронизировать обзор виртуальной сцены с изменяющимся положением головы пользователя.

Комбинацию стереоэффектов с динамическими платформами и вибрационными креслами называют «четвертым измерением», а подобным образом оборудованные стереокинотеатры — «четырехмерными» (*4D Theater*). В 4D-кинотеатрах, как правило, демонстрируют различную мультимедийную продукцию, например компьютерную анимацию, максимально приближенную к реальности.

В заключение остановимся на *голографии* (от греческого *holos* — «весь», «полный» и *grapho* — «пишу», «черчу», «рисую»). Это наука, занимающаяся изучением голографических процессов и позволяющая создавать полностью объемные картины.

В основе голографии лежит способ записи световых волн, несущих информацию об объекте, без преломляющих оптических приборов. Для записи используется когерентный свет, получаемый с помощью лазера и создающий неподвижную интерференционную картину в большом объеме пространства [50]. В процессе записи на каждую точку фотопластинки воздействуют две волны когерентного света: непосредственно воздействующая опорная волна в виде рассеянного пучка света, излучаемого

лазером, и объектная волна, представляющая собой когерентный свет того же лазера, отраженный от объекта.

При воспроизведении фотоснимок освещается аналогичным по характеристикам опорной волне пучком когерентного света либо даже обычным светом (гологramмы по методу Денисюка), и в пространстве на таком же расстоянии от голограммы, на котором при записи находился объект, формируется объемное изображение объекта, в точности соответствующее оригиналу. Если наблюдатель при рассматривании голограммы смецает голову из стороны в сторону, то возникает эффект осматривания. Благодаря этому явлению объемность такого изображения может быть воспринята на основе только монокулярного стереоэффекта, т. е. объемность изображения на голограмме могут ощущать люди, и не обладающие стереоскопическим зрением.

Изобразительные признаки перспективы. Точки схода

Далее речь пойдет об изобразительных способах, позволяющих добиться объемности восприятия плоского изображения, не прибегая при этом к специальному оборудованию.

Изображения часто являются двумерными проекциями трехмерных сцен. Знакомство с живописью или кино показывает, что двумерное изображение способно вызывать ощущение восприятия трехмерного пространства. Известно много приемов, позволяющих обеспечить трехмерную интерпретацию двумерного изображения.

В изобразительных искусствах различают два разных пространства. Первое — *реальное (объективное)* пространство нашего существования, где физический размер объекта не зависит от его удаленности (например, рельсы не сходятся). Это как бы «взгляд сбоку» на расположение объектов перед глазами зрителя [46]. Второе пространство — *визуально воспринимаемое (субъективное)*. В нем видимый размер объекта зависит от расстояния (рельсы — сходятся).

Ранее отмечалось, что бинокулярное зрение работает только на близких расстояниях. Однако большинство мультимедиа-изображений мы также рассматриваем с близкого расстояния. Поэтому, благодаря бинокулярному зрению, мы однозначно воспринимаем изображение или рисунок как реальный плоский предмет на определенном расстоянии от глаза. И здесь в конфликт вступают два восприятия: *зрительное и рациональное*. Зрительное восприятие отличается тем, что оно лишено логики. Для него нет узнаваемых объектов на картине, все они — только геометрические фигуры и цветовые пятна на плоскости. Рациональное же восприятие, наоборот, основано исключительно на логике, оно видит в геометрических фигурах и цветовых пятнах только узнаваемые объекты и их возможное расположение в воображаемом пространстве картины.

Конечно же, такое деление восприятия на две составляющие достаточно условно, — ведь и то, и другое существуют одновременно и влияют друг на друга. И все же это деление полезно, поскольку отражает двойственность восприятия плоского изображения. Можно предложить и другие классификации восприятия: плоскостное и пространственное, неосознанное и сознательное, композиционное и конструктивное.

Особенно трудно анализировать зрительное восприятие. Оно — первичное, художники называют его обобщенным, или беспредметным. (Отметим, что зрительное восприятие часто может ошибаться, что уже рассмотрено в главе 5, посвященной зрителям иллюзиям).

Каждое из двух восприятий дает свое видение плоского изображения: как двумерного или как трехмерного. В случае плоского изображения конфликт двух восприятий приводит к тому, что мы ощущаем оба этих варианта одновременно. Из-за этого возникает явление, которое психологи называют *феноменом картины*. «Картины — уникальный класс предметов, потому что они одновременно видны и сами по себе, и как нечто совсем иное, чем просто лист бумаги, на котором они нарисованы. Картины парадоксальны. Никакой объект не может находиться в двух местах одновременно, никакой

объект не может быть одновременно двумерным и трехмерным. А картины мы видим именно так. Картина имеет совершенно определенный размер, и в то же время она показывает истинную величину человеческого лица, здания или корабля. Картины — невозможный объект», — утверждает психолог Ричард Грегори.

Линейная перспектива хорошо передает перспективу размеров, но полностью игнорирует поправки головного мозга, в том числе константность восприятия величины. Об этом можно судить, например, по фотографиям. Очень близкие предметы на них не уменьшены, хотя для них должен был бы действовать эффект обратной перспективы (см. ниже).

В реальном пространстве мозг исправляет размеры объектов в зависимости от их удаления. Например, если объект в пространстве удаляется от глаза или приближается к нему, то его угловой размер соответствующим образом уменьшается или увеличивается, но визуально воспринимаемый размер изменяется не в такой степени, как угловой.

При наличии изобразительных признаков перспективы на картине зритель достаточно точно может определить удаленность объектов изображения в кажущемся пространстве. Но тогда по этой удаленности и угловому размеру он в состоянии определить и относительную величину того или иного объекта в картинах пространстве.

При перспективной проекции происходит интересное искажение направления параллельных прямых. Два хорошо известных явления используются художниками на протяжении столетий. Во-первых, трехмерная прямая, наклоненная к оптической оси, будет казаться исчезающей в некоторой точке двумерного изображения (эта точка называется *точкой схода*). Во-вторых, пучок параллельных прямых имеет общую точку схода. А точки схода различных пучков прямых, параллельных одной и той же плоскости, лежат на линии горизонта.

Скульптор или художник держит карандаш на вытянутой руке и большим пальцем отмеряет размеры удаленных натуральных объектов для сопоставления пропорций передаваемых на эскиз образов объектов

Монокулярные способы оценки глубины 3D-сцен

Близкие области пространства воспринимаются в обратной перспективе. Если рассматривать длинный и узкий стол или рельсы с близкого расстояния, то параллельные линии не сходятся в глубину, а, наоборот, расходятся

Благодаря бинокулярным признакам мы воспринимаем предметы в трехмерном пространстве объемными. Но бинокулярные признаки глубины применимы лишь на близких расстояниях (выше уже приводилась оценка в 6 метров), в то время как монокулярные работают и на больших расстояниях.

Линейная перспектива возникает в изображении при наличии следующих изобразительных признаков: уменьшение размеров объектов по мере их удаления (перспектива размеров), сходящиеся линии, перекрытие объектов друг другом, перспектива теней и воздушная перспектива — уменьшение четкости и цвета удаленных объектов из-за воздушной дымки.

Монокулярные способы оценки глубины сцены наиболее просты и часто основаны на накопленном человеком жизненном опыте. Из наиболее характерных монокулярных способов выделим следующие.

1. *Оценка расстояния до предмета на основе знаний о его приблизительной величине.* Наиболее естественный способ решения задачи — сравнение. Узнаваемый объект — фигура человека, дом, дерево и т. д. — сравнивается со своим физическим размером, известным из визуального опыта. Таким способом достаточно точно определяется удаленность. Разумеется, эта оценка осуществляется подсознательно на основании опыта существования человека в трехмерном пространстве.

2. *Наложение предметов друг на друга.* Промежуточное расположение — дальностный признак, который формируется, когда один объект закрывает другой перед наблюдателем. Этот признак означает, что закрывающий объект расположен к наблюдателю ближе закрываемого объекта. Промежуточное расположение и размер распознаваемых объектов или поверхностей могут использоваться для вычисления относительной глубины и расстояния до этих объектов [22].

3. *Определение глубины пространства с использованием «эффекта перспективы»* — визуального

сближения параллельных линий, уходящих вдаль. Обратно пропорциональная зависимость дальности объекта и размеров его образа на изображении дает признак *перспективного масштабирования*. Термин «масштабирование» используется здесь для сравнения размеров объектов, которые заданы в плоскости, параллельной плоскости изображения.

Подсознательное уменьшение слишком близких объектов (рука у глаза) и увеличение удаленных называется *константностью восприятия размера*. На близких расстояниях это может быть полная константность, когда видимый размер знакомого объекта не изменяется, даже если тот движется и, соответственно, меняется его угловой размер. Знакомые объекты в этом интервале воспринимаются в их действительном размере, и только достаточно далекие объекты мы воспринимаем объективно уменьшенными.

4. Анализ контуров и конструкции предмета при его повороте под любым углом для выявления трехмерной структуры. Люди способны оценивать форму трехмерных объектов по контурам образов этих объектов на двумерном изображении. Например, в качестве трехмерной интерпретации видимого на изображении эллипса человек легко назовет диск или сферу.

Эффект ракурса на изображении объекта возникает при наблюдении этого объекта под острым углом к его оси симметрии. Ракурс является еще одним существенным признаком, связывающим двумерный образ со структурой трехмерного объекта.

5. Анализ тональной перспективы и световых эффектов на предмете (теней, бликов и т.п.). Тональная, или цветовая, перспектива — это восприятие некоторых цветов тяжелыми и близкими, а других — легкими и далекими. Благодаря этой перспективе темную фигуру на светлом фоне мы зрительно воспринимаем выступающей, а светлую на темном — удаленной [51]. При этом выступающая фигура уменьшается (см. выше про эффект иррадиации).

На изображениях сцен, содержащих гладкие объекты (например, яблоко), на образах этих объек-

Эффект ракурса: *образы вертикальных досок забора располагаются плотнее по мере удаления от наблюдателя. Этот эффект почти не ощущался бы при направлении наблюдения, перпендикулярном плоскости ограды*

Выступающая фигура на изображении не увеличивается, а уменьшается. Она всегда зрительно меньше фона, который она за-слоняет

тов часто изображаются блики. Они располагаются в окрестности точек поверхности, в которых луч, падающий от источника света, и луч, отраженный по направлению к наблюдателю, образуют равные углы с нормалью к поверхности объекта. Поверхностные элементы гладких объектов становятся все более темными по мере увеличения угла между направлением освещения и нормалью к поверхности. Плоские поверхности на изображении обычно выглядят однородными. Интенсивность их образов на изображении пропорциональна углу между нормалью к плоскости и направлением освещения.

Когда мы идем по улице, образы боковых объектов, мимо которых мы проходим (скамейки, дверные проемы и т. п.), движутся попрек сетчатки намного быстрее, чем образы таких же объектов, расположенных в нескольких десятках метров впереди

6. *Параллактическое смещение* — оценка кажущегося относительного смещения близких и далеких предметов при вращении головы наблюдателя из стороны в сторону (например, появление боковых, ранее невидимых граней предмета при смещении точки зрения в сторону). Параллактическое смещение дает движущемуся наблюдателю информацию о глубине объектов (даже для неподвижных объектов, так как они кажутся движущимися относительно друг друга). Образы более близких объектов движутся быстрее, чем образы более далеких.

7. *Ориентация и плотность текстуры*. Элементы текстуры подвергаются масштабированию и ракурсу, и результирующие изменения текстуры дают наблюдателю информацию о расстоянии и ориентации текстурированной поверхности. Этот эффект легко заметить, если посмотреть на кирпичное здание, мозаичный пол или железнодорожные пути, на кукурузное поле или на толщу на стадионе. По направлению от наблюдателя образы точек сдвигаются все ближе друг к другу, что соответствует увеличению воспринимаемой глубины соответствующих пространственных объектов.

Текстурным градиентом называется изменение текстуры на изображении (измеряемое или воспринимаемое человеком) вдоль некоторого направления на изображении. Этот признак часто соответствует изменению глубины или ориентации направления трехмерных поверхностей, соответствующих данной текстуре на изображении. Этот прием часто ис-

Пример текстурного градиента: изображение кукурузного поля содержит несколько текстур (растения и целые грядки растений). При удалении от наблюдателя текстуры становятся более плотными, так как на каждый участок изображения попадает все больше образов листьев кукурузы

пользуется художниками для создания иллюзии трехмерных поверхностей на плоском холсте.

8. Оценка глубины резкости сцены. Используемый прием напоминает действие человеческого глаза. Для фокусирования на целевой объект мускулы глаза изменяют форму хрусталика, т. е. его фокусное расстояние. Выполняя фокусировку на объект или на его края, можно оценить удаленность этого объекта.

Трехмерную анимацию часто критикуют за слишком четкий, «рисованный» вид. Для устранения указанного недостатка обычно рекомендуется ввести больше детализированных текстур, улучшить освещение, смягчить тени и т. п. Однако главный способ придания оптической глубины за счет смягчения резкости граней удаленных объектов — это использование глубины резкости [54]. Планирование съемки с учетом глубины резкости означает правильную расстановку источников света, объектов съемки и камер, настройку их фокусных расстояний.

Глубина резкости способна существенно изменить внешний вид создаваемого изображения или кадра. Она позволяет привлечь внимание зрителей к конкретным объектам съемки, для чего достаточно изменить фокус. Большая глубина резкости, нередко называемая «глубоким фокусом», делает практически весь кадр четким и резким, тогда как маленькая глубина резкости («мелкий фокус») оставляет резким лишь небольшой участок изображения, размывая все, что расположено впереди и позади объекта съемки, находящегося в фокусе.

Глубина резкости часто используется в анимации, в частности с целью сосредоточить внимание на удаленном объекте — например, на смоделированном мелком насекомом. Однако возможны и такие ситуации, когда глубина резкости не требуется. Так, при съемке пейзажей, групповых планов или вида «с высоты птичьего полета» вся сцена должна быть в фокусе.



Мультимедийное резюме

- Эффекты создания ощущения глубины, возникающего в виртуальных пространствах, могут основываться на всех бинокулярных и монокулярных способах, описанных в этой главе и технически доступных разработчику.
- Стереоскопическое зрение возникает за счет *бинокулярной диспарантиности* — различия изображений, проецируемых на сетчатку левого и правого глаз. Добиться этого эффекта в виртуальной среде можно, проецируя различные изображения (части *стереопары*) отдельно на каждый глаз. Горизонтальный сдвиг изображений в стереопаре задается не меньше *глазного базиса*, среднее значение которого равно 65 мм.
- Практический порог стереозрения определяется равным в 6–10 метров. Глубину всех объектов, находящихся дальше от наблюдателя, человеческий мозг оценивает уже с помощью монокулярных методов.
- При оценивании расстояния до двух различных предметов в пределах расстояния стереозрения дистанция между ними (*угловой параллакс*) должна быть не меньше 10–20 угловых секунд.
- Добиться стереоэффекта можно при помощи мультимедиа-оборудования — стереоочков различных типов или безочкиевой проекции на стереоэкран. Отдельные типы стереоочков применяются в составе шлемов виртуальной реальности. Также возможно использование hologрафических эффектов, тем более что объемность изображения на голограмме могут ощущать люди, не обладающие стереоскопическим зрением.
- Достичь ощущения объемности восприятия плоского изображения можно различными изобразительными методами, одновременно воздействуя на рациональное и зрительное восприятие эффектом линейной перспективы, — например, используя точки схода перспективной проекции.
- Монокулярные способы оценки глубины сцены основаны на накопленном человеком жизненном

опыте. В этой главе выделены следующие способы:

- оценка расстояния до предмета на основе знаний о его приблизительной величине;
- наложение предметов друг на друга;
- определение глубины пространства с использованием эффекта перспективы;
- анализ контуров и конструкции предмета;
- анализ тональной перспективы и световых эффектов на предмете;
- параллактическое смещение;
- ориентация и плотность текстуры;
- оценка глубины резкости.

Однако здесь были рассмотрены далеко не все известные дальностные признаки, которые могут встретиться на отдельных двумерных изображениях. Например, как уже говорилось в главе 4 о восприятии цвета, цвет удаленных объектов может казаться более синим, чем цвет таких же близких объектов. Кроме того, образы далеких объектов могут терять резкость из-за рассеивающих явлений в атмосфере между объектами и наблюдателем. Наконец, в данной главе не учитывается целый ряд допущений о реальном пространстве, — например, не предполагается наличие опорной плоскости (земной поверхности) или силы тяжести, выделяющей особое вертикальное направление, хотя это — существенные характеристики среды, в которой формировалась зрительная система человека.

- Еще раз подчеркнем, что реалистичность созданного виртуального пространства зависит от тщательности тестирования разработчиками появления у пользователя ощущения трехмерности плоских изображений, выводимых на экран. Кроме того, нельзя забывать, что в комплексных системах виртуальной реальности зрительное восприятие должно соответствовать осязательному, которое дает более точную информацию об окружающих предметах.



Контрольные вопросы и задания

1. Какое расстояние считается практическим порогом для стереозрения?
2. Какой минимальный базис должен быть у виртуальных стереокамер?
3. Приведите примеры недостатков анагlyphического метода.
4. Какое устройство кроме стереоочков и наушников входит в состав высококачественных шлемов виртуальной реальности?
5. Опишите феномен картины.
6. Могут ли точки схода пучков параллельных в одной плоскости прямых лежать не на линии горизонта? Какой при этом проявится визуальный эффект?
7. Приведите пример константности восприятия размеров объектов.

Глава

7

Композиция 3D-сцен. Освещение

- Конструкция и композиция изображения
- Феномен «левого» и «правого» на сцене
- Размещение и уравновешивание объектов
- Правило кадрирования
- Принципы гештальта
- Проблема общего освещения
- Свойства источников света
- Мягкие и резкие источники света
- Варианты затухания света

Когда трехмерная сцена тщательно скомпонована, хорошо освещена и визуализирована, технологии, применявшиеся для создания финального изображения, уже не привлекают к себе внимания пользователя. При просмотре высококачественно визуализированного изображения факт, что оно было сформировано на компьютере, как правило, не сразу приходит на ум зрителю.

По мере развития видеопроизводства и технологий мультимедиа специалисты стали в большей степени опираться на принципы, столетиями существовавшие в живописи и графике. Многие недостатки ранних компьютерных игр или видеофильмов объясняются тем, что их создатели не имели надлежащей подготовки в других формах изобразительных искусств.

Специалисту, занимающемуся трехмерной графикой, следует знать принципы композиции, освещения и затемнения создаваемых 3D-сцен.

Регулярно обедая в рыбных ресторанах, можно извлечь следующий урок: если рыбное блюдо пахнет рыбой, значит, рыба — некачественная.

Аналогичный принцип применим и в мультимедиа: если созданная работа похожа на компьютерную графику, значит, это — некачественная компьютерная графика

В данной главе, продолжая предыдущие темы о зрительных иллюзиях и восприятии глубины, мы рассмотрим ряд основных принципов, в основном изложенных в работах [11, 46, 54].

Существует два различных подхода к организации пространства трехмерной сцены. Расположение объектов в виртуальном пространстве, которое можно логически воссоздать по изображению на экране, — это *конструкция изображения*, анализируемая, как говорилось в предыдущей главе, рациональным восприятием. Таким способом можно, например, получить рациональное представление о глубине расположения объектов сцены. Расположение же объектов на плоскости изображения как абстрактных фигур, линий, тональных и цветовых областей — это *композиция*, обусловленная зрительным восприятием.

Для композиционного восприятия не имеет значения, что одна фигура заслоняет другую или что параллельные линии сходятся. Это восприятие называется *беспредметным*, или *обобщенным, видением*.

Виртуальное пространство возникает в результате конструктивного восприятия, а экранное пространство — в результате композиционного. Оба восприятия, соединяясь вместе в феномене картины, дают пространство изображения.

Неоднородность изобразительной плоскости

Все, что находится в визуализируемой сцене, имеет свой *графический вес* (*graphic weight*). Под графическим весом участка сцены или объекта подразумевается степень его заметности для наблюдателя или преобладания в композиции. Яркие или отчетливо окрашенные элементы, контрастирующие с окружающей их сценой, имеют самый большой графический вес. Крупные элементы имеют больший графический вес, чем мелкие. То же самое относится и к участкам изображения вблизи его краев.

Для определения находящихся на сцене объектов, имеющих наибольший графический вес, достаточно бросить быстрый взгляд на всю визуализированную сцену в целом и идентифицировать те ее участки, где сосредоточивается основное внимание. Для достижения уравновешенности композиции следует тщательным образом отследить размещение таких объектов на изображении.

Такая необходимость связана с рядом причин. Прежде всего изобразительная плоскость неоднородна по своей глубине. Маленький кружок в центре воспринимается более удаленным, чем он же — вблизи рамки (рис. 7.1).

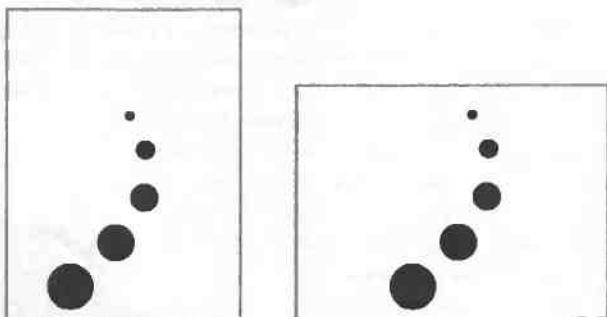


Рис. 7.1. Неоднородность зрительной плоскости по глубине

Неоднородны также верх и низ изобразительной плоскости. Круг в верхней ее части — неустойчив, «стремится упасть вниз». А круг в нижней части неподвижен и свободно «парит в пространстве», — точнее, покоятся на воображаемой плоскости «пола» (рис. 7.2).

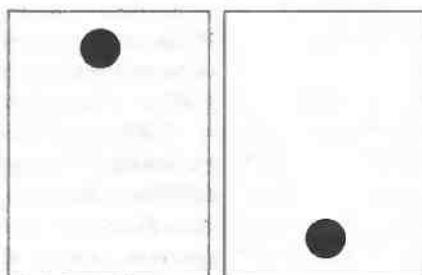


Рис. 7.2. Неоднородность зрительной плоскости по вертикали

Очевидно, что это связано с привычным восприятием нами сил гравитации, которые действуют не

Если перевернуть вверх ногами фотографию морского пейзажа, то небо внизу начнет казаться синим, а море вверху — голубым

только в реальном пространстве, но и виртуально на изобразительной плоскости. Поэтому композиция с тяжелой цветовой или яркостной массой в верхней части «неустойчива»: возникает ощущение, что эта масса движется вниз или даже опрокидывается.

Вследствие накопленного человеком опыта объекты в верхней части изобразительной плоскости чаще всего воспринимаются как дальний план, а в нижней — как передний.

Еще одним важным феноменом восприятия изобразительной плоскости является неоднородность ее левой и правой частей. Например, восходящую диагональ на левом рисунке большинство наблюдателей воспринимает как подъем, а нисходящую на правом — как спуск. Глаз «передвигает» машину на диагонали слева направо: на первом рисунке машина поднимается в гору, а на втором — спускается вниз (рис. 7.3).

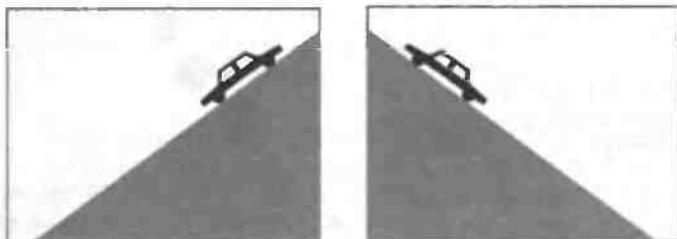


Рис. 7.3. Неоднородность зрительной плоскости по горизонтали

Многие картины не только теряют равновесие левой и правой частей в зеркальном отражении, но и меняют свой смысл. До сих пор ведутся споры о том, как рассматривать офорты Дюрера или Рембрандта, учитывали ли художники их зеркальное обращение при переносе на бумагу и какая композиция — «настоящая».

Первым объяснением этого феномена было аналогичное принятому в Европе направлению чтения текста «чтение» картины слева направо. В настоящее время причину находят в различиях принципов работы левого и правого полушарий человеческого мозга. Но какова бы ни была причина этого явления, такая неоднородность существует, и она настолько однозначна, что специалист по компьютер-

ной графике или художник обязательно должен ее учитывать.

Постановочные решения. Мизансцены

Постановка играет важную роль на протяжении всей работы над мультимедиа-проектом в цифровой среде. При этом под *постановкой* подразумевают расстановку цифровых актеров, расположение объектов сцены (реквизита) и окружающей их обстановки относительно виртуальной камеры. Такое пространственное оформление сцены подчеркивает важность используемого в ней визуального материала. Постановка столь же важна для подготовки к визуализации, как и сама визуализация. С постановкой неразрывно связана композиция.

Умение правильно помещать одушевленные персонажи в окружающую их обстановку — это первый шаг к тому, чтобы научиться правильно снимать их на реальную или виртуальную камеру. Расстановка персонажей и предметов должна быть естественной, непринужденной, и в то же время она должна способствовать передаче диалогов, жестикуляции и мимики. Важное значение здесь отведено именно жестикуляции и мимике, поскольку зрители обращают на них внимание в первую очередь. Зрители обязательно заметят не только недостаток жестикуляции и мимики, но и неестественные позы персонажей. Все перечисленные составляющие всегда должны быть уравновешенными, что достигается благодаря тщательному распределению графических весов и подходящим теням.

При постановке объектов необходимо правильно подобрать их размер и пропорции, чтобы добиться требуемого равновесия. Естественные позы и движения персонажей должны быть асимметричными: если одна сторона тела находится в каком-то положении, то это вовсе не означает, что в том же положении должна находиться и другая. Обе стороны тела персонажа не могут двигаться одинаково, ибо это неестественно для человеческого тела в реаль-

Для правильной постановки съемок с живыми персонажами важное значение имеет равновесие и симметрия сцены, жестикуляция и мимика персонажей, а также их перемещение по сцене

Аниматор должен придать походке персонажа такой вид, чтобы зрителю было ясно, прогуливается персонаж или спешишт в ванную

ном мире. (Подробнее способы передачи поз персонажа будут рассмотрены в главе 8.)

Любая работа над постановкой должна включать в себя и *установку мизансцен (blocking)*. Подобно постановке, установка мизансцен представляет собой предусмотренное движение цифровых актеров и виртуальной камеры. После расстановки персонажей можно создать более интересный в творческом плане вид съемки, — в частности, скрыть персонаж, проходящий прямо перед объективом камеры. Установка мизансцен уже давно применяется в кинематографе, однако этот метод может быть использован и в мультимедиа-технологиях.

Слишком часто аниматоры расставляют персонажей или декорации вдоль одной и той же оси. Предположим, что снимается уличная сцена, в которой персонажи выстроены вдоль тротуара. При обычной съемке такие персонажи показывают на уровне плеч, т. е. непосредственно с точки наблюдения за ними третьего лица. Однако такая съемка неинтересна. Чтобы придать подобным сценам больший интерес и глубину, можно воспользоваться методами установки мизансцен: фигуру одного персонажа показать крупным планом, а другого персонажа в глубине сцены — представить общим планом. Для дополнительного усиления сцены можно также воспользоваться глубиной резкости.

Постановка и установка мизансцен выполняются всегда (для этого достаточно нацелить виртуальную камеру на объект съемки), но для правильного выполнения этих действий необходимо принимать во внимание следующие элементы:

- точку интереса;
- точку наблюдения зрителя;
- точку наблюдения персонажей;
- линии действия, в том числе углы расположения камеры и композицию.

К постановочным решениям также относится *глубина композиции*, которая придает сцене дополнительную эмоциональную окраску. Рассмотрим, например, сцену, на переднем плане которой находится фотограф, готовящийся к съемке, а на заднем

плане появляется ни о чем не подозревающая кинозвезда и идет в сторону фотографа. При этом становится ясно, что папарацци вскоре сделает снимок кинозвезды, застав ее врасплох, и, возможно, продаст этот снимок на следующий день за большие деньги какой-нибудь бульварной газете.

Добиться эффекта восприятия глубины композиции можно, использовав следующие приемы:

- определение взаимосвязи объекта съемки с его окружением и использование глубины резкости для повышения реалистичности;
- знания правила, что чем больше расфокусировано окружение объекта съемки, тем больше иллюзия глубины;
- учет того, что крупные элементы, которые находятся в поле зрения (в частности, профиль персонажа размером в половину экрана, смотрящего вдоль длинной оживленной улицы), способны создать сильное ощущение глубины;
- использование разных точек расположения камеры для придания дополнительной иллюзии глубины; установка камеры в положение, позволяющее снимать сцену с верхней или нижней точки.

Кадрирование. «Правило третей»

Кадрирование — это искусство размещения объектов внутри визуализируемого изображения. Кадрирование сцены зависит от того, какие объекты должны быть видны в визуализированном изображении, а также от того, как разделяется пространство внутри изображения.

Если объект находится в самом центре изображения, то оно выглядит неестественно, неинтересно и, как правило, его композиция оказывается неудачной. Для улучшения композиции объект следует немного сместить относительно центра изображения.

Для визуального представления изображений, фотографий или кадров виртуальной съемки обычно применяется так называемое «правило третей»

Показать небольшое насекомое на листе, передав при этом зрителю ощущение реального размера, можно создав иллюзию глубины с помощью значительной глубины резкости: снять насекомое крупным планом и в то же время оставить вне фокуса его окружение

(*rule of thirds*). При составлении композиции изображения полезно разделить его на три равные части по вертикали и горизонтали (рис. 7.4), а затем разместить объект вдоль одной из воображаемых линий, разделяющих изображение, либо расположить наиболее интересную часть сцены в точке пересечения двух таких линий.

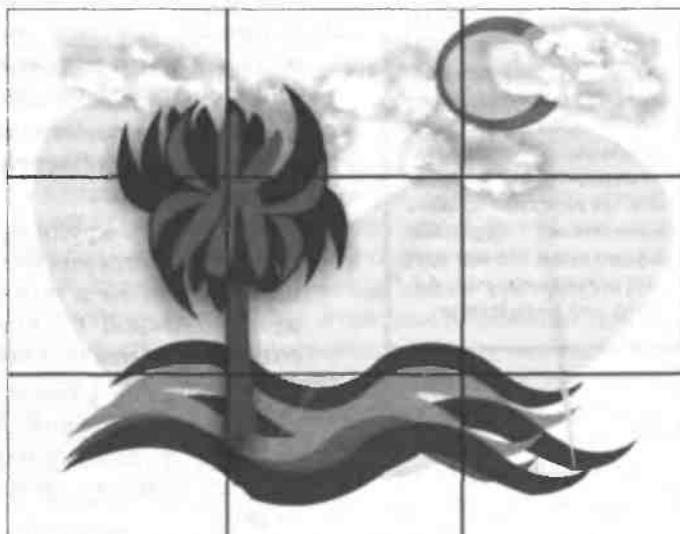


Рис. 7.4. «Правило третей» помогает правильно разместить объект в кадре и тем самым улучшить его композицию

Правило третей подразумевает четыре *точки сходимости* на пересекающихся линиях упомянутой выше сетки. Именно на них прежде всего и останавливается взгляд, причем любые объекты, которые находятся на этих точках, считаются *правильно кадрированными*. Так, если в сцене видна линия горизонта, то ее лучше всего поместить на линии одной из третей кадра, чем оставить в центре, поскольку при этом кадр окажется как бы разделенным надвое.

«Правило третей» является дополнительным приемом, который может быть использован не только для подготовки к визуализации и составления композиции кадра, но и для более совершенной расстановки персонажей и объектов сцены, а также способствует правильной постановке всей сцены в целом.

Школа гештальта

В этом специальном разделе мы кратко остановимся на механизмах восприятия пространства, времени и движения, которые, совместно со способами восприятия контуров и содержания осмыслиенных фигур плоскостного типа, образуют динамическую картину обстановки, повседневно окружающей человека. Восприятие пространства содержит оценки формы, величины и расстояний до предметов и/или между предметами [18].

Чаще и подробнее всего свойства восприятия изучались на примере зрения как ведущего органа чувств у человека. Существенный вклад в понимание того, как из отдельных зрительно воспринимаемых деталей предметов складывается их целостная картина — образ, внесли представители *гештальт-психологии* — направления научных исследований, сложившегося в Германии в начале XX в.

Ключевая особенность зрительной системы человека заключается в том, что на восприятие окружающего мира влияет *контекст*. Это наблюдение и привело к возникновению школы гештальт-психологии [35]. Для последователей данной школы *группировка* — это тенденция зрительной системы собирать некоторые компоненты изображения в единое целое и воспринимать их именно как целое. Группировка, например, — это причина многих оптических иллюзий (см. рис. 5.2, 5.6, 5.12, 5.16), когда зрительная система воспринимает компоненты различных объектов как единое целое.

Общий подход к сегментации — всегда предполагать, что изображение можно разложить на рисунок (как правило, значимый, важный объект) и фон — основу, на которой расположен рисунок. В то же время (см. рис. 5.4) не всегда можно однозначно определить, что является рисунком, а что — фоном, откуда следует, что предложенная теория является недостаточной.

Одним из первых классификацию факторов, влияющих на организацию зрительных ощущений в образы, в русле гештальт-психологии предложил М. Вертгеймер. Он выделил следующие факторы (рис. 7.5):

Приверженцы школы гештальта отвергают изучение реакции на внешние раздражители и делают акцент на группировке как на основе понимания зрительного восприятия

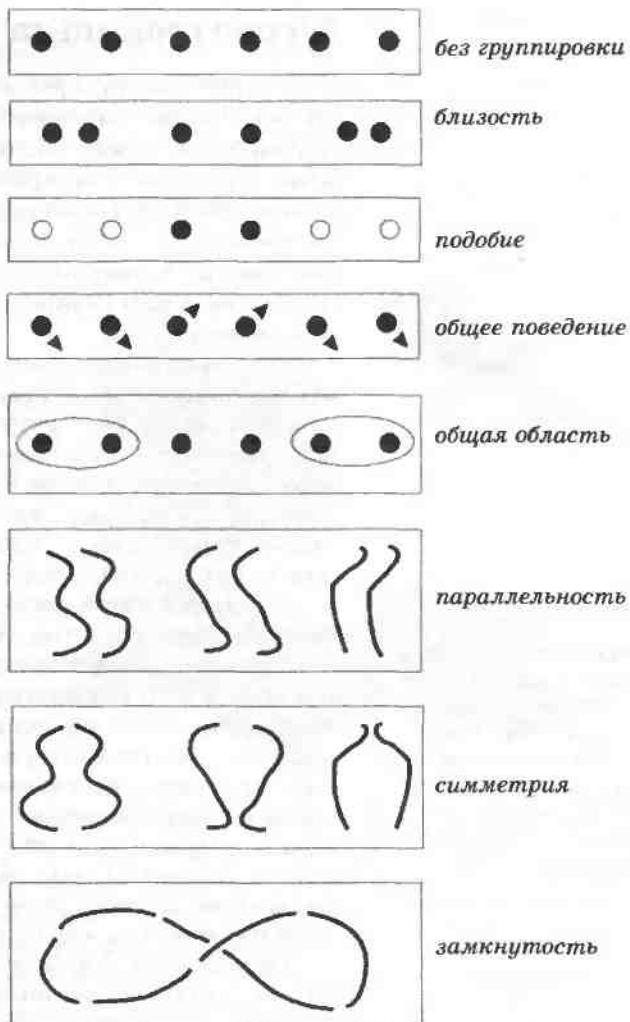


Рис. 7.5. Принципы школы гештальта

- **соседство** — близость друг к другу элементов зрительного поля, вызвавших соответствующие ощущения. Такая близость может быть вызвана, например, симметрией, параллельностью или нахождением в пределах одной общей области. Чем ближе друг к другу в зрительном поле про странственно располагаются соответствующие элементы, тем с большей вероятностью они объединяются друг с другом и создают единый образ;

- *подобие и общее поведение* — сходство элементов или их поведения друг с другом. Похожие элементы обнаруживают тенденцию к объединению;
- *знакомая конфигурация*, или фактор «естественног продолжения». Элементы, выступающие как части знакомых наблюдателю фигур, контуров и форм, с большей вероятностью в сознании объединяются именно в эти фигуры, форму и контуры, чем в другие;
- *замкнутость*, или непрерывность. Данное свойство зрительного восприятия выступает как стремление элементов зрительного поля создавать целостные, замкнутые изображения.

Указанные правила можно использовать при объяснениях, но они недостаточно строги, чтобы на их основе можно было построить алгоритм действий технического специалиста при проектировании композиции трехмерных сцен.

Психологи школы гештальта столкнулись с серьезными сложностями при определении области применения каждого правила. Особую проблему представляет то, что выше было названо «знакомыми конфигурациями». Ключевой вопрос здесь состоит в том, чтобы понять, какая знакомая конфигурация применима к поставленной задаче и как ее выбрать.

Тем не менее правила гештальта предлагают рациональное решение задач, которые встречаются в реальном мире. Например, свойство непрерывности может позволить решить задачу затенения, когда части контура затеняемого объекта можно сгруппировать по принципу непрерывности. Другими словами, тень от объекта, разорванная расположением других объектов на пути источника света, может восприниматься как единое целое, исходя из чего наблюдатель сможет представить себе форму затеняемого объекта.

В рамках психологии гештальта также была предложена *теория вчувствования*, или эмпатии (J. Herder, T. Lipps). Согласно ей, читатель отождествляет себя с героями книги и проживает их жизнь,

а зритель — непроизвольно повторяет действия, изображенные на картине. Он «преодолевает подъем» идущей снизу вверх диагонали, «разворачивается», когда поднимается по винтовой лестнице, «сгибается», входя в узкое помещение и т. д. Иначе говоря, он как бы совершает те движения, которые производит глаз при восприятии изображения.

Анализ записей движений глаз, проведенный А.Л. Ярбусом [52], показал, что элементы плоскостных изображений, привлекающих внимание человека, содержат участки, несущие в себе наиболее интересную и полезную информацию для воспринимающего ее человека. При внимательном изучении таких элементов, на которых чаще всего останавливается взгляд в процессе рассматривания картины, обнаруживается, что движения глаз фактически отражают процесс человеческого мышления. Установлено, что при рассматривании человеческого лица наблюдатель больше всего внимания уделяет глазам, губам и носу. Ведь глаза и губы человека действительно являются наиболее выразительными и подвижными элементами лица, по характеру и движениям которых мы судим о психологии человека и его состоянии. Они многое могут сказать наблюдателю о настроении человека, о его характере, отношении к окружающим людям и многом другом.

Глобальное освещение и трехточечная схема

Как уже отмечалось в начале этой главы, специалисту, занимающемуся трехмерной графикой, следует знать принципы композиции, освещения и затенения создаваемых 3D-сцен. Поэтому после рассмотрения вопросов композиции перейдем к задачам освещения сцен.

Параметр, называемый *общим освещением* (*ambient light*), или *глобальным окружающим освещением* (*global ambience*), в большинстве программ трехмерного моделирования представляет собой нереальный эффект, имеющий мало общего с реальным эквивалентом и способный помешать полному контролю над освещением сцены.

В реальном мире общее освещение образуется рассеянным светом, отражающимся от находящихся на сцене объектов или проходящим сквозь них. Общему освещению подлежат даже те участки, которые непосредственно не освещены другим источником света (так называемое *диффузное отражение*). Затененные участки комнаты иногда становятся видимыми только благодаря общему освещению.

Свет, создающий общее освещение, всегда окрашен, поскольку он отражается от окружающей среды и придает различную окраску разным сторонам объектов (в зависимости от цветов, воспринятых от окружающей среды). Яркость настоящего общего освещения меняется в разных местах окружающей среды и придает различные оттенки объектам, освещенным под разными углами.

В программах трехмерной графики и анимации под термином «общее освещение» подразумевается лишь величина равномерной яркости, которую получают находящиеся на сцене объекты, благодаря чему они видны даже в тех местах, где их не освещает размещенный на сцене источник света. Причем это обычно делается без какого-либо учета оттенка или направления отраженного света, в результате чего получается равномерно распределенное нереалистичное затенение. Общее освещение придает одинаковую окраску и яркость всем сторонам объекта независимо от его положения.

Как правило, общее освещение лишает сцену богатства и разнообразия красок, особенно на ее участках, которые не освещены другими источниками света. Поэтому для получения более высокого качества затенения общее освещение целесообразно отключать. Если же выбирать окраску для общего освещения, то для него лучше всего подойдет черный цвет. Благодаря этому сцена освещается только источниками света, которые специально в ней размещены и находятся под полным контролем разработчика.

Трехточечная схема освещения, которую мы сейчас рассмотрим, является надежным методом реалистичного воспроизведения объектов с помощью освещения. При этом три точки освещения в трехто-

Общее окружающее освещение в программах трехмерной графики лучше отключать для достижения более полного контроля над источниками освещения сцены

чечной схеме фактически означают три конкретные роли, которые свет может играть в сцене:

- *источник направленного света* — создает основное освещение объекта и определяет преобладающий угол освещения. Источник направленного света обычно ярче, чем остальные источники, освещдающие объект, и, как правило, образует самые темные и заметные тени на сцене;
- *источник заливающего света* — смягчает и усиливает освещение от источника направленного света, делая освещаемый объект более видимым. Источник заливающего света позволяет имитировать эффект отраженного света либо действие вспомогательных источников света на сцене;
- *источник контражурного света* (задняя подсветка) — создает отчетливую границу, помогающую визуально отделить объект от фона. Например, задняя подсветка способна придать необходимый блеск волосам персонажа.

Заднюю подсветку не следует путать с *фоновым освещением*, поскольку задняя подсветка предназначена не для освещения фона, а для создания отчетливой границы по краю объекта. Упомянутые выше точки, как правило, используются для освещения основного объекта съемки (персонажа или главного объекта виртуальной сцены), а для его окружения применяются другие источники света.

Виды источников света. Пять свойств света

В программах трехмерного моделирования обычно выделяют следующие типы источников света:

- *точечные*, или *всенаправленные* (*point source*) — точечные источники, излучающие равномерно во все стороны;
- *прожекторы* (*spotlights*), испускающие конус света из определенной точки;
- *направленные* (*directional*), которые характеризуются направленным потоком параллельных лучей и освещением объекта под одним и тем же

углом независимо от местоположения объекта. Такие источники также называют «бесконечно удаленными»;

- *поверхностные (surface source)*, — когда источником света выступает поверхность объекта. Различают сферические, плоские и линейные (изменение размера — только в одном измерении) поверхностные источники.

Различные естественные источники света, такие как Солнце, Луна, свеча или огонь, имеют свой, оригинальный и легко распознаваемый на изображении вид. Особенности, придающие своеобразие каждому источнику света, мы назовем *свойствами света*.

В принципе, любой источник света может быть описан с помощью неограниченного количества качественных эпитетов, причем все они могут быть отнесены к разряду «свойств света». Тем не менее существует как минимум пять категорий, с помощью которых можно вполне распознаваемо описывать свойства источников света:

- *мягкость;*
- *сила;*
- *окраска;*
- *проекция;*
- *анимация.*

Корректная интерпретация этих пяти свойств позволяет правильно передать характерные черты моделируемых реальных источников света при визуализации трехмерных мультимедиа-сцен.

Мягкость — это одно из самых важных свойств света, зачастую неудачно воспроизведенное в мультимедийных технологиях.

Свет в визуализируемых сценах может быть воспроизведен мягким или резким.

Большинство источников света, применяемых в компьютерной графике, дают резкий свет — слишком отчетливо очерченный, исходящий из очень малого и сильно удаленного источника. Такой свет нетрудно распознать, поскольку он дает очень резкие тени и обычно создает небольшие, плотные подсветки.

Свет лампочки становится мягким, если пропустить его сквозь ткань абажура, а солнечный свет смягчается облачным небом

Воссоздать мягкий свет на компьютере сложнее, чем резкий. Тем не менее мягкий свет встречается в реальном мире очень часто. Мягким считается рассеянный каким-то образом свет, он распознается по мягким (а не резко) очерченным краям, а также по более широким и менее отчетливым областям света и тени на освещаемых поверхностях.

Резкий свет целесообразно использовать в следующих случаях:

- имитация освещения непосредственно от небольшого, сосредоточенного источника света (скажем, от электрической лампочки, подвешенной под потолком);
- имитация прямого солнечного света в ясный день;
- освещение космических сцен. В данном случае может быть использован источник очень резкого света, поскольку в космическом пространстве свет достигает объектов без рассеяния в атмосфере;
- привлечение внимания зрителей к искусственно му источнику света (как, например, в сцене с цирковым артистом, освещаемым прожектором);
- проецирование теней отчетливой формы, — скажем, чтобы зрители «распознали» злодея по его тени на стене;
- освещение для создания «неприветливой» обстановки: резкий свет обычно придает сцене жесткий вид и вызывает у зрителей чувство тревоги.

Мягкий свет имеет смысл использовать в следующих случаях:

- воспроизведение естественного света в пасмурный день, когда тени не вполне отчетливы;
- воспроизведение света, отраженного, в частности, от стен или потолка (такой свет, как правило, получается мягким);
- воспроизведение света, проходящего сквозь полупрозрачные материалы, в том числе шторы или абажуры;
- придание сцене более привлекательного вида: мягкий свет придает многим сценам более уютный и расслабляющий вид и делает объекты более естественными и органичными;

- представление персонажей в выгодном свете (показ многих голливудских кинозвезд крупным планом часто делается именно при мягким освещении);
- повышение реалистичности визуализируемых изображений. Исторически сложилось так, что главным изъяном большинства трехмерных визуализированных сцен всегда было очень резкое освещение, тогда как мягкий свет позволяет избежать этого недостатка.

Если лампа находится рядом с окном, освещенным солнечным светом, то яркость изображения этой лампы следует значительно уменьшить для реалистичного представления силы ее света

Одним из самых заметных свойств света является его **сила (яркость)**. В предыдущем разделе при рассмотрении трехточечной схемы освещения сила света являлась основным определяющим фактором освещения объекта, будь это источник направленного или заливающего света.

Управление силой света источника осуществляется путем изменения яркости окраски его изображения основными цветами *RGB* либо с помощью специальных параметров яркости.

Кроме того что источники света обладают разной силой света при разной экспозиции, еще одним фактором, оказывающим влияние на силу света источника, является расстояние между освещаемым объектом и источником света. В реальном мире свет, проходящий от источника к объекту, ослабевает по мере удаления объекта от источника света. Например, если поднести руку близко к лампочке, то рука будет освещена достаточно ярко, а если отвести руку на полметра от лампочки, то освещение руки уменьшится до умеренной величины.

Уменьшение силы света по мере его удаления от источника называется **затуханием (attenuation)**.

Если свет излучается из одной точки, то его затухание происходит *по закону обратных квадратов*. Это означает, что освещение в заданной точке равно силе света в месте расположения его источника, деленной на квадрат расстояния до освещаемого объекта.

При *линейном затухании* света образуется более ровный переход от света к тени, чем в реальной жизни. Линейный спад яркости позволяет установить расстояние, на котором свет полностью гаснет,

а также добиться равномерного уменьшения силы света от полной яркости до нуля по мере его удаления от источника. Линейный спад яркости также позволяет создавать хорошо контролируемое, предсказуемое освещение. Достаточно установить максимальное расстояние для полного затухания света, чтобы точно знать, что на половине этого расстояния сила света уменьшится ровно в 2 раза.

Как правило, в большинстве моделирующих программ также имеется возможность установить *источники света без затухания их силы*. Такой источник будет освещать объект в противоположном конце помещения столь же ярко, как и расположенный рядом с ним объект. Иногда это оказывается удобным, поскольку дает возможность установить единый уровень яркости без учета расстояния до каждого объекта.

В ряде случаев отсутствие затухания позволяет добиться наиболее реалистичного вида. Например, в сцене, где свет проходит в окно, затухание обычно не требуется: ведь солнечный свет уже преодолел огромное расстояние, прежде чем достигнуть окна, и поэтому пропорциональное изменение его силы на последних метрах до освещаемого объекта вряд ли будет заметно, — так что отсутствие затухания имитирует солнечный свет лучше, чем закон обратных квадратов.

Третьим свойством источников света является их *окраска*. Различные типы источников света могут быть распознаны по разной окраске света, который они обычно излучают. Большинство бытовых лампочек, например, дают свет, немного окрашенный в желтые и оранжевые тона (по сравнению с дневным светом, имеющим голубоватый оттенок, — см. ранее понятие цветовой температуры). Благодаря воспроизведению естественной окраски света визуализируемые изображения приобретают более реалистичный вид.

Следует заметить, что окраска — это не просто очередное свойство света. Она позволяет создать определенное настроение и даже изменить смысл визуализированной сцены. Поэтому художники всегда очень тщательно выбирают цвета и цветовые схемы.

Окраска позволяет зрителям судить, откуда исходит свет. Скажем, дневной свет, поступающий из-за угла в центре станции метро, ясно показывает, что это выход в город, через который дневной свет проникает на станцию

Лишь немногие источники света освещают объект равномерно; чаще всего освещение приобретает некоторую форму или рисунок. *Проекция (throw)*, или «проецируемый рисунок» света, — это свойство света принимать определенную форму или рисунок. Так, настольная лампа создает на стене две дуги света, а между ними — участок, менее ярко освещенный светом, проходящим сквозь ее абажур.

Наиболее эффективным методом настройки рисунка, проецируемого источником света, является проецирование текстуры или изображения на сам источник света. Это означает превращение источника света в своего рода диапроектор, проецирующий выбранное изображение на сцену.

Наконец, многие источники света отличаются своими *анимационными свойствами*. Некоторые типы источников идентифицируются наблюдателем по тому, как они изменяются во времени, — будь то колеблющийся свет пламени свечи, мигающие огни на крыше пожарной машины, движущееся за облаками Солнце или переменчивое голубоватое свечение от экрана телевизора. Анимация изменений, происходящих в источнике света, может быть выполнена разными способами — путем изменения положения источника света, его параметров или теней, отбрасываемых объектами, расположенными перед источником света.

Заливающее и направленное освещение. Тени

Яркость заливающего света важна для передачи тонов и контраста в сцене. Слишком яркий заливающий свет может мешать затенению от источника направленного света, делая вид объекта менее привлекательным, а слишком тусклый — оставить неясно выраженной темную сторону объекта. Оптимальное количество заливающего света должно быть заметно слабее, чем направленный свет, но все же достаточно ярким для освещения всего объекта.

Существуют два часто употребляемых термина, относящихся к освещению окружающей среды: *светлые тона (high key)* и *темные тона (low key)*.

Светлые тона означают ярко освещенную окружающую среду, где присутствует большое количество заливающего света, а значит, соотношение направленного и заливающего света в ней мало. Темные же тона означают темную окружающую среду, где присутствует небольшое количество заливающего света, а значит, соотношение направленного и заливающего света достаточно велико.

При моделировании трехмерных сцен возникают некоторые ситуации, в которых можно ожидать больше заливающего света, а следовательно, выбрать малое соотношение направленного и заливающего света:

- интерьеры с белыми или сильно отражающими свет поверхностями, — например, кухни и ванные комнаты, больницы и т.п.;
- пасмурная погода, когда солнца практически не видно, а свет по-разному отражается и рассеивается от неба или от снежного покрова;
- некоторые виды продукции, в частности комедийные и детские телепрограммы, где постоянно используются малые соотношения направленного и заливающего света для сохранения радужного и веселого настроения.

После рассмотрения задач освещения перейдем к вопросам затенения сцен, играющим важную роль в композиции изображения.

Тени служат практической цели в большинстве случаев, определяя пространственное соотношение между объектами. Они показывают, например, где именно объект помещен в землю или как высоко над землей он находится.

Тень способна привлечь внимание зрителя к требуемой части визуализированного изображения либо создать новый конструктивный элемент для яркостного уравновешивания композиции. Тень также способна повысить контраст между передним и задним планами или между двумя элементами, которые иначе воспринимались бы в одном тоне.

Тени могут также указывать на наличие объектов за кадром. Создание ощущения «пространства за кадром» имеет важное значение для многих видов визуализируемой мультимедиа-продукции, осо-

бенно для раскрытия сюжета. Тень, отбрасываемая объектами, находящимися за кадром, как бы раскрывает границы мира, наблюдавшего в кадре, сообщая немало дополнительных сведений о других элементах его окружения.



Мультимедийное резюме

В данной главе обращается принципиальное внимание на необходимость знания и умения правильно применять принципы композиции, освещения и затенения при создании трехмерных мультимедиа-сцен.

- Композиционные принципы восприятия изображения зрителем отличаются от конструкционных, рациональных способов анализа объектов сцены. Композиция — это обобщенное, беспредметное видение абстрактных фигур, линий, тональных и цветовых областей.
- При планировании композиции сцены необходимо анализировать графические веса объектов и участков сцены, поскольку восприятие зрительной плоскости неоднородно по глубине, вертикали и горизонтали.
- С композицией неразрывно связаны постановочные решения, которые планируют расстановку объектов и виртуальных актеров на сцене, их размер и пропорции, перемещение со временем (*мизансцены*).
- Размещение объектов на сцене должно планироваться с учетом их попадания внутрь визуализируемого изображения так, чтобы выполнялось «правило третей», когда наиболее важные объекты попадают на линии одной из третей кадра.
- В специальном разделе гештальт-психологии отмечается, что кроме изучения реакции на внешние раздражители важны также тенденции зрительной системы группировать некоторые компоненты изображения в единое целое. Классификация группировочных факторов гештальта, по Вергтеймеру, включает в себя *соседство, подобие и общее поведение, знакомые конфигурации, замкнутость*. Свойство замкнутости при этом помогает решить задачу затенения, когда части контура затеняемого объекта можно сгруппировать в единое целое.

- Общая задача освещения сцен начинается с технического вопроса о глобальном окружающем освещении, возникающем вследствие диффузного отражения света от объектов сцены. Для полного контроля над источниками света и повышения качества затенения общее освещение в программах трехмерного моделирования целесообразно отключать.
- Классическая трехточечная схема освещения включает в себя источники направленного и заливающего света, а также заднюю подсветку. Эта схема, как правило, используется для освещения основного объекта (персонажа) съемки.
- Выделяют точечные, конусные, направленные и поверхностные источники света. Все они обладают свойствами мягкости, силы, окраски, проекции и анимации, существенно влияющими на восприятие сцены зрителем.
- Управление тенями на сцене необходимо для привлечения внимания зрителя к требуемой части визуализированного изображения или для создания нового конструктивного элемента для уравновешивания композиции.

Контрольные вопросы и задания



1. К конструкции или к композиции относится выстраивание имитирующего Солнце источника света за основными объектами сцены?
2. Расположите следующие объекты по убыванию графического веса: желтые обои на стене; маленький красный мячик; большой серый диван.
3. Приведите свои примеры горизонтальной неоднородности изобразительной плоскости.
4. Как создать иллюзию глубины, если необходимо воссоздать перрон вокзала?
5. Будут ли считаться правильно кадрированными четыре объекта, занимающие все точки пересечения трёхтичных линий?
6. Чем плохо глобальное окружающее освещение в программах трехмерной графики?
7. Строго говоря, поверхностные источники света являются подвидом другого вида источников. Какого?
8. Какому закону затухания света должен подчиняться свет появившегося на горизонте прожектора корабля?

Глава 8

Видеовосприятие. Анимация

- Фиксирующие движения глаз
- Теории движения
- Стробоскопический эффект
- Закон Блоха–Шарпантье
- Способы кадрирования
- Искусство мультипликации
- Масса и гравитация
- Принципы Диснея

Восприятие движения — это одна из важнейших задач, решаемых зрительной системой, и одновременно — очень сложный процесс. Если предмет объективно движется в пространстве, то мы воспринимаем его движение потому, что он выходит из области наилучшего видения (так называемого *фовеального зрения*) и этим заставляет нас передвигать глаза или голову, чтобы вновь зафиксировать на нем взгляд.

Вместе с тем, движение искусственных объектов на экране дисплея, воспроизведение анимированных последовательностей, демонстрация видеороликов являются важнейшей частью современных технологий мультимедиа. Передача движения обеспечивает ключевую возможность «оживления» статичных искусственных объектов, что позволяет серьезно усилить эффект погружения пользователя в виртуальную среду.

Восприятие движения

При отсутствии неподвижных ориентиров наблюдателю сложнее заметить движение. Например, перемещение солнца в зените почти незаметно, в то время как на закате солнце кажется стремительно уходящим за горизонт

Фи-феномен: если интервал времени между зажиганием двух светящихся точек, находящихся друг от друга на сравнительно небольшом расстоянии, меньше 0,1 с, то возникает иллюзия перемещения светового источника

Основную роль в восприятии движения играют зрительный и двигательный (кинестетический) анализаторы. Установлено, что для фoveального зрения минимально различимая скорость движения объекта при наличии в поле зрения неподвижных ориентиров составляет 1–6 угловых минут в секунду, а при отсутствии таких ориентиров — 10–20 угловых минут в секунду. Максимальная скорость, при которой еще воспринимается движение объекта, лежит в пределах 12–32 градуса в секунду [25].

Это означает, что движение объекта на экране со скоростью менее одной угловой минуты или больше, чем примерно 32 градуса в секунду, с высокой вероятностью не будет замечено наблюдателем.

Установлено также, что чувствительность к восприятию движения уменьшается от центральной ямки к периферии по линейному закону. Для периферического зрения при отклонении в 9° от центральной ямки глазного яблока минимальные пороги восприятия движения составляют 18 угловых минут в секунду при наличии неподвижных ориентиров в поле зрения, а при отсутствии неподвижных ориентиров величина минимальных порогов становится в 10–20 раз большей. Поэтому движение объектов боковым зрением воспринимается хуже.

С помощью зрения мы можем получить информацию о движении объекта двумя различными способами:

- при фиксированном взгляде;
- с помощью отслеживающих движений глаз.

В первом случае изображение объекта не только перемещается по сетчатке, но и все время изменяется. Однако благодаря постоянству восприятия мы видим, что это один и тот же объект перемещается в пространстве. Аналогичное перемещение изображений на сетчатке возникает и тогда, когда мы, например, поворачиваем голову. Однако в этом случае у нас не возникает ощущения движения окружающих предметов. Впрочем, при наличии повреждений в вестибулярном аппарате подобной корректи-

Смещение глаз (нистагм): если пальцами вытянутой руки быстро размахивать перед собственными глазами, то различить отдельные пальцы становится невозможно. Если же с такой же скоростью вертеть головой, то пальцы остаются вполне различимыми

ровки не происходит, и человеку при движении головы кажется, что весь мир движется вокруг него.

Второй способ восприятия движения — слежение взглядом за движущимся объектом. При этом существует три типа движений глаз, фиксирующих движение объекта наблюдения.

Первое из них — это *медленное следящее движение*, требующее сознательного внимания. Оно удерживает область наилучшего видения направленной на объект интереса при его движении или перемещении самого наблюдателя. Движения глаз (сокращения глазных мышц) могут быть достаточно быстрыми — до 100 м/с, но могут замедляться наркотическими веществами, утомлением или алкоголем.

Второе фиксирующее движение — более быстрое и называется *саккастическим*. Когда объект уходит из области наилучшего зрения, глаз остается неподвижным около 200 мс, а затем быстро (со скоростью около 900 м/с) смещается, чтобы вновь восстановить высокое качество изображения на сетчатке. Такое движение может быть недостаточным или избыточным, тогда центрирование доводится *микросаккастическими* движениями.

Можно рассматривать все эти движения как «подстройку». Глазодвигательная система беспрерывно находится в таком состоянии до тех пор, пока максимально четкое изображение не попадет в область лучшего видения (на центральную ямку). Поэтому при уходе объекта из этой области за счет времени реакции (латентного периода) человек не способен отслеживать движение еще около 200 мс.

Наконец, третий тип фиксирующих движений — это *вергентные движения*. Во всех предшествующих случаях оба глаза двигаются в одном и том же направлении, т. е. их движения являются содружественными. При vergentных же движениях — другая ситуация. Если объект приближается к лицу или удаляется от него, то глаза согласованно движутся в противоположных направлениях — к переносице или вискам, т. е. несодружественно. Vergentные движения побуждаются различиями положения изображений объекта на сетчатках двух глаз — *диспаритностью* (сетчаточным несовпадением). Вер-

гентные движения также согласованы с аккомодацией хрусталика: когда меняется расстояние до объекта, мышцы ресничного тела, контролирующие аккомодацию, и глазные мышцы, выполняющие вергентные движения, работают совместно, что соответствует поддержанию точной фокусировки.

Иллюзию движения также могут вызвать звуковые ощущения перемещения источника шума из области слышимости одного уха в другое

В восприятии движения, несомненно, значительную роль играют косвенные признаки, создающие *опосредованное впечатление движения*. Так, впечатление движения может быть вызвано необычным для покоящегося тела положением частей фигуры (поднятая нога; отведенная, как бы замахнувшаяся рука; согнутые верхушки деревьев и т. п.) [53]. К числу «кинетических положений», вызывающих впечатление движения, принадлежит и наклонное положение, всегда особенно привлекавшее внимание художников.

Теории движения разбиваются в основном на две группы.

Первая группа теорий выводит восприятие движения из элементарных, следующих друг за другом зрительных ощущений как отдельных точек, через которые проходит движение, и утверждает, что восприятие движения возникает вследствие слияния этих элементарных зрительных ощущений (В. Бунт).

Теории второй группы утверждают, что восприятие движения имеет специфическое качество, не сводимое к таким элементарным ощущениям. Представители этой теории говорят, что, подобно тому как, например, мелодия является не простой суммой звуков, но качественно отличающимся от них специфическим целым, так и восприятие движения не сводимо к сумме составляющих это восприятие элементарных зрительных ощущений. Из этого положения исходит *теория гештальт-психологии*, которую разрабатывал главным образом М. Верхаймер. Восприятие движения является, по Верхаймеру, специфическим переживанием, отличным от восприятия самих движущихся предметов.

Также на основе накопленного опыта у человека складывается представление о том, что обычно движется меньшая фигура на большем фоне, а не боль-

Почему нам иногда кажется, что движется Луна, а не облака? Потому что движущимся подсознательно воспринимается объект, который явно локализуется на фоне других объектов

шая на меньшем, и что движущаяся фигура чаще изменяется, чем фон, который обычно остается неизменным (так называемый *автокинетический эффект*).

Инерционность зрения. Эффект послевидения

Инерция зрения (лат. *inertia* — «бездействие», «вязость») — это физиологическое явление, заключающееся в отставании возникновения и исчезновения зрительного ощущения от воздействия светового раздражителя. Инерция зрения проявляется наличием латентного периода, возникновением последовательных образов, слиянием световых мельканий и т. п.

Для создания ощущения движения объекта не обязательно, чтобы его проекция на сетчатку смещалась непрерывно. Это ощущение не нарушается и в случае, если на сетчатку глаза проецировать ряд быстро сменяющих друг друга изображений объекта, на которых представлены последовательные фазы его движения. Такое явление называется *стробоскопическим эффектом*.

Именно это свойство зрения используется для создания иллюзий движения в кино и в телевидении. Чтобы движение воспринималось плавным, частота смены изображений с различным фазами движения должна быть достаточно большой, — иначе движения будут казаться прерывистыми. Чем больше яркость экрана, тем выше эта частота, однако при используемых обычно яркостях экрана она не превышает 60–70 Гц.

Инерционность зрительной системы обусловлена двумя причинами: инерционностью фотохимических процессов, протекающих в фоторецепторах сетчатки, и инерционностью процессов распространения сигналов по ее нейронным сетям [25].

Первый вид инерционности проявляется при изменении средней освещенности наблюдаемой сцены, в результате которого нарушается динамическое равновесие между скоростями распада и регенера-

ции зрительных пигментов в фоторецепторах. Для восстановления этого равновесия требуется от нескольких минут до нескольких десятков минут в зависимости от начального и конечного уровней освещенности, при которых протекает адаптация.

Инерционность же, определяемая процессами распространения сигналов в нейронных сетях зрительной системы, проявляется на более коротких временных интервалах, не превышающих одной секунды.

Важно учитывать, что мгновенное исчезновение действующего на глаз стимула не приводит к такому же мгновенному исчезновению сигналов в зрительном нерве и зрительном центре мозга. Дело в том, что возбуждение химических процессов в рецепторах происходит относительно быстро (линейно), а их угасание происходит с экспоненциальным запаздыванием с достаточно большим временем затухания процесса. Это — весьма важное свойство зрения, непосредственно относящееся к кино- и видеоиндустрии, носит название «последование» (*persistence of vision*).

Остановимся также на таком важном явлении, как *смазывание движущегося изображения*. Известно, что резкие световые границы движущегося объекта воспринимаются зрителем размытыми вследствие инерционности зрения. Однако если мы наблюдаем изображение движущегося объекта, границы которого уже размыты, и если это размытие не превышает 10 угловых минут, то такое изображение воспринимается нами как более четкое. С таким эффектом мы встречаемся при просмотре спортивных телевизионных программ, в которых встречаются сцены, содержащие быстрые движения. Это свойство может быть использовано при разработке методов сжатия движущихся изображений.

Законы субъективного восприятия яркости

При частотах мелькания, превышающих критическую частоту, мелькания незаметны, а наблюданная

Ночью при вспышке молнии движущиеся предметы кажутся как бы остановившимися. Вспышка молнии длится всего около 0,001 с, в течение которых глаз не реагирует на изменение положения движущихся предметов, а потом он продолжает сохранять первоначально возникшее зрительное впечатление

яркость экрана $L(t)$ кажется неизменной и пропорциональной своему среднему значению (закон Тальбота):

$$L_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T L(t) dt,$$

где $T = \frac{1}{f}$ — период, а f — частота мельканий.

Если яркость наблюдаемого поля $L(t)$ изменяется по импульсному закону (что, например, имеет место при просмотре телевизионных передач), то условие, при котором зрителю будет казаться, что яркость экрана неизменна, можно записать следующим образом:

$$LT_u = const,$$

где L — яркость свечения экрана во время импульса, а T_u — длительность, в течение которой светится экран. Это выражение представляет собой частный случай закона Блоха—Шарпантье, который выполняется при условии, что $T_u \leq 60 - 100$ мс.

Закон Блоха—Шарпантье гласит, что величина субъективной яркости короткой вспышки света зависит от произведения интенсивности стимула и его длительности. Но этот закон действует лишь в околоспороговой области и при длительности стимула, не достигающей критической точки. Более общим считается закон Блонделя и Рея:

$$(L_b - L_0)T_u = const,$$

где L_b — пороговая яркость вспышки, а L_0 — пороговая яркость постоянного освещения глаза.

Критически различимая частота мельканий T_{kp} , как показали исследования, зависит как от средней освещенности сетчатки (или, что то же самое, от яркости наблюдаемого мелькающего поля), так и от его угловых размеров. Различные исследования дают большие расхождения в значениях T_{kp} , что объясняется различными условиями проведения опытов: T_{kp} меняется в пределах от сотых (при больших яркостях) до десятых (при малых яркостях) долей секунды [32].

Частота кадров в телевизионном вещании зависит не только от критической частоты мельканий, но и от частоты переменного тока в сети. В России используется сеть 220 В с частотой 50 Гц, а каждый кадр строится за два приема (поля), поэтому частота кадров выбрана равной 25

При проектировании устройств воспроизведения изображений, — например, дисплеев — знание этой величины очень важно, так как на ее основе определяется частота смены кадров. Так, при используемых яркостях экранов телевизоров и компьютерных дисплеев $f_{kp} \approx 46\text{--}48$ Гц, поэтому частота кадров в них выбирается выше этого значения.

Кинофильмы, как правило, снимаются с частотой 24 кадра в секунду, но и яркость показа в этом случае существенно выше. Телевизионный стандарт NTSC, распространенный в Северной Америке и большей части стран Тихоокеанского бассейна, определяет частоту чуть меньше 30 кадров в секунду, а два других распространенных в остальном мире стандарта — PAL и SECAM (последний используется, например, в России и Франции), — частоту 25 кадров в секунду. Каждый кадр при этом строится за два прохода — с помощью двух полей, содержащих четные и нечетные строки изображения. Таким образом, общая частота смены изображений в телевизионных стандартах составляет от 50 до 60 Гц.

Таким образом, широко рекламируемые методики обучения или даже гипноза «25-м кадром», как минимум, необоснованно названы, хотя и содержат в себе некоторую рациональную составляющую. «Техника 25-го кадра» — это нарицательное название, подразумевающее вставку в основную последовательность кадров кратковременного показа некоего *стоп-кадра*, несущего другую смысловую нагрузку, в отличие от основного ролика. Некоторые психологи считают, что такая вставка, будучи практически незаметной для непрерывного восприятия зрителем главной темы, тем не менее, действует на его подсознание, запуская требуемые глубинные психологические процессы. Однако в общем и целом эту технологию следует считать достаточно спорной.

Следует заметить, что инерционности центральной части сетчатки и ее периферической части существенно различны [25]. Инерционность периферической части сетчатки значительно ниже, в чем легко убедиться, наблюдая экран дисплея боковым зрением: в этом случае хорошо заметны его мелька-

При оценке частоты мелькания экрана дисплея или телевизора смотрите на экран боковым взглядом — периферическое зрение менее инерционно

ния, которые совсем не заметны, если на него смотреть прямо.

Планы съемки. Чередование планов

Кроме физиологических аспектов восприятия движения не менее важны и психологические. Поэтому далее мы кратко рассмотрим основные техники работы с камерой, которым при создании видео и анимации в мультимедиа-приложениях, как правило, уделяется мало внимания. Однако «цифровое полотно», на котором приходится работать специалисту, занимающемуся трехмерной графикой, обладает поразительными свойствами. Несмотря на особую роль текстур, освещения и движения, несложно приуменьшить или, наоборот, преувеличить эффект создаваемого изображения, изменив лишь способ его просмотра.

Управлять камерой в трехмерном пространстве — это значит управлять тем, как зрители будут смотреть сцену. Сюда также входит выбор точки съемки, — а поскольку точка съемки определяет способ восприятия события, этот выбор имеет особое значение [54]. Разные виды съемки и точки съемки позволяют изменить точку наблюдения, раскрыть сюжет или создать настроение, тем самым меняя реакцию зрителей на сцену.

На рис. 8.1 приведена схема выбора высоты кадрирования от верхней до нижней части кадра, наблюдаемого через камеру. Иными словами, на этом рисунке представлены наиболее часто используемые виды съемки человека среднего роста и соответствующие размеры кадров.

Перечислим пять наиболее распространенных планов съемки по порядку увеличения части сцены, наблюданной в кадре [11]:

- *предельно крупный план* — заполняет весь экран мелкими деталями сцены. При такой съемке показывается лишь часть лица персонажа; его глаза на этом плане всегда должны находиться «на линии горизонта»;



Рис. 8.1. Усредненные высоты кадрирования

- ***крупный план*** — плотное кадрирование конкретного участка, например лица персонажа;
- ***средний крупный план*** — промежуточный между крупным и средним планами, часто используется для показа персонажа с головы до плеч;
- ***средний план*** — охватывает более обширный участок, чем крупный план. Обычно средним планом показывается верхняя часть тела персонажа, его руки и голова. При «голливудском» среднем плане нижний край кадра находится на уровне самой широкой части бедер [55];
- ***общий план*** — охватывает широкий вид всего места съемки, объекта или действия. Как правило, общим планом показывается весь персонаж с головы до пят либо целые группы персонажей.

Используя различные планы, можно придать более интересный и кинематографический вид визуализированным сценам и кадрам анимации. Для этого необходимо прежде всего исследовать наиболее интересные участки трехмерных сцен на предмет их показа, например, предельно крупным или средним крупным планом.

Съемка общим планом позволяет показать всю окружающую обстановку в целом, более широко за-

Благодаря «отъезды» камеры обнаруживается окружающее пространство — особенно при охвате дальним планом впервые показываемой окружающей обстановки

«Правило восьмерки»: двух разговаривающих можно снимать попаременно, расположившись только с одной стороны от них

хватить действие либо представить одновременно положение всех персонажей на сцене. Прежде чем переходить к показу деталей крупным планом, следует дать зрителям общее представление о сцене с помощью какого-либо *дальнего плана*, например общего. Общий план предназначен для установления связи с остальными кадрами снимаемой сцены и показа окружающей обстановки, которая может быть не видна крупным планом. Иногда перед началом сцены внутри здания делается съемка общим планом, показывающая здание снаружи для установления связи с местом действия.

Средние и крупные планы помогают привлечь внимание зрителей к сцене и обнаружить детали или выражение лица персонажей. Крупные планы особенно полезны для визуализации видеопродукции, предназначеннной для телевидения или отображения на экранах небольших размеров.

Чтобы оказать определенное влияние на зрителей, можно использовать прием, который называется *монтажным переходом, действующим на подсознание* (*subliminal cut*). Быстрая смена нескольких разных кадров может оказаться практически незамеченной, хотя и действует на подсознание зрителей. Такой прием нередко используется, чтобы донести до зрителей определенные ощущения — например, страха в фильмах ужасов, когда в воображении главного персонажа возникают видения смерти. Благодаря короткому монтажному переходу к «маске смерти» зрителю передается ощущение приближающейся гибели персонажа.

Существует также много других изобразительных приемов при работе с камерой в движении: панорамирование, съемки с трансфокацией, с наведением на резкость и т. п. Подробнее об этих приемах можно узнать, например, в книгах [11, 54, 55].

В «фильмах ужасов» принято показывать сцены с точки зрения убийцы или чудовища, преследующего очередную жертву

Мультипликация. Фазы и физические законы движения тел

Искусство мультипликации — это особый вид кинематографа, создающий художественные произведе-

ния средствами покадровой съемки рисунков, кукол или с использованием трехмерных пакетов графического моделирования.

Рисованный и кукольный фильмы переносят нас в мир сказок и басен, но в то же время — в мир, глубоко реальный и близкий зрителю. Даже современные реальные персонажи получают свое художественное воплощение средствами лаконичного, эмоционального мультипликационного рисунка.

Из многолетнего опыта киноискусства установлено, что для восприятия плавного движения объектов в большинстве случаев достаточно передавать 16–24 отдельные фазы движения в секунду. Классическая мультипликация использует, как правило, значение 8–15 кадров в секунду, но для уверенного распознавания зрителем каждый образ удерживается на экране от 4 до 10 с, что связано с пропускной способностью зрительной системы. Это справедливо как для движущихся, так и для неподвижных объектов — заставок, титров и т. п.

В 1870 г. в Сан-Франциско англичанин Эдвард Мьюбридж начал свою работу по съемке последовательных фаз движения. Его исследования и по сей день служат значительным вкладом в изучение движения животных и человека (рис. 8.2). Они представляют огромный интерес для художников и особенно — для мультипликаторов [56].

Создание любой анимации начинается со *сценария*. Потом сценарий проходит *графическую проработку*.

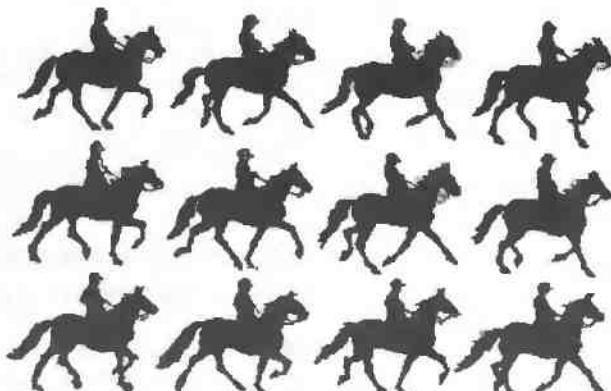


Рис. 8.2. Схема движения лошади по работам Эдварда Мьюбриджа

ботку, рисуются окончательные эскизы действующих персонажей, включая самых второстепенных, эскизы декораций и хотя бы несколько рисунков монтажных планов для начала работы художника-мультипликатора.

При создании эскизов рисованных персонажей художники должны стремиться к простоте формы и выразительности.

Приступая к работе над сценой, художник-мультипликатор детально разрабатывает действие, его направление и темп, а также распределяет по времени каждое движение персонажей и все акцентирующие моменты в их действии.

Действие персонажа распадается на отдельные элементы движения — фазы, неравноценные по своему значению для передачи характера движения.

Существуют основные фазы (компоновки), определяющие характер и направление движения, и промежуточные. Для показа движения протяженностью в 1 с нужно сделать до 24 рисунков. Чем быстрее темп действия, тем меньше требуется фаз для его изображения, так как каждая дополнительная фаза, увеличивая хронометраж на 1/24 с, замедляет действие.

Правильное определение хронометража чрезвычайно важно для создания выразительного и правдивого действия, поскольку замедление или ускорение темпа создает на экране впечатление нарочитости и неестественности. Однако в построении движения художник-мультипликатор руководствуется не только общим темпом действия. Он должен принимать во внимание и закономерность развития, которое получает то или иное движение в реальной действительности.

Все предметы имеют вес, конструкцию, степень упругости, поэтому каждый из них по-своему реагирует на внешние силы. Это поведение — комбинация из отдельных положений, положенная на временну́ю шкалу, — составляет основу одушевления.

Чтобы придать движению смысл, аниматор должен учитывать физические законы движения, выведенные Ньютона. В них содержится информация,

Если кривую движения человека при нормальной ходьбе и средней скорости шага разделить на равные части по хронометражу, то полный цикл его шага уложится примерно в 24–32 кадровые единицы или в 12–16 фаз на шаг каждой ноги

необходимая, чтобы определить, как правильно перемещать предметы и персонажей.

Каждый предмет или персонаж обладает массой и движется, только когда на него воздействуют какие-то силы. Неподвижный предмет стремится оставаться в состоянии покоя, пока определенная сила не приведет его в движение, но, начав двигаться, он стремится продолжать движение по прямой, пока другая сила не остановит его или не заставит изменить направление [57].

Чем тяжелее объект, т. е. чем больше его масса, тем больше сил требуется, чтобы изменить его состояние. Тяжелый предмет обладает большей инерцией. Чтобы привести в движение такой предмет (например, пушечное ядро), требуется очень мощный толчок.

Если ядро катится по шероховатой поверхности, то оно остановится гораздо быстрее, чем двигаясь по ровной и гладкой поверхности. Поэтому, рассчитывая движение тяжелых предметов, режиссер должен учитывать время, необходимое для разгона и остановки этих предметов, — тогда зритель почувствует их вес.

Легкие предметы нуждаются в гораздо меньших импульсах и реагируют совсем иначе на внешние воздействия. Воздушному шарику довольно легкого щелчка, чтобы он отлетел в сторону, а инерция его движения настолько слаба, что сопротивление воздуха способно остановить шарик.

Не нужно забывать и про гравитацию. Скорость мяча, взлетающего по вертикали, уменьшается до нуля под действием гравитации, а затем вновь возрастает при падении мяча.

Говоря о полете подброшенного мяча по траектории, мы имеем в виду, что расчет движения ведется относительно центра тяжести данного предмета. Любое тело движется соответственно своему центру тяжести. Например, подброшенный молоток вращается вокруг своей оси, в то время как его центр тяжести перемещается по заданной траектории.

Поведение предмета на экране, ощущение его массы обусловлено не самими fazami движения, а расстояниями между ними

Принципы анимации Уолта Диснея

Персонажи Диснея, заимствованные из животного мира, никак не похожи на свои прообразы, — иногда даже трудно догадаться, кого они представляют. И вместе с тем, в них содержатся поразительные по наблюдательности аниматора черты необычайно характерного поведения, манеры двигаться, реагировать на окружающее. Дисней очень метко назвал это «правдоподобием невероятного».

Придумывая смешных и странных животных в человеческой обстановке и одежде, он исходил из тщательных и тонких наблюдений за реальностью. В этом — основа основ его художественных принципов, и на этих принципах построена вся система организации творческого процесса в его студии. Отсюда удивительная жизненность и правдивость невероятных персонажей фильмов Диснея.

Натуральность всего происходящего в мультфильмах Диснея подчеркивается исключительной точностью изображения. Все показано, как в действительности. Все мельчайшие детали места действия, внешности персонажа, мимики, жеста, всякого импульса движения тщательно разработаны и обусловлены. До Диснея никто не обращал внимания на второстепенные подробности, как не имеющие якобы существенного значения, — а между тем каждая маленькая деталь усиливает ощущение правдоподобия видимого на экране.

В каждом кадре у Диснея учитывается, откуда падает свет и куда направлена тень. В его фильмах происходит невозможное, невероятное, — но оно происходит в строго реальной обстановке. Точность представления всего — от общего замысла, главного действия до последней крупинцы — неизменно отличает все сделанное Диснеем. Такова одна из существенных особенностей его творчества, привлекшая к нему общее внимание и завоевавшая огромный успех во всем мире. Дисней не изобрел мультипликационный фильм, но сделал его достоянием большого искусства, плодом подлинного и блестящего мастерства!

Принципы диснеевской анимации имеют гораздо более широкое применение, чем область анимационного кино. Основанные на общих закономерностях ощущений визуальной информации, они обеспечивают наилучший режим восприятия

Принципы диснеевской анимации были получены практическим путем, исходя из опыта конкретной повседневной работы. Они оказались столь эффективными, что их изучение стало обязательным сначала для всех аниматоров студии Диснея, а потом — и для аниматоров всего мира. В целом это наиболее полный набор технологических приемов, необходимых для создания образа и его динамики в анимационном фильме [58].

1. Сжатие и растяжение (Squash and Stretch). «Сквош» и «стретч» — это одно из самых важных открытий Диснея. Тем не менее оно практически не используется художниками-аниматорами, создающими современные компьютерные игры. Суть его состоит в том, что живое тело во время движения при каждом шаге (как и при любом действии) то немного сжимается, то вытягивается, то расширяется, то удлиняется вновь. Абрис такого персонажа постоянно «дышит», и это дыхание создает ощущение одушевленности как взаимосвязанности всех частей персонажа. Ощутимо сжимается присевшая фигура — в противоположность вытянутой фигуре в прыжке или в броске. Точно так же утолщается из-за напряженного бицепса согнутая рука, и она же становится тоньше (и на вид — длиннее) при распрямлении. Даже лицо, когда персонаж разговаривает, улыбается или просто меняет выражение, воспринимается живым, только если одновременно, скажем, с движением губ меняется форма щек, глаз, подбородка и даже ушей.

Аниматоры Диснея использовали для «сквоша» и «стретча» две оси — горизонталь и вертикаль. Наиболее важное правило при этом — неизменность общего «объема» персонажа: вертикальная растяжка компенсируется горизонтальным сплюсыванием, и наоборот. Персонаж уподобляется мешку с мукою: как его ни бросай, количество муки в нем остается постоянным. Такому мешку уподобляются все без исключения диснеевские персонажи: их тела постоянно «дышат», пульсируют, по их абрисам постоянно проходят плавные волны, а без этих эффектов тело персонажа как бы «каменеет».

2. Подготовка, или упреждение («отказное движение»). Перед тем как сделать любое резкое движение или физическое действие, человеку обычно необходима предварительная подготовка — как бы «упреждение» действия. Например, перед прыжком вверх обычно приседают, перед прыжком в длину — отходят назад, для броска руку с камнем отводят в направлении, противоположном будущему полету камня, перед ударом по мячу — ногу отводят назад. Тем самым создается мощное инерционное движение, которое обеспечивает силу для броска, толчка, удара. Такое подготовительное движение всегда совершается в направлении, противоположном задуманному, поэтому его называют «отказным движением»: персонаж вроде бы сначала отказывается от своего намерения, чтобы тем вернее его осуществить.

Принятию предшествует отрицание, положительным эмоциям — отрицательные, душевному подъему — спад и т. д. Этот общий принцип «отказного движения» распространяется в диснеевской анимации на все без исключения действия персонажа и также называется *упреждением*.

Зритель должен быть подготовлен к каждому последующему движению персонажа и ожидать его еще до того, как оно произойдет. Это достигается упреждением каждого основного движения особым жестом или движением, которое настраивает зрителя на то, что должно произойти.

3. Сценичность (Staging). Это — наиболее общий принцип, восходящий к далеким временам истории театра. Сценическое действие всегда рассчитано на внешнего наблюдателя, на следящего за происходящим зрителя, поэтому надо стремиться к тому, чтобы все было предельно ясным, понятным, узнаваемым. Выражение лица сценично, если оно хорошо читаемо; настроение персонажа сценично, если оно воздействует на зрителя. Характер персонажа должен быть узнаваемым, детали — хорошо заметными, реплики — разборчивыми, текст — доходчивым и т. д. Движение персонажа не должно скрадываться одеждами, смазываться неверным выбором угла зрения или оттесняться на второй план чем-то другим.

Принцип «отказного движения» действует также и в человеческой психологии. Очень часто, чтобы принять, например, новую идею, ее для начала необходимо раскритиковать, выявить ее недостатки

Дисней говорил своим аниматорам: «Работайте в силуэте, чтобы все было ясно видно. Не допускайте, чтобы рука заходила на лицо и не было видно, что происходит»

Иногда сценически выстроить движение можно только с помощью силуэта. Например, если грудь и рука персонажа — одного цвета, то рука на груди просто теряется, лишаясь выразительности. Точно так же светлые плечи, поднятые на фоне светлой части головы, сводят на нет жест пожимания плечами. Этого не нужно допускать.

4. Компоновки (Pose to Pose — «от позиции к позиции»). Один из аниматоров Диснея утверждал, что работа с компоновками была изобретена на студии Диснея. До этого аниматор просто фазовал (рисовал фазы движения) «прямо вперед», начиная с первого движения персонажа в сцене и последовательно делая рисунок за рисунком, что-то придумывая по мере продвижения, пока не закончит сцену. Аниматору в этом случае известна сюжетная линия, но он не слишком ясно представляет себе, как все это будет выглядеть конкретно. И рисунки, и само действие приобретают при таком способе анимации импровизационный характер, поскольку в течение всей работы сохраняется элемент неожиданности, неизвестности и новизны.

При работе же с компоновками аниматор заранее продумывает, планирует, размечает действие и делает лишь ключевые, наиболее выразительные и сложные фазы движения — компоновки. После этого сцена передается ассистенту для прорисовки промежуточных, более простых в исполнении фаз. Впоследствии такая компоновка воспринимается легко, она «срабатывает», поскольку все взаимосвязи и соотношения просчитаны прежде, чем аниматор с головой уйдет в работу. Основное внимание уделяется отработке самих компоновок и расчету времени движения.

При работе с компоновками достигается ясность действия и его напряженность, а при фазированном движении — большая спонтанность, эскизность, легкость. Часто последний подход более эффективен, чем слишком тщательное планирование, поскольку вносит элемент неожиданности в творческий процесс.

Работа с компоновками, по сути, реализована во многих программных пакетах для создания компьютерной анимации: достаточно создать кадры с первой и последней фазами движения или видом объекта, а также (иногда) выбрать в объекте «ключевые точки», и все промежуточные фазы рисуются автоматически

5. Сквозное движение, или доводка (Follow Through). Доводка и захлест действия (*Overlapping action*) используются для придания движению большей естественности, пластиности и непрерывности. Движение никогда не должно полностью прекращаться до того, как начнется следующее движение. «Сквозное» движение обеспечивает непрерывность хода повествования и согласованность отдельных эпизодов.

Доводка предполагает постепенное, не одновременное начало или прекращение движения различных частей тела персонажа в зависимости от их инерционности.

Захлест означает взаимное наложение движений или действий, их «пересечение», при котором одно действие постепенно переходит в следующее.

Аниматоры Диснея различали пять основных градаций доводки и захлеста:

- 1) хвосты, уши, длинные плащи и т. п. продолжают двигаться после того, как остальные части тела уже перестали двигаться;
- 2) само тело не двигается сразу, целиком; оно растягивается, сжимается, перекручивается, поворачивается, поскольку все его части работают несинхронно. Если при ходьбе движение начинается с бедер, то после того, как они начинают двигаться, приходят в движение ноги. Большинство крупных движений тела начинается с бедер, движение пальцев — с запястья, а при движении головы ведущими обычно являются глаза. Например, кисть или рука могут продолжать двигаться, когда само тело уже остановилось;
- 3) мягкие части тела персонажа (такие как щеки или тело Дональда либо почти все тело Гуфи) будут двигаться медленнее, чем части, имеющие, условно говоря, жесткий скелет. Это отставание в движении называют «оттяжкой» (*drag*). Она придает мягкость, нестесненность и свободу фигуре, создает ощущение ее жизненности. Если это хорошо сделано, то «оттяжка» практически не заметна при просмотре фильма, воздействуя исключительно на подсознание;

Для подчеркивания остановки персонажа необходимо, чтобы его голова, грудь и плечи останавливались одновременно, поскольку именно по этим частям тела зритель прежде всего судит о движении персонажа. И лишь затем останавливаются руки и ноги

4) доводка, или завершение действия, т. е. тщательная отработка концовки любого действия;
5) экспрессивная статика (буквально — «движущаяся статика») возникает, если компоновку персонажа без изменения держать на экране на протяжении 8–16 кадров (т. е. менее секунды). Этого времени достаточно для восприятия зрителем такой статики, как реакции персонажа. Если же компоновка удерживается без движения чуть дольше, то теряется иллюзия объема и картина обнаруживает свою плоскостность. Чтобы этого не происходило, используется не одна, а две близкие фазы, где вторая фаза является крайней степенью первой (глаза раскрываются еще шире, уши еще больше выдвигаются вперед, щеки округляются еще больше и т.д.), хотя сам персонаж остается в том же самом положении. Этот прием усиливает выразительность позы и прибавляет ей живости и экспрессии.

6. Смягчение начала и завершения движения (*Slow In* и *Slow Out* — «медленный вход» и «медленный выход»). При разработке компоновок аниматор добивается их максимальной выразительности и, конечно же, хочет сконцентрировать на них внимание зрителя. Для этого движение от одной компоновки к другой рассчитывается таким образом, чтобы основная часть времени приходилась на демонстрацию компоновок.

7. Дуги (*Arcs*). Это использование криволинейных траекторий естественного движения. Живые организмы крайне редко двигаются вверх-вниз или вперед-назад с механической точностью. Голова, например, редко вытягивается сразу вперед, а затем сразу назад, — она еще и слегка приподнимается или опускается. (Движение дятла, долбящего дерево, — одно из редких исключений из этого правила.)

Открытие движения по дугам произвело настоящий переворот в анимации. Раньше при ходьбе персонажи подскакивали вверх-вниз, как механические игрушки, — а теперь они описывают дугу в тот момент, когда нога при шагании находится в

наивысшей точке и когда она находится внизу. Удар или бросок может быть таким резким и коротким, что воспринимается как прямолинейный, но начало движения всегда развивается по плавной кривой. В некоторых случаях дуга может перейти в прямую линию, например для падающего предмета, но обычно даже когда перемещение идет вдоль прямой, объект подвергается повороту. Сквозное движение, доводка и захлест часто приобретают винтовой характер.

Когда этот принцип движения был открыт и понят, все фазы стали размещаться по дугообразным траекториям. Проблема же заключается в том, что сделать в рисунке движение по дуге намного труднее, чем просто изобразить персонаж на половине линейного пути между двумя соседними фазами. Даже если на крайних компоновках написано строгое предупреждение «Соблюдай дугу!», все равно остается сильное искушение сделать промежуточную фазу по прямой линии.

При медленном движении с большим количеством промежуточных фаз дуга траектории движения достаточно закруглена и выпукла. Если же движение быстрое, то дуга спрямляется. Чем быстрее движение, тем прямее дуга. Иногда это предпочтительно, но чаще траектория даже быстрого движения должна быть реализована в виде кривой или дуги.

Случайные, незапланированные мелкие движения персонажа или изменения выражения его лица, вздохи, короткие реплики сразу придают герою индивидуальность и выделяют его среди прочих персонажей

8. Дополнительное действие, или выразительная деталь (Secondary Action). Этот прием часто подкрепляет идею, воплощенную в сцене: печальный персонаж долго сморкается, отвернувшись; смущенный человек протирает очки, достает из портсигара папироску, поправляет галстук. Подобные детали называются *вторичным*, или *дополнительным действием*, которое всегда подчиняется главному. Если вторичное действие вступает в конфликт с основным или становится более интересным, — значит, неверно выбрана выразительная деталь или постановка не сценична.

Иногда вторичным действием является выражение лица. Когда основная идея передается движени-

ем тела, выражение лица становится подчиненным этой идеей. Например, персонаж переходит от смеха к сосредоточенности, двигаясь при этом. Опасность тут не в том, что выражение лица будет выделяться, а в том, что оно вообще не будет замечено. Изменение выражения лица должно происходить либо до, либо после движения. Смена же выражения во время перемещения вряд ли будет замечена, и его смысл потерянется.

Отсутствие дополнительных действий приводит к схематизации персонажей, их превращению в «функциональных роботов», по отношению к которым можно испытывать определенный азарт, но не сопереживание.

9. Расчет времени (Timing). Это — определение интервала между действиями для подчеркивания веса, размера и характера персонажа. Количество фаз, использованных для любого движения, определяет время, которое данное действие займет на экране. Расчет интервалов времени, с помощью которого выбирается скорость движения, очень важен, так как он придает смысл движению. Выбором скорости действия определяется, насколько идея, заложенная в действии, будет понята зрителем. При расчете времени учитывается вес и размер объекта, а также его внутреннее состояние.

Важно задать достаточно времени, чтобы подготовить зрителя к ожиданию действия, к самому действию и к реакции на действие. Если для этого выделяется слишком много времени, то внимание зрителя рассеивается. Если же времени мало, то действие может закончиться, прежде чем зритель его заметит, и смысл действия будет утрачен.

При ускорении движения очень важно быть уверенным, что зритель сможет уследить за происходящим. Действие не должно быть настолько быстрым, чтобы остаться за порогом осознания.

Расчет времени более, чем другие принципы, задает вес и размер объекта. Два объекта, одинаковые по размеру и форме, могут казаться разными по весу, если менять хронометраж их движения. Например, требуется много сил, чтобы заставить пере-

Верный расчет времени — это ключевой момент для восприятия экранного образа зрителем

мещаться пушечное ядро, но, начав движение, оно продолжает двигаться с постоянной скоростью, и нужно приложить много усилий и времени, чтобы остановить его. Легкие же объекты требуют меньше времени для преодоления своей инерционности: достаточно задеть пальцем воздушный шарик, чтобы он отлетел в сторону, но, имея малую инерцию, он быстро останавливается даже из-за трения о воздух. Расчет времени влияет также на передачу размера и масштаба объекта или персонажа: великан имеет больший вес и большую инерцию, чем обычный человек, поэтому он сдвигается с места медленнее, так же как и любое изменение в движении для него происходит медленнее. И наоборот, маленький персонаж имеет меньшую инерцию, чем обычный, так что его движения должны быть более быстрыми и порывистыми.

Манера поведения объекта на экране, ощущение его веса целиком зависят не от прорисовки отдельных фаз, а от времени промежутков между ними. Не слишком важно, как изображено пушечное ядро: оно все равно не будет похоже на пушечное ядро, если не будет вести себя в соответствии с присущим ему весом и инерционностью! И то же самое верно для любого объекта и персонажа.

Эмоциональное состояние персонажа также больше определяется его движениями, чем внешностью. А изменение скорости движения может показывать, что персонаж утомлен, возбужден, нервничает или отдыхает. Старейшие аниматоры Уолта Диснея — Томас Фрэнк и Олли Джонстон — приводят следующий пример того, как изменение продолжительности одного и того же действия меняет его значение: «Всего лишь два рисунка головы, первый — изображающий наклон головы к левому плечу, а второй — к правому — могут передавать огромное количество разных состояний, полностью зависящих от того, какая продолжительность движения была использована». При этом каждая промежуточная фаза, добавленная между этими крайними положениями головы персонажа, придает действию новый смысл:

- промежуточных фаз нет — персонаж получил удар страшной силы, ему почти снесло голову;
- одна промежуточная фаза — удар кирпичом, скалкой, сковородкой;
- две промежуточные фазы — у персонажа первый тик, спазмы мышц или судороги;
- три промежуточные фазы — персонаж уклоняется от удара кирпичом, скалкой, сковородкой;
- четыре промежуточные фазы — персонаж кивком головы отдает отрывистый приказ (типа «Иди!», «Толкай это!»);
- пять промежуточных фаз — персонаж более дружелюбен: «Сюда, пожалуйста» или «Давайте скорее»;
- шесть промежуточных фаз — персонаж увидел привлекательную девушку или спортивный автомобиль, который ему всегда хотелось иметь;
- семь промежуточных фаз — персонаж старается что-то получше разглядеть;
- восемь промежуточных фаз — персонаж, например, ищет ореховое масло на кухонной полке;
- девять промежуточных фаз — персонаж оценивающе задумался;
- десять промежуточных фаз — персонаж потягивает ноющие мышцы.

Уолт Дисней говорил, что если персонаж должен быть печальным, надо сделать его мрачным. Счастливый персонаж будет ослепительно сияющим, беспокойный — раздраженным, неистовый — необузданым

10. Преувеличение, утрирование. Это — выделение главного в замысле через постановку и действие. Диснеевские аниматоры вспоминают, что Уолт требовал от них больше реализма, при этом на самом деле стремясь к «карикатурному реализму». Под утилизацией Дисней понимал выделение и подчеркивание главного в замысле через постановку и действие. В анимации утилизированное, преувеличенное больше говорило зрителю: аниматор подчеркивает главные черты, выделяет суть любого объекта так, чтобы зрители это восприняли.

Для образов анимации присущи воздействия в диапазоне слабых эмоций (интереса, лирики, стыда). С помощью преувеличения в определенной сте-

Для аниматора зачастую недостаточен опыт художника комиксов, поскольку рисунок в анимации важен не сам по себе, но как элемент движущегося изображения

пени достигается усиление эмоционального воздействия.

11. «Крепкий» (профессиональный) рисунок. Один из аниматоров Диснея, подчеркивая важность высокопрофессионального владения искусством рисования, говорил: «Рисовать — это все равно что устраивать представление; художник — это актер, который не стеснен рамками собственного тела и которого ограничивает только умение и, может быть, опыт».

Одна из табличек, висевших на студии Диснея, вопрошала: «Чувствуются ли в твоем рисунке вес, глубина и равновесие?», напоминая об основах классического рисунка. Другая табличка предостерегала от появления «близнецов» в рисунках — когда обе руки или обе ноги персонажа не только симметричны, но и делают одно и то же. Никто не делал этого нарочно, обычно художник даже не предполагает, что у него так получится.

12. Привлекательность (Appeal). Привлекательным может быть любой предмет, если зритель смотрит на него с удовольствием, обнаруживая в нем обаяние, простоту, хороший дизайн, понятность и притягательность, очарование и магнетизм.

Персонаж, обладающий привлекательностью, привлекает и удерживает взгляд. Дисней считал, что привлекательным должен быть любой персонаж: злодей, пусть даже страшный и трагический, все равно должен обладать привлекательностью, иначе вам не захочется смотреть, что он делает. Уродливый, отвратительный персонаж должен притягивать взгляд вне зависимости и связи с ситуацией и со своим характером.

Также привлекательными могут быть выражение лица, персонаж, движение или вся ситуация в целом, весь сюжет. Однако если, например, аниматор будет стараться передать слишком тонкие оттенки в выражении лица персонажа, то рисунок может стать плохо воспринимаемым.



Мультимедийное резюме

Подведем итоги и перечислим основные моменты, имеющие практическое значение при построении мультимедийных систем с использованием видео и анимации.

- Восприятие реально движущегося предмета ощущается благодаря непрерывной фиксации глаз на этом предмете так, чтобы предмет попадал в область наилучшего зрения. Из-за такого способа восприятия появляется несколько существенных закономерностей:
 - движение объектов сцены фиксируется боковым зрением медленнее, чем центральным. Однако периферическое зрение менее инерционно и лучше замечает мелькания;
 - объект воспринимается как движущийся, если его скорость находится в пределах от одной угловой минуты до примерно 30 градусов в секунду, в зависимости от наличия неподвижных ориентиров;
 - при фиксированном взгляде изменение размеров изображения объекта на сетчатке не приводит к ощущению изменения самого объекта, а вызывает ощущение движения. При этом если размер объекта меняется не из-за его движения, а из-за движения головы наблюдателя, то ощущение движения объекта не появляется;
 - при уходе движущегося объекта из области наилучшего зрения человек не способен отслеживать движение еще около 200 мс (*латентный период*), пока он снова не зафиксирует глаза на объекте;
 - при движении объекта к лицу или от него на сетчатках левого и правого глаз формируются различные изображения (*диспарантиность*). Чтобы избежать этого, непроизвольно подключаются так называемые *вергентные движения*, заставляющие глаза двигаться к переносице или к вискам.
- Кроме физиологических особенностей восприятия движения необходимо отметить психологи-

ческие. Существуют кинетические неподвижные положения, которые, тем не менее, создают ощущение «застывшего» движения, — например, поднятая нога или отведенная рука.

- На основе накопленного опыта у человека складывается представление о том, что обычно движется меньшая фигура на большем фоне, а не большая на меньшем, и что движущаяся фигура чаще изменяется, чем фон, который обычно остается неизменным.
- Для технологий мультимедиа и для киноиндустрии важнейшим физиологическим свойством зрения является его *инерционность*, вследствие чего мгновенное исчезновение воздействующего на глаз стимула не приводит к такому же мгновенному исчезновению сигналов в зрительном нерве и зрительном центре мозга. Этот эффект называется *послевидением*, и на нем основаны все способы дискретной демонстрации отдельных кадров так, чтобы они сливались в единое движущееся изображение.
- Для достижения эффекта послевидения необходимо определить минимальную критическую частоту мельканий. Законы Тальбота, Блоха–Шарпантье и Блонделя–Рея описывают закономерности инерционности человеческого зрения, из которых можно получить практические значения критической частоты.
- Появление у наблюдателя нужной иллюзии движения во многом достигается благодаря управлению съемочной камерой, выбору правильных планов движения. В кинематографе традиционно различают крупные, средние и общие планы, каждый из которых дает свое ощущение перспективы.
- Обособленным от натурных съемок является искусство мультипликации и компьютерной анимации. В нем выделяются такие принципы, как фазирование рисованного (или смоделированного в трехмерной среде) движения объектов и персонажей, правильное определение хронометража

показа фаз, соблюдение физических законов движения.

- Рассмотренные в данной главе принципы диснеевской анимации имеют гораздо более широкое применение, чем область анимационного кино. Основанные на общих закономерностях ощущений визуальной информации, они обеспечивают наилучший режим восприятия.



Контрольные вопросы и задания

1. Какова разница в минимально различимой скорости движения объектов при наличии неподвижных ориентиров и без них?
2. Почему при повороте головы не возникает ощущения движения объектов?
3. Приведите свои примеры нистагма и кинетических положений.
4. Какие существуют виды инерционности зрения?
5. При каких условиях закон Блонделя–Рея переходит в закон Блоха–Шарпантье?
6. Какой из планов съемки вы будете применять при интервью? Почему?
7. Какие физические законы движения тел должны учитываться при создании анимации?

Глава 9

Визуальная избыточность и сжатие видеосигналов

- Предпосылки сжатия с потерей качества
- Коэффициент сжатия данных
- Виды избыточности видеосигнала
- Психофизиологические причины сжатия
- Способы возможного повышения компрессии
- Объективная и субъективная оценка качества
- Характерные дефекты методов сжатия

Одна из актуальнейших тем современных мультимедиа-технологий — это разработка эффективных методов сжатия видеинформации. Она очень важна в силу целого ряда причин:

- в современных мультимедиа-приложениях на долю видеоданных приходится, как правило, не менее половины общего объема данных;
- видеопоследовательности без сжатия занимают очень большие объемы на носителях данных, и это оказывает критическую нагрузку на все подсистемы современных компьютеров, несмотря на постоянный рост их производительности;
- анализ цифрового содержимого видеорядов показывает, что они содержат много избыточных данных, — например, повторяющихся от кадра к кадру областей при съемке неподвижной сцены или мелких, почти незаметных для зрителя деталей;
- эффективность методов сжатия без потерь качества (например, лежащих в основе популярных

программ-архиваторов) недостаточна для представления больших объемов видеоданных.

Поэтому перед мультимедиа-индустрией возникла проблема разработки *методов сжатия данных с частичной потерей качества*. При этом предполагалось, что вследствие особенностей человеческого восприятия часть данных в сжатом файле может быть опущена без значительного ухудшения субъективного восприятия видеосигнала.

Разработка таких методов сжатия началась в 1970-х гг., и уже в 1980-х гг. первые такие алгоритмы начали использоваться повсеместно. Исследования же по созданию все более эффективных методов сжатия ведутся постоянно.

Сжатие данных. Избыточность данных

Термин «сжатие данных» означает уменьшение объема данных, используемого для представления определенной информации. (Напомним, что понятия «данные» и «информация» различаются — см. главу 1. Данные фактически являются средством, с помощью которого передается информация, и для представления одного и того же количества информации может быть использовано различное количество данных.)

В зависимости от функции интерпретации данных, различные сообщения, содержащие одну и ту же информацию, могут занимать различный объем. В этом случае говорят об избыточности данных. Последняя является центральным понятием цифрового сжатия данных. Это — не просто абстрактное понятие, но и измеримая математическая категория. Пусть n_1 и n_2 — количество элементов — носителей информации в двух наборах данных, представляющих одну и ту же информацию. Тогда относительная избыточность данных R_D для первого набора (характеризуемого значением n_1) по отношению ко второму набору может быть определена как

$$R_D = 1 - \frac{1}{C_R},$$

где величина C_R , обычно называемая *коэффициентом сжатия*, равна:

$$C_R = \frac{n_1}{n_2}.$$

Если $n_1 = n_2$, то $C_R = 1$ и $R_D = 0$, что говорит о том, что первый способ представления информации не содержит избыточных данных по сравнению со вторым. Если же $n_2 < n_1$, то $C_R \rightarrow \infty$ и $R_D \rightarrow 1$, что означает значительное сжатие и высокую избыточность данных первого набора по отношению ко второму.

На практике коэффициент сжатия, такой как 10 (или обозначаемый как 10:1), означает, что первый набор данных (в среднем) содержит 10 единиц хранения информации (например, байтов) на каждую одну единицу второго (сжатого) набора данных. Соответствующее этому значение избыточности 0,9 означает, что 90% данных первого набора являются избыточными.

В задаче цифрового сжатия видеосигналов различаются (и могут быть использованы) три основных вида избыточности данных:

- пространственная избыточность (spatial redundancy)* — в пределах одного кадра многие пиксели, особенно относящиеся к фону, имеют одинаковый цвет;
- временная избыточность (temporally redundancy)* — одни и те же пиксели не меняют свой цвет от кадра к кадру, — например, при съемке медленно движущихся объектов;
- визуальная цветотяркостная избыточность* — наличие в видеосигнале данных, которые в силу психофизиологических причин практически не воспринимаются зрителем, — например, очень темные объекты на черном фоне.

Сжатие данных достигается, когда сокращается или устраняется избыточность одного или нескольких вышеуказанных видов.

Мультимедиа-данные не имеют однозначной интерпретации в силу их природы — назначения воздей-

ствовать на органы чувств человека. Поэтому нельзя заранее предсказать, как зрителем будут интерпретированы два различных сообщения, содержащих одну и ту же мультимедиа-информацию.

В зависимости от особенностей работы методов сжатия с потерей качества и степени компрессии различают:

- *сжатие без заметных потерь* с точки зрения восприятия зрителя;
- *сжатие с естественно воспринимаемой потерей качества*, которое характеризуется появлением воспринимаемых глазом при внимательном рассмотрении, но незначительных искажений изображения. Они проявляются в уменьшении детализации сцены или, например, в незначительных блочных искажениях изображения. Однако такие «артефакты» даже при достаточно больших коэффициентах сжатия мало влияют на зрительное восприятие видеосигнала;
- *сжатие с неестественной потерей качества* характеризуется заметными в более чем 50% случаев потерями качества, — например, с нарушением одной из самых важных с точки зрения восприятия характеристики изображения — контуров. При высоких коэффициентах компрессии многие методы вносят в кадр блочные искажения или размывают контуры, что существенно влияет на восприятие видеосигнала зрителем.

Использование специфики восприятия в методах сжатия

Большинство существующих методов сжатия с частичной потерей качества опирается на психофизиологические особенности восприятия, рассмотренные в данной книге. Перечислим их в порядке убывания их вклада в компрессию видеосигнала.

В связи с преобладающим присутствием в сетчатке палочек яркостная информация воспринимается человеком более чутко и с более быстрой реак-

цией на изменение, чем цветовая. Кроме того, человеческий глаз способен одновременно различать сравнительно небольшое количество цветов, по разным оценкам — от 100 до нескольких тысяч. Поэтому в сжатом видеосигнале используют так называемое *цветовое прореживание*, когда на каждые четыре отсчета по яркости в кадре приходится всего один или два отсчета по цветности. Эти схемы обычно записывают отношениями трех чисел, например 4:2:2 или 4:1:1, характеризующими соотношение количества отсчетов яркости с количеством отсчетов цветности (точнее, так называемых *цветоразностных компонентов*) того же участка изображения.

Кроме того, поскольку зрачок глаза является диафрагмой, зрение более чувствительно к скорости изменения общей яркости фона, чем к ее абсолютно- му значению. Следовательно, без особого вреда для восприятия можно снизить точность представления внутrikадровой яркости фона.

Так как зритель медленнее воспринимает информацию о мелких деталях, чем о крупных областях или объектах, специальный математический аппарат типа *вейвлет-* или *дискретного косинус-преобразования* понижает *детализацию сцены*. Обоснованность этого приема подтверждается, как минимум, тремя психофизиологическими причинами:

- в человеческом глазе количество рецепторов на сетчатке глаза сильно преобладает над количеством передающих нейронов. Поэтому информация на один нейрон передается сразу от группы соседних рецепторов, что существенно осложняет человеку возможность отличить скопление мелких предметов от единого целого;
- наилучшая острота зрения, как и наилучшее восприятие цветов, обеспечивается только вблизи центральной ямки, на которую приходится не более 20 угловых минут. Поэтому при наблюдении сцены пользователь не способен различить детали одновременно на всем изображении, а вынужден рассматривать его по частям;
- пропускная способность зрительной системы недостаточно высока (вспомним про гипотезу о пе-

редаче зрительных импульсов аналогично ряду Фурье): вначале в головной мозг передается низкочастотная информация о фоне и крупных объектах, а затем — высокочастотная о деталях сцены.

Далее, в сжатом видеосигнале контуры объектов можно представлять с меньшей геометрической точностью по сравнению с исходным сигналом, потому что информация о деформации контуров улавливается зрительной системой с гораздо меньшей скоростью, чем информация об изменении цвета или яркости. Особенностью восприятия контуров является низкая чувствительность к незначительным искажениям контурных линий без изменений направлений изгиба. Однако не нужно при этом забывать, что человеческое зрение очень чувствительно к присутствию самих линий или граней, а точнее — к резким перепадам яркости и цветности, что и вызывает ощущение восприятия границы объекта. Главные точки фиксации взгляда всегда располагаются вблизи контуров объектов, потому что одна из главных функций зрительной системы — обнаруживать и идентифицировать физические объекты — других людей, потенциальные угрозы и др. Такие объекты для человека ограничены легко распознаваемыми гранями. Следовательно, действие метода сжатия, который размывает, уничтожает или искусственно создает грани в изображении, сильно заметно для зрителя, особенно если искаженная кромка не интерпретируется человеческим зрением как граница объекта.

Все перечисленные приемы касались в основном внутrikадрового понижения визуальной избыточности. Однако существуют подходы и к устраниению межкадровой (временной) визуальной избыточности.

Напомним, что для технологий мультимедиа и киноиндустрии важнейшим физиологическим свойством зрения является его инерционность, вследствие чего мгновенное исчезновение воздействующего на глаз стимула не приводит к такому же мгновенному исчезновению сигналов в зрительном нерве и зрительном центре мозга. Этот эффект называется послевидением, и на нем основаны все спосо-

бы дискретной демонстрации отдельных кадров так, чтобы они сливались в единое движущееся изображение.

Исходя из минимально различимой частоты кадров, в некоторых ситуациях методы сжатия снижают количество кадров в секунду или вставляют между кадрами высокого качества по нескольку кадров с более высокой компрессией, которые при непрерывном показе сливаются для зрителя в одну движущуюся картину без значительного ухудшения восприятия. Такие кадры высокого качества называются *опорными*.

Перспективы повышения эффективности методов сжатия

Большинство широко используемых психофизиологических предпосылок в существующих методах сжатия относятся к *геометрическим* (мелкие детали и грани), *инерционным* (частота кадров) и *цветовым* (общее снижение точности передачи цветов). Однако большинство этих предпосылок уже задействовано максимально и дальнейшее повышение эффективности методов сжатия достигается не за счет расширения количества предпосылок, а благодаря новым математическим методам обработки видеосигнала, обеспечивающим более высокую степень сжатия. Тем не менее использование *адаптивных методов*, учитывающих локальные нечувствительности восприятия отдельных составляющих видеосигнала, может серьезно повлиять на степень компрессии.

Рассмотрим перспективы учета в методах сжатия яркостных и цветовых особенностей человеческого зрения.

Как мы знаем, зрительная система адаптируется к среднему уровню освещенности за счет сокращения динамического диапазона сигналов — возможных возбуждений. Глаз более чувствителен к изменению яркости вблизи уровня общей яркости фона и менее чувствителен при больших различиях яркос-

тей. Начиная с некоторого момента все области ярче или темнее субъективного диапазона кажутся белыми или черными.

Поэтому первый возможный прием устранения внутрикадровой избыточности — это снижение точности представления локальных яркостей, сильно отличающихся от средней яркости фона в кадре. Например, в яркой сцене нет необходимости передавать с высокой точностью перепады яркостей на темных участках сцены: по мере приближения окраски каждого пикселя к черному его оттенок становится менее заметным. А так как глаз менее чувствителен к изменению яркостей больших площадей, чем маленьких, можно также сократить точность представления яркостей больших однотонных участков сцены.

Общий максимум чувствительности зрительной системы по яркости лежит в области 555 нм (желто-зеленая область). Как в сторону коротких волн (сине-фиолетовая), так и в сторону длинных волн (красная область) яркостная чувствительность зрительной системы падает. Следовательно, яркость фиолетовых и красных участков сцены можно передавать с более низкой точностью, чем яркость желто-зеленых областей.

В темных сценах, наоборот, желательно соблюсти хорошую передачу яркости, однако можно получить дополнительный выигрыш на цветности и геометрии. Это объясняется спецификой скотопического ночного зрения — его ахроматичностью (палочки, которые в основном работают в условиях слабой освещенности, не способны различать цвета и позволяют различать только яркость) и низким пространственным разрешением. Кроме того, поскольку содержащийся в палочках белок родопсин, (зрительный пурпур) имеет максимум поглощения в области 500 нм (сине-зеленый свет), яркость красно-желтых областей на темных сценах также можно представить меньшим количеством данных.

При быстрой смене ярких и темных сцен необходимо предусматривать определенное время на адаптацию глаз. Для смягчения восприятия рекомендуется пропорционально менять среднюю яркость все-

го изображения, если при смене сцены меняется средняя яркость основного передаваемого объекта. При нарушении этой рекомендации выигрыш по сжатию может заключаться во временному резком огрублении яркости сцены, постепенно уменьшающемся по мере адаптации глаза к среднему уровню яркости новой сцены.

Яркие цвета для заднего плана теряют свою эффективность, потому что на нечетко сфокусированном фоне либо на объектах, кажущихся на расстоянии мелкими, тона от соседних объектов могут смешиваться, разбавляя любые отчетливые, привлекающие внимание цвета, которые иначе были бы видны вблизи. Адаптивный метод выделения объектов заднего плана мог бы результативно использовать эту особенность восприятия.

Рассмотрим также перспективы использования в методах сжатия временных особенностей зрения.

Восприятие объективно движущегося предмета ощущается за счет непрерывной фиксации глаз на этом предмете так, чтобы предмет попадал в область наилучшего зрения, а при уходе движущегося объекта из области наилучшего зрения человек не способен отслеживать движение еще около 200 мс, пока снова не зафиксирует глаза на объекте. Кроме того, объект воспринимается как движущийся, если его скорость находится в пределах от одной угловой минуты до примерно 30 градусов в секунду, в зависимости от наличия неподвижных ориентиров.

Следовательно, очень быстро движущиеся объекты или смещающиеся из области наилучшего зрения на периферическую можно представлять с меньшим качеством как минимум в течение 200 мс (4–5 кадров при телевизионной частоте 25 кадров в секунду). А поскольку движение объектов сцены фиксируется боковым зрением более медленно, чем центральным, то адаптивный метод сжатия может представлять периферийное движение не так детально.

Также на основе накопленного опыта у человека складывается представление о том, что движущаяся фигура чаще изменяется, чем фон, который обычно

остается неизменным. Поэтому контуры изменения фоновых областей могут быть представлены с меньшим качеством, чем центральные объекты сцены.

Субъективное оценивание качества видеоизображения

В цифровых видеосистемах, использующих методы компрессии видео с частичной потерей качества, точность представления отдельных кадров постоянно изменяется в зависимости от визуальной сложности изображения, пропускной способности канала и т. п. Поэтому методы оценки качества видео и статичных изображений различны.

Распространенные методики оценки качества видеосигнала обычно делятся на две большие группы: *субъективное тестирование* коллективом экспертов и *автоматизированное измерение объективных характеристик (метрик)* видеопоследовательности.

Кардинальное различие между этими группами заключается в том, что объективные характеристики при повторном измерении воспроизводятся идентичными, в то время как субъективные оценки зависят от очень многих факторов (*аналитически вариабельны*), и один и тот же эксперт может дать в различных условиях наблюдения разные оценки одному и тому же видеоролику. Тем не менее сами по себе объективные метрики не могут полностью охарактеризовать качество работы того или иного метода сжатия: они не показывают, какие ошибки зритель заметит в первую очередь (рис. 9.1). Видеосигнал с более высокими метрическими характеристиками даже может по-

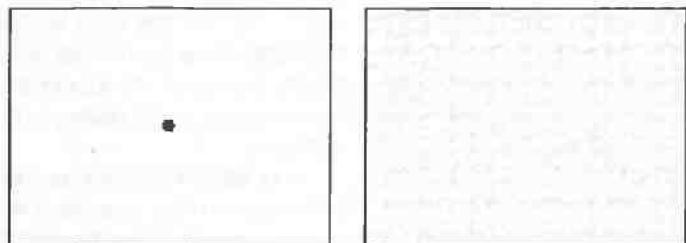


Рис. 9.1. Какой из дефектов на первоначально полностью белом кадре зритель заметит быстрее?

казаться более искаженным [59]. Поэтому конечное слово всегда будет за зрителем — пользователем этих методов. Комплексная оценка любого нового метода сжатия видео с потерей качества всегда содержит как количественные показатели метрик качества, так и качественные, субъективные оценки пользователей.

При субъективном тестировании необходимо контролировать большое количество разнообразных параметров, включая отбор и проверку участников, а также обеспечение одинаковых условий просмотра для всех зрителей. Рекомендуется включать в эксперимент по меньшей мере 2, а если возможно, то 3 или 4 повторения (включая повтор идентичных условий наблюдения).

Возможное количество экспертов — участников тестового просмотра может составлять от 4 до 40; при этом количество 4 — это абсолютный минимум по статистическим соображениям. Участники не должны заниматься оценкой качества изображений и видео в своей основной деятельности и не должны быть опытными экспертами. Перед тестом эксперты обычно должны быть проверены на нормальную остроту зрения и нормальное цветовосприятие.

Существует стандарт Международного союза электросвязи (ITU) на формальное субъективное тестирование качества изображения — рекомендация *ITU-R BT.500 «Методика субъективной оценки качества телевизионного изображения»* [60]. В этом стандарте описано несколько методов субъективного измерения качества видеоизображения. Рассмотрим некоторые из них.

Метод измерения под названием «Шкала деградации с двумя стимулами» (*Double Stimulus Impairment Scale*) [61] заключается в следующем. Участники просматривают эталонную сцену без потери качества, а затем — ту же сцену после ее обработки в тестируемой системе. Каждый участник оценивает деградацию (ухудшение качества) изображения сцены после ее обработки одним числом по пятибалльной шкале «степени раздражения» из-за дефектов, проявившихся из-за применения сжатия:

- 1 — очень раздражает;
- 2 — раздражает;
- 3 — слегка раздражает;
- 4 — заметно, но не раздражает;
- 5 — незаметно.

При этом баллы выставляются для некоторого количества различных сцен.

В другом варианте этого метода каждый участник оценивает качество обеих сцен в паре «эталон — после обработки», не зная при этом, какая из них является эталонной, а затем анализируется разница оценок для каждой пары сцен.

В другой группе методик из рекомендации BT.500 зрителям предлагается оценить обработанные тестовые сцены, а эталонные им не показывают. В этих методиках «с одним стимулом» одна и та же тестовая сцена может предъявляться участнику один или несколько раз. Используется либо описанная выше пятибалльная шкала, либо 9- или 11-балльная цифровая шкала.

Метод «Непрерывная оценка качества с одним стимулом» (*Single Stimulus Continuous Quality Evaluation*) предусматривает, что зритель непрерывно оценивает одну программу длительностью 10–20 мин, а не серию тестовых сцен. Зрительские рейтинги записываются несколько раз в минуту.

Метод *попарного сравнения* (*PC*) требует, чтобы тестовые последовательности представлялись парами, которые состоят из одной и той же последовательности, обработанной одним методом сжатия, а затем — другим методом [62]. Тестируемые методы (*A*, *B*, *C* и т.д.) в общем случае объединены во всех возможных $n \cdot (n-1)$ комбинациях: *AB*, *BA*, *CA* и т.д. Поэтому все пары последовательностей должны быть показаны в обоих возможных порядках (например, *AB* и *BA*). После показа каждой пары экспертом выставляется оценка (рис. 9.2).

Кроме прямой оценки качества видео по пятибалльной шкале, существуют также дополнительные размерности оценок, которые нужны для получения информации о специфических характеристи-

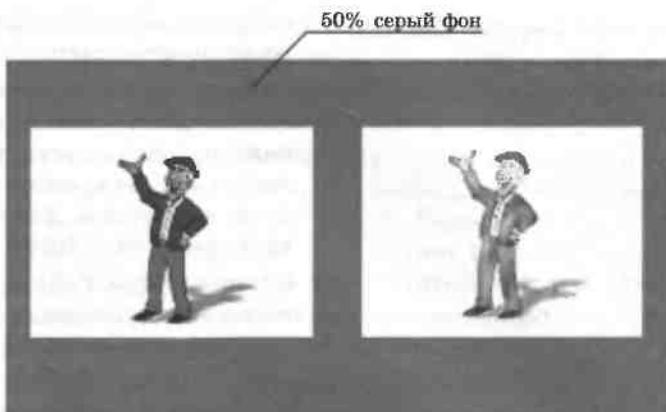


Рис 9.2. Метод попарного сравнения качества методов сжатия

ках оцениваемых методов. Примеры размерностей оценок, которые могут оцениваться для определения факторов, вносящих вклад в воспринимаемое качество, приведены ниже:

- яркость;
- контраст;
- цветово-спроизведение;
- четкость контуров / ореол;
- стабильность фона;
- плавность перемещения объектов сцены;
- дрожание;
- эффект муара (размытия);
- эффект «снега» или «комаров» (мелких «артефактов» на изображении);
- двоение изображения / «тени».

Присутствие в списке некоторых размерностей (например, эффект «снега») связано с наиболее распространенными дефектами стандартов группы *MPEG*, которые широко применяются в видеовещании и телевидении.

К числу характерных дефектов *MPEG*-алгоритмов также относятся:

- «танцующие глаза» (*Dancing Eyes*) — при *MPEG*-кодировании иногда теряются мелкие детали человеческого глаза; в результате в отснятом материале вдруг проявляются моргание или

слезы, хотя в действительности ничего подобного не происходило;

- призрачные следы (*Ghostly Trails*)** — этот дефект заключается в появлении облака частиц, сопровождающего движущиеся элементы, — это либо «хвосты», следующие за взмахом руки или бегущим человеком, либо зыбкие переливающиеся границы вокруг быстро движущегося объекта;
- блочность (*DCT Blockiness*)** — на значительной части экрана заметны правильные квадраты размером 8×8 (или 16×16) пикселей. Они, как правило, проявляются при высоких степенях компрессии, когда метод сжатия сильно огрубляет не только высокие, но и низкие частоты изображения;
- шевелящийся фон (*Busy Background*)** — обычно неподвижные области фона (и некоторые элементы переднего плана) кажутся «живыми» или «шевелящимися», как будто маленькие цветные частицы бродят по их поверхности. Его техническое название — **квантизационный шум**. Сюда же можно отнести **эффект танцующих цветов (*Dancing Colors*)**, когда ошибки в оценке движения могут вызывать переливающуюся цветную радугу на больших поверхностях движущихся одноцветных предметов;
- двойные границы** — контуры объектов оказываются сдвоенными или строенными из-за размытых ореолов, отстоящих от оригинала на некотором расстоянии. Традиционно это связывают с так называемым **эффектом Гиббса** — появлением осцилляции вблизи скачков яркости или цветности в видеосигнале из-за особенностей применяемых математических алгоритмов.

Знание характерных дефектов методов сжатия может помочь пользователю быстрее оценить качество видеосигнала в мультимедиа-продуктах.

Мультимедийное резюме

Эта глава посвящена рассмотрению вопросов одной из самых актуальных областей мультимедиа — разра-

Эффект Гиббса —
размытые ореолы по
границам резких пе-
реходов цветов в изо-
бражении



ботке методов сжатия с частичной потерей качества оригинала. Предполагается, что потеря некоторых данных для зрителя будет или полностью незаметной, или заметной в незначительной степени.

- Термин «*сжатие данных*» означает уменьшение объема данных, используемого для представления определенной информации. Рассматриваются понятия коэффициента сжатия и избыточности данных, которую обычно подразделяют на объективные пространственную и временную и на субъективную визуальную избыточность.
- Субъективное восприятие качества методов сжатия можно условно разделить на сжатие без заметных потерь, сжатие с естественно воспринимаемой потерей качества и с неестественной потерей качества.
- Из обычно используемых методами сжатия особенностей восприятия выделяют:
 - более низкую цветовую чувствительность, чем яркостную;
 - более высокую чувствительность к скорости изменения общей яркости фона, чем к ее абсолютному значению;
 - менее быстрое восприятие мелких деталей, чем крупных областей и объектов;
 - более низкую скорость восприятия деформации контуров, чем информации об изменении цвета или яркости;
 - инерционность зрения, не позволяющую различать отдельные кадры при скорости показа выше критической.
- Существует также ряд психофизиологических особенностей, которые практически не используются современными методами сжатия. Однако адаптивные алгоритмы, опирающиеся на такие особенности, могли бы повысить степень сжатия при аналогично воспринимаемом качестве видеосигнала:
 - снижение точности представления локальных яркостей, сильно отличающихся от средней яркости фона в кадре;

- снижение точности представления яркостей больших однотонных участков сцены;
 - передача яркости фиолетовых и красных участков сцены с более низкой точностью, чем яркости желто-зеленых областей;
 - снижение цветности и точности передачи контуров в темных сценах;
 - снижение точности представления яркости красно-желтых областей на темных сценах;
 - временное огрубление яркости сцены при резких сменах ярких и темных сцен;
 - снижение точности передачи объектов заднего плана и их яркости;
 - менее детальная передача движения объектов сцены, фиксируемых боковым зрением;
 - временная (до 200 мс) пауза в передаче объектов, смещающихся из области наилучшего зрения на периферическую;
 - представление с меньшим качеством изменения контуров фоновых областей.
- Рассмотрены вопросы оценивания качества видеосигналов с точки зрения объективных, повторяемых методик и субъективных экспертных оценок. Обращено внимание на ситуации, когда сигнал с хорошими объективными оценками может плохо восприниматься наблюдателями.
 - Выделяют несколько методов субъективного измерения качества видеоизображения: шкалу деградации с двумя стимулами, непрерывную оценку качества с одним стимулом, попарное сравнение и др.
 - Дополнительные размерности оценок позволяют обратить внимание на специфические аспекты работы конкретных методов сжатия, — например, на характерные дефекты MPEG-сигналов. Знание характерных дефектов методов сжатия может помочь пользователю быстрее оценить качество видеосигнала в мультимедиа-продуктах.



Контрольные вопросы и задания

1. Какова главная предпосылка появления методов сжатия видеосигналов с частичной потерей качества?
2. Приведите примеры избыточности мультимедиаданных других типов, — например, звуков, тактильных и обонятельных ощущений.
3. К какому виду избыточности нужно отнести слабое различение движения яркого объекта на ярком фоне?
4. Какими причинами обусловлено понижение детализации сцены? До каких относительных пределов можно понижать детализацию?
5. Какие существуют виды устранения межкадровой визуальной избыточности?
6. Опишите основные идеи, использование которых может повысить эффективность существующих методов сжатия.
7. При каких условиях видеосигналы, «хорошие» с точки зрения объективных методик измерения качества, могут плохо восприниматься зрителем?
8. Какие требования предъявляются к участникам оценивания при наборе экспертной группы?
9. Для чего нужны дополнительные размерности оценок? Какими они бывают?

Глава 10

Органы слуха. Психоакустическая модель

- Устройство слухового анализатора
- Эффект маскирования
- Восприятие объемного звука
- Психофизиология восприятия звука
- Звуки, не существующие в природе
- Цифровое представление звука

Звук — это тоже один из важнейших представителей мультимедиа-данных, вносящий второй по значимости после зрения вклад в информацию, получаемую головным мозгом с помощью мультимедиа-устройств. Однако нужно не забывать, что другой особенностью цифрового звука, которая роднит его с цветом, является то, что он не всегда требуется! Необходимо взвешенно, дозировано относиться к звуковому сопровождению визуальной мультимедиа-продукции.

Выделяют два широко используемых типа звука в мультимедийной продукции: *музыка* и *речь*. Культурный статус музыки и лингвистическое содержание речи означают, что две эти разновидности звука играют важную роль в средствах информации, а также действуют иначе, чем другие звуки и шумы. Поэтому были разработаны специальные представления музыки и речи, позволяющие использовать их уникальные характеристики. В частности, создаются особые алгоритмы сжатия, ориентированные преимущественно на речь, а музыка может быть представлена не как звук, а как команды для воспроизведения виртуальными музыкальными инструментами.

Набор мультимедиа-оборудования для обработки звука сильно варьируется в зависимости от области применения. Звуковые записывающие и воспроизводящие подсистемы характеризуются целым рядом параметров, которые в конечном счете определяют качество конечных звуковых данных. Поэтому для понимания процессов обработки аудиоданных сначала нужно рассмотреть общие понятия, используемые в акустике.

Вообще говоря, существует очень большой объем научной и технической информации, относящейся к компьютерной обработке звука. Не имея возможности в рамках данной книги подробно остановиться на всех основных теориях, рассмотрим в этой главе наиболее существенные моменты психологического восприятия аудиоинформации.

Физиология слуха

Как уже говорилось, звук принципиально отличается от визуальных средств информации, рассмотренных в предыдущих главах. Уши человека улавливают вибрации воздуха совершенно не так, как глаза улавливают свет, а человеческий мозг по-разному реагирует на возникающие при этом нервные импульсы. Хотя для большинства пользователей звук является привычным повседневным явлением, подобно цвету, он представляет собой сложную комбинацию физических и психологических факторов, смоделировать которую достаточно сложно.

Слуховой анализатор — это совокупность механических, рецепторных и нервных структур, воспринимающих и анализирующих звуковые колебания. **Орган слуха** (периферический отдел слухового анализатора) — это структурное образование, которое преобразует различные параметры звука (интенсивность, частоту, длительность) в активность периферических и центральных слуховых нейронов, на основе чего формируются субъективные характеристики звука (громкость, высота, продолжительность) [9].

Бинауральный слух — способность слышать одновременно двумя ушами и определять локализа-

цию источника звука. Бинауральный слух лучше всего развит на частотах, меньших 1,5 кГц. Выше этой частоты источником информации о местоположении служит уже лишь разница амплитуд сигнала для левого и правого уха. Это связано с тем, что на частотах до 500 Гц колебания непосредственно переходят в нервные импульсы, а на частотах примерно до 1,5 кГц к одному нервному окончанию подключаются одновременно до 3 нейронов. Нейроны в данном случае возбуждаются последовательно, один за другим и, соответственно, помогают улучшить частотное разрешение в 3 раза. На более высоких частотах регистрируется лишь амплитуда сигнала.

Характерной чертой всех источников звука является их *вibration*. Сильно упрощая, можно считать, что именно колебания барабанной перепонки есть главный фактор, определяющий работу слухового аппарата человека [23].

Минимальное значение интенсивности звука, воспринимаемого человеческим ухом, называется порогом слышимости и нелинейно зависит от частоты звуковой волны (рис. 10.1). Чтобы звук очень низкой или очень высокой частоты был услышен, он должен быть существенно громче, чем тон средней высоты.

Как уже говорилось в главе 2, интенсивность звука, вызывающего болевые ощущения, называется *болевым порогом*. Он практически не зависит от частоты звуковой волны и близок к значению $10 \text{ Вт}/\text{м}^2$ (см. рис. 10.1).

Согласно психофизическому закону Вебера–Фехнера, изменение громкости кажется одинаковым, если сила звука изменяется в одно и то же число раз относительно первоначальной величины. Поэтому для оценки изменения кажущейся громкости звука обычно используют логарифмическую шкалу.

Чем большее частота колебаний давления воздуха, тем выше воспринимаемый слушателем звук. Принято считать, что ухо человека различает звуковые волны с частотой от 20 до 20 000 Гц, хотя частотные характеристики слуха отдельных людей достаточно сильно различаются. В частности, верхняя граница чувствительности очень быстро снижается

Несомненно, не является случайным совпадением, что человек наиболее чувствителен к звукам диапазона, соответствующего человеческой речи

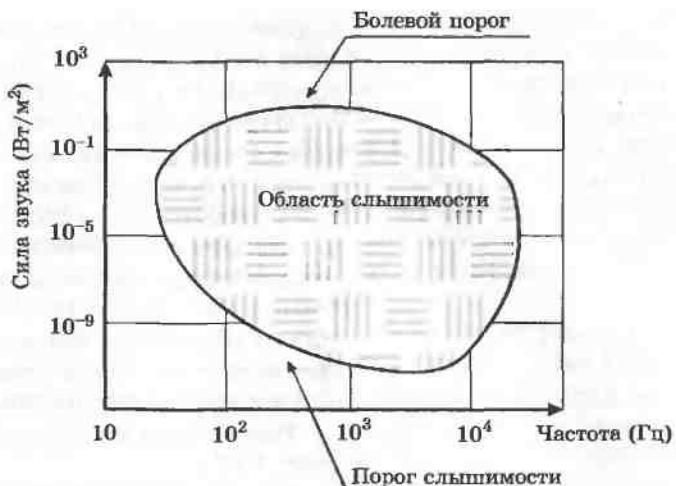


Рис 10.1. Область слышимости человеческого уха

с возрастом: мало кто из взрослых может слышать звуки, близкие к 20 кГц, хотя дети их слышат. Частоты из верхней части диапазона обычно являются частью набора звуком силы.

Самая высокая нота фортепиано (которая более или менее определяет верхнюю частотную границу основной части западной музыки) имеет фундаментальную частоту всего лишь 4186 Гц при концертном строе. В то же время инструменты имеют различные *тембры*: если удалить фрагменты, связанные с набором звуком силы из записей гобоя, скрипки и сопрано, играющих (поющим) одну и ту же ноту, неизменные части будут неразличимыми.

При большой частоте звуковых волн тон высокий, при малой — низкий. Человек имеет наибольшую чувствительность к восприятию звуковых волн в области частот 1000–4000 Гц, тогда как звуки разговорной речи имеют ведущую частоту в пределах 200–1000 Гц. Малые частоты составляют басовый певческий голос, наиболее высокие частоты — сопрано.

В общем случае ухо — это нелинейная система, и оно не может быть точно описано с помощью только линейных элементов (таких как фильтры и линии задержки). Как побочный результат такой нелинейности, может проявляться, например, следующий

эффект: при прослушивании двух тонов с частотой 1000 и 1200 Гц может проявиться третий тон с частотой 800 Гц (так называемая *частота биения*).

Изучение физиологии слухового восприятия человека позволяет высказать еще один довод в пользу того, что Фурье-анализ — это не просто абстрактная математическая концепция. Из анатомических и психофизиологических исследований следует, что механические процессы, происходящие в ухе, очень близки к процедуре Фурье-анализа. Результат такого анализа в форме представления звуковых сигналов в частотной области передается в соответствующие нервные центры.

Рассмотрим работу слухового аппарата человека (рис. 10.2).

Ушная раковина обеспечивает улавливание звуков, их концентрацию вдоль *наружного слухового прохода* и усиление их интенсивности.

После первоначального взаимодействия с ушной раковиной звуковые волны продвигаются по наружному слуховому каналу и доходят до *барабанной перепонки*, находящейся на границе между наружным и средним ухом.

Среднее ухо выполняет роль «гидравлического усилителя» и представляет собой заполненную воздухом полость, в которой располагаются три *слуховые косточки*: *молоточек*, *наковальня* и *стремечко*. Наружный слуховой проход и среднее ухо разде-

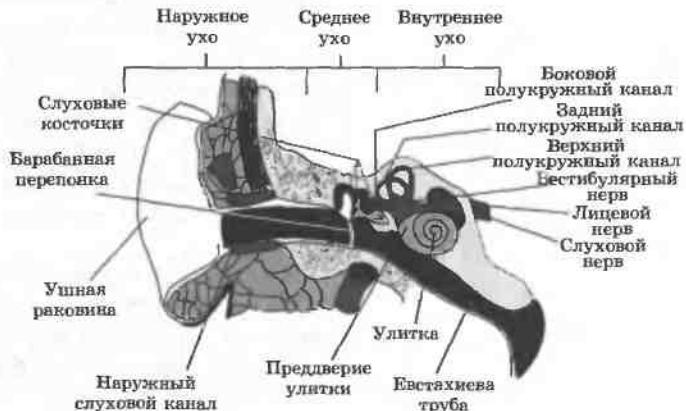


Рис. 10.2. Устройство слухового анализатора

лены барабанной перепонкой. Слуховые косточки передают вибрации барабанной перепонки на мембрану овального окна в улитке на поверхности *внутреннего уха*. Благодаря надлежащей геометрии шарнирных соединений между косточками и тому, что основание молоточка шире, чем основание стремечка, передача вибраций от барабанной перепонки к овальному окну внутреннего уха сопровождается *усилением давления звуковых волн на мембрану овального окна до 25 раз [23]*.

Благодаря этому, а также наличию рычажного механизма косточек среднего уха энергия звуковых волн, передающаяся на единицу площади мембранны овального окна, усиливается примерно в 60–70 раз. С учетом же эффекта усиления звука наружным ухом это усиление в сумме достигает 180–200 раз.

От основания внутреннего уха до глотки проходит канал, называемый *евстахиевой трубой*. Ее функция — обеспечение равенства атмосферных давлений с внешней и внутренней стороны барабанной перепонки во время глотания. При появлении значительной разности давлений между атмосферным воздухом и полостью среднего уха возникают натяжение барабанной перепонки, неприятные ощущения и нарушение восприятия звуков.

Внутреннее ухо состоит из двух частей: *улитки* (органа, по форме действительно напоминающего спиральную раковину улитки) и трех *полукружных каналов*, образующих орган равновесия и ощущения движения.

Стремечко соединяется с мембраной, закрывающей овальное отверстие в улитке. Внутри улитки, заполненной жидкостью, на основной мемbrane расположен *орган Корти* (*кортиев орган*) — *звуковоспринимающий аппарат*, содержащий рецепторные клетки с волосковыми выростами, прикрепленные к вибрирующей мемbrane.

Улитка и ее компоненты работают как преобразователь «частота-положение»: там, где амплитуда деформации мембранны максимальна, происходит возбуждение ресничных ячеек органа Корти, которые взаимодействуют с нейронами, передающими

Артиллеристы при выстреле открывают рот, чтобы давление на барабанную перепонку изнутри стало равным давлению снаружи. То же самое приходится делать и при взлете-посадке на самолете, когда у пассажиров «закладывает уши»

сигнал на более высокие уровни слухового отдела нервной системы.

Таким образом, слуховая информация представляется в частотном виде. Интенсивность сигналов в каждом частотном диапазоне при этом кодируется модуляцией частоты следования нервных импульсов.

Существует два способа передачи звуковых колебаний к рецепторам — *воздушная проводимость* и *костная проводимость*. В первом случае звуковые волны попадают в наружный слуховой проход и вызывают колебания барабанной перепонки, как описано выше. При костной проводимости звук (источник которого соприкасается с головой) вызывает вибрацию костей черепа, в частности височной кости, и за счет этого — опять-таки колебания основной мембранны.

Физика звуковых волн

Перед тем как приступить к рассмотрению мультимедийной специфики восприятия человеческого слуха, кратко напомним основные физические характеристики звуковых волн.

Звуки возникают благодаря преобразованию энергии в колебания воздуха или какой-либо другой упругой среды. В общем случае этот процесс может выполняться в несколько этапов. Например, взаимодействие звуковых волн с окружающими предметами вызывает чрезвычайно мелкие вибрации этих предметов, и затухание звуковых волн переходит в тепло.

Звуковая волна — это процесс распространения в сплошной среде (например, атмосфере) объемных деформаций сжатия и разрежения. Звуковые волны могут распространяться в любой сжимаемой среде — в газах, жидкости, твердых телах. Звук — волновое явление, поэтому при распространении звуковых волн наблюдаются явления, присущие всем волновым процессам: интерференция, дифракция, ослабление и т.д.

Звуковое давление — избыточное давление, возникающее в результате продольного колебания частиц среды, вызванных прохождением звуковой волны.

Основные характеристики звука.

1. *Частота* — количество колебаний давления в единицу времени.
2. *Период колебаний* — величина, обратная частоте и характеризующая длительность одного колебания.
3. *Скорость распространения* — зависит от свойств среды: в воздухе она равна 330 м/с, в воде — 1450 м/с, в железе — 6000 м/с.
4. *Длина волны* — расстояние, которое волна проходит за одно колебание. Эта характеристика также зависит от свойств среды распространения.

Распространение звука сопровождается переносом энергии. Энергетические запасы звуковой волны характеризуются двумя показателями:

- 1) *звуковое (акустическое) давление*. Звуковое давление может изменяться, поэтому различают *амплитудное* и *эффективное звуковое давление*. Эффективное звуковое давление приблизительно равно 70% амплитудного давления. Звуковое давление измеряется в Паскалях, 1 Па = 1 Н/м²;
- 2) *интенсивность (сила) звука* — энергия, переносимая волной через единичную поверхность в единицу времени. Измеряется в Вт/м².

Для интенсивности звука существует следующая формула:

$$I = 0,5 \frac{dP_0}{gv},$$

где I — интенсивность звука, dP_0 — амплитудное звуковое давление, g — плотность газа, v — скорость распространения звуковой волны.

Введем понятие *уровня громкости*, применяемое в акустике и измеряемое в Белах (Б):

$$L = \lg \left(\frac{I}{I_0} \right),$$

где L — уровень громкости, I — интенсивность звука; I_0 — интенсивность звукового порога слышимости.

Бел — это очень большая величина, поэтому на практике используется *дб* (дБ) — одна десятая доля бела.

Примеры интенсивности различных звуков приведены в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Энергетические характеристики различных звуков

Звук	Интенсивность, дБ
Порог слышимости	0
Обстановка за городом ночью	20
Фоновый шум в тихой комнате	30
Шум в изолированной студии звукозаписи	40
Тихий разговор	50
Типичный небольшой офис	60
Шум внутри трамвая	70
Звук симфонического оркестра	90
Крик с близкого расстояния	100
Шум реактивного двигателя, рок-концерт	120
Болевой порог	130
Пушечный выстрел с близкого расстояния	140

Минимальное фиксируемое ухом изменение звукового давления — в 1,12 раза. Человек может слышать без повреждения слуха звуки с отношением интенсивностей около 140 дБ, или 1:1000000000000. Самый тихий шепот, который можно услышать, составляет одну триллионную часть от интенсивности шума, создаваемого взлетающим поблизости реактивным самолетом. Другими словами, динамический диапазон слуха настолько широк, что практически достигает пределов, связанных с фундаментальными физическими ограничениями.

Звуковая волна простейшей формы — чистый звуковой тон определенной частоты — есть сину-

Самому тишайшему, но еще слышимому звуку соответствуют перемещения барабанной перепонки на величину, меньшую диаметра атома водорода

соидальное, или *гармоническое*, колебание. Для ее описания используют уравнение синусоиды. Однако чисто синусоидальные звуковые колебания встречаются в природе крайне редко. Большинство звуковых сигналов имеют негармоническую форму. Они могут быть повторяющимися — периодическими (например, звук скрипки при равномерном движении смычка по струне) или непериодическими (например, звуки речи).

Гармоническое сочетание звуковых волн формирует такую особенность звучания, как *тембр звука*. По тембру можно различать звуки одинаковой высоты и громкости, на этом основано узнавание людей по голосу.

В мультимедиа-технологиях для представления информации о звуке используются два основных принципиально различных способа — *аналоговый* и *цифровой*.

Аналоговый способ записи информации о звуке предполагает сопоставление изменениям звукового давления пропорциональных изменений другой физической величины, например электрического напряжения.

Цифровой способ записи информации о звуке состоит в периодическом измерении мгновенных значений звукового давления. Получаемая при этом последовательность чисел (*цифровой сигнал*) — это и есть выражение исходных звуковых данных.

Преобразование аналогового звукового сигнала в цифровой называется *аналого-цифровым преобразованием (АЦП)*. В любой цифровой системе записи звука оно состоит из нескольких этапов: *фильтрации, дискретизации и квантования*.

Диапазон слышимых человеком звуков составляет в среднем от 17–20 Гц до 20 КГц, следовательно, частота дискретизации должна быть равной не менее 40 КГц. Стандартные частоты дискретизации в большинстве цифровых устройств равны 44,1 КГц и 48,0 КГц.

В силу физиологических аспектов восприятия звука при его оцифровке и воспроизведении не следует во всех вопросах полагаться на математику и

измеримые величины. Следует всегда помнить высказывание Эрика Похлмана (выдающегося деятеля киноиндустрии 1950–60 гг.) о природе звука и его воспроизведении: «Зная об очевидной сложности акустических сигналов, было бы наивно верить, что аналоговые или цифровые технологии развились достаточно, чтобы допускать точную запись и передачу того, что мы слышим. Ситуацию еще больше усложняет то, что мы не знаем точных пределов человеческого восприятия. Очевидно одно: в лучшем случае, даже при использовании самой сложной технологии, то, что воспроизводится аудиосистемой, является лишь аппроксимацией реального звука» [63].

Психоакустическая модель. Маскирование

Бывают ситуации, когда звуки не слышны человеком. На это влияют два явления, и оба они хорошо знакомы нам из повседневной жизни: звук может быть слишком тихим, чтобы его услышать, т. е. может лежать за пределами *абсолютных ограничений слуха*, или же он может заглушаться другим звуком. Отметим, что второе явление сложнее, чем кажется на первый взгляд.

Как уже было описано, улитка и ее элементы работают как преобразователь «частота-положение», в котором положение максимума амплитуды вибраций мембранны зависит от частоты возбуждения. Это заставляет предположить, что должна существовать некоторая степень неопределенности в распознавании высоты тона, — и такая неопределенность действительно есть, хотя она весьма мала, особенно на низких частотах. Например, человек в состоянии различить изменение частоты на 0,3% на частоте порядка 1 кГц. С ростом частоты разрешающая способность слуха ухудшается в экспоненциальной зависимости. Всего же человек способен различать около 4000 частот.

Человеческий слух имеет интересную особенность: более сильные сигналы преобладают над ме-

Маскирование знакомо нам в повседневной жизни. Именно из-за него, например, мы не можем слышать чей-то шепот, когда рядом еще кто-то кричит

нее интенсивными, маскируя тем самым более тихие звуки, попадающие в тот же диапазон частот. Это явление называется *частотным маскированием*, а диапазон частот, в пределах которого один звук может маскировать другой, в соответствии с концепцией Флетчера, называется *критической полосой* [23].

Существует также так называемое *временное маскирование* — эффект, при котором звук достаточно большой амплитуды маскирует другие звуки, непосредственно предшествующие ему или следующие за ним по времени (рис. 10.3). Когда звук маскируется следующим за ним по времени сигналом, такое маскирование называется «*маскированием назад*»; типичный промежуток времени, в пределах которого оно действует, составляет 5–50 миллисекунд. Если же звук маскируется предшествующим ему сигналом, то такое маскирование называется «*маскированием вперед*»; характерный временной диапазон для него составляет от 50 до 200 мс в зависимости от уровней маскирующего и маскируемого сигналов.

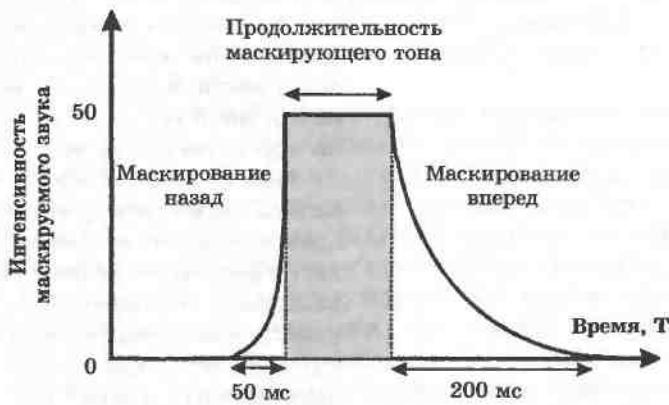


Рис. 10.3. Временное маскирование

Заметим, что временное маскирование является более сложным явлением, чем частотное. Обзор литературы по психологии показывает, что результаты экспериментов по изучению «маскирования назад» сильно зависят от опыта, приобретенного испытуемым: хорошо натренированные люди демонстрируют

Человек не в состоянии заметить внезапное исчезновение высоких частот, если его длительность не превышает примерно 2 мс

слабое маскирование или вообще отсутствие такого (Мур, 1989). «Маскирование вперед» же, наоборот, выявляется хорошо и может иметь существенный уровень даже при испытании хорошо тренированных слушателей.

Человеческая система восприятия звука имеет ограниченное, зависящее от частоты разрешение. Равномерное, с точки зрения восприятия человеком, измерение частоты может быть выражено в единицах ширины критических полос. Их ширина составляет менее 100 Гц для нижних слышимых частот и более 4 кГц — для наиболее высоких. Весь частотный диапазон может быть разделен на 25 критических полос.

Суть эффективного сжатия звука с частичными потерями качества заключается в определении данных, не имеющих существенного значения (т. е. не влияющих на восприятие сигнала), и в их отбрасывании. Если аудиосигнал оцифровывается как последовательность измерений амплитуды звуковой волны, то в оцифрованную версию могут включаться данные, соответствующие неслышимым звукам, не попадающим в критические полосы. Это объясняется тем, что записываемый сигнал содержит все физические колебания давления воздуха, являющиеся причиной звука, но за восприятие звука отвечает головной мозг, который (вместе с ухом) реагирует на звуковые волны нелинейно.

При сжатии звука не имеет смысла оставлять в записи звуки, которые находятся ниже порога слышимости, поэтому любые алгоритмы сжатия должны отбрасывать соответствующие данные. Чтобы реализовать эту идею на практике, алгоритм должен использовать *психоакустическую модель* — математическое описание восприятия звуков ухом и головным мозгом с учетом критических полос. В данном случае нужно знать, как порог слышимости изменяется в зависимости от частоты (рис. 10.4).

Из-за эффекта частотного маскирования громкие тона могут маскировать более тихие, если все они звучат одновременно. Любой звук, находящийся внутри *кривой маскировки*, будет не слышен, даже если он выше немодифицированного порога

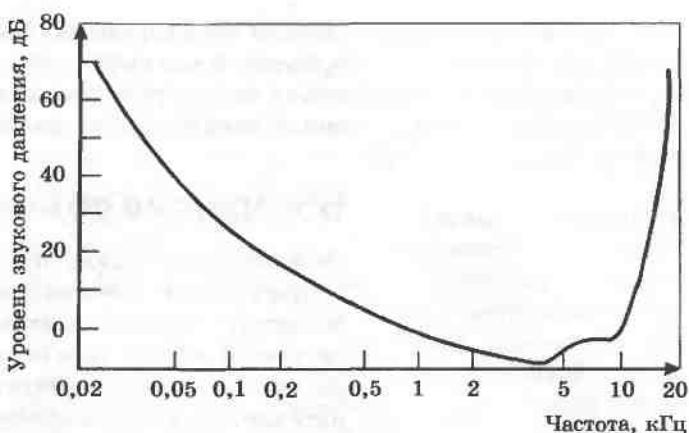


Рис. 10.4. Порог слышимости человеческого уха

слышимости. Следовательно, алгоритм сжатия получает дополнительную возможность отбросить некоторые данные. В то же время маскировку можно использовать более эффективно. Поскольку она, кроме некоторых компонентов сигнала, скрывает шум, в ней можно скрыть *шум квантования*. Так, при наличии маскирующего звука сигнал можно квантовать относительно грубо, используя меньшее количество битов для кодирования сигнала, чем потребовалось бы в противном случае, поскольку получающийся шум квантования можно скрыть под кривой маскировки.

Очевидно, что описанное явление предоставляет возможности для дополнительного сжатия. Обычно применяется следующий подход. Сначала с помощью блока фильтров сигнал расщепляется на полосы частот. Затем вычисляется средний уровень сигнала в каждой полосе, и эти значения подставляются в психоакустическую модель. Тем самым определяется порог маскировки для каждой полосы, т. е. предполагается, что маскирующую кривую в каждой полосе можно аппроксимировать одним значением. Если сигнал в полосе целиком опускается ниже порога маскировки этой полосы, то такая полоса отбрасывается. В противном случае сигнал квантуется с использованием меньшего количества битов за счет маскировки шума квантования.

Отметим, что лучшие разработанные на сегодня алгоритмы связаны со сжатием аудио в рамках

группы стандартов MPEG. Они также применяют временное маскирование, поэтому могут заглушать тихие звуки, прозвучавшие немногим позже или немного раньше основного тона.

Восприятие объемного звука

Человеческому слуху присущи весьма тонкие пространственные локализационные свойства. Минимальный порог узнавания углового смещения звукового образа (реального объекта — источника звука или «виртуального») тренированными наблюдателями составляет примерно 1° . Стереофонический эффект обусловлен в основном двумя факторами: разностью амплитуд и фаз колебаний и разностью времени прихода звука из левого и правого каналов.

Если звук имеет стационарный характер, то основную роль играет разность амплитуд и фаз. При импульсных звуках слушатель ориентируется на разность амплитуд и времени прихода звука. Основную роль в создании стереоэффекта играют колебания с частотой 300–5000 Гц. Для минимального порога узнавания угловой координаты звукового образа достаточен временной сдвиг 6–12 мкс [54].

Наши голова и туловище являются в некоторой степени препятствием, задерживающим и фильтрующим звук, поэтому ухо, скрытое от источника звука головой, воспринимает измененные звуковые сигналы. Кроме того, сама ушная раковина устроена так, что меняет амплитудно-частотную характеристику звукового сигнала в зависимости от направления звука. При «декодировании» головным мозгом эти изменения интерпретируются соответствующим образом для правильного определения местоположения источника звука.

Если источники звука неподвижны, то они не могут быть точно локализованы как «статические» при моделировании, так как мозгу для определения местоположения источника звука необходимо наличие перемещения (либо самого источника звука, либо подсознательных микроперемещений головы слушателя), которое помогает определить расположение

жение источника звука в геометрическом пространстве. Врожденной реакцией человека на неожиданный звук является поворот головы в его сторону; за счет такого движения головы мозг получает дополнительную информацию для локализации в пространстве источника звука.

Такая врожденная реакция отчасти связана со следующей особенностью восприятия. Если источник звука находится позади слушателя, то способность опускать положение и перемещения источника звука в горизонтальной плоскости заметно ухудшается: уменьшается количество различимых направлений, а иногда слушатели вместо правильного положения источника ощущают его спереди. Поворот же головы в сторону источника помогает точнее локализовать его местонахождение в пространстве.

Технологии позиционирования звука основаны на методах моделирования процессов распространения звуковой волны в пространстве. Основными процессами, сопровождающими распространение звука, являются *реверберация, окклюзия и обструкция*. Все системы позиционирования звука программно или аппаратно реализуют алгоритмы, моделирующие эти процессы.

Реверберация — это совмещение множества эхо-отражений звука от ближайших поверхностей в тесном пространстве так, что они воспринимаются на слух как единый звук, который следует за исходным и затухает, причем степень и длительность затухания напрямую зависят от свойств окружающего пространства. Реализацию этого процесса можно встретить не только в системах позиционирования звука, но и в обычных звуковых системах, где при помощи реверберации моделируются акустические свойства помещений.

Окклюзия — процесс изменения звука при его прохождении через препятствие. Путем изменения свойств окклюзии моделируется ослабление звука стеной из определенного материала.

Обструкция — процесс задержания звука различными преградами. Использование свойств обструкции позволяет моделировать дифракцию звука.

При определении направления и расстояния до источника звука используются следующие факторы: *амплитуда, время, тембр и реверберация*.

Амплитуда является наиболее ясным и легче всего имитируемым параметром: чем громче звук, тем ближе его источник; чем громче звук в левом ухе, тем левее находится его источник. В современной звукозаписи эти факторы используются чаще всего — мы увеличиваем громкость звука, чтобы вывести его на передний план (приблизить) и изменяя *панораму* (т. е. увеличиваем громкость в одном канале стереопары и уменьшаем в другом), чтобы переместить его влево или вправо.

Параметр времени также достаточно очевиден — звук источника, расположенного слева, достигает левого уха на несколько микросекунд раньше, чем правого. Однако из-за очень малого времени задержки этот параметр имитировать очень сложно. Гораздо важнее *время отражений*, которое мы рассмотрим чуть ниже.

Изменение тембра в зависимости от расстояния происходит следующим образом. Низкие частоты распространяются на более дальние расстояния, так что звуки, раздающиеся издалека, содержат меньше высоких частот. Воздействие тембра на направление сложнее — пока звук доходит от одного уха до другого, его тембр изменяется костями черепа и ушными раковинами. Попытка имитации этого эффекта носит название *head-related transfer function (HRTF)* и основана на усреднении статистики субъективного восприятия многих людей, поэтому этот процесс не может быть описан математически точно.

Если звук воспроизводится в помещении, то почти всегда, кроме самого звука, мы слышим и многочисленные его отражения (исключение составляют специальные помещения — *безэховые камеры*). Самыми важными при этом являются так называемые *ранние отражения (Early Reflections)* — отдельные повторения звука, происходящие в течение первых 50 миллисекунд после самого звука. В обычной прямоугольной комнате бывает от шести (пол, потолок и четыре стены) до десяти ранних отражений, прежде чем отражения начинают приходить столь часто, что сливаются в единую реверберацию.

Звуки различной частоты распространяются в воздухе с разной скоростью и на разные расстояния. В результате высокочастотная часть спектра от источника, находящегося на удалении от сл�ушателя, несколько запаздывает или вообще не приходит

Уровень и время задержки ранних отражений, уровень, время затухания и предварительная задержка (*Pre-Delay*) реверберации содержат информацию как о размерах помещения, так и о расстоянии от слушателя до источника звука. Частотный состав реверберации сообщает нам о материале поверхностей и дает дополнительную информацию о размере помещения.

Следует отметить, что ранние отражения воспринимаются не как повторения звука, а как информация об акустике помещения. Эта способность человеческого слуха называется *эффектом Хааса*, по фамилии ученого, открывшего этот эффект в 1949 г. Хельмут Хаас обнаружил, что если сходные звуки поступают с разных направлений с разницей по времени не более 50 миллисекунд, то мозг воспринимает только первый, более ранний, звук как отдельный, даже если последующие звуки громче первого на 10 дБ. При этом человеческий мозг автоматически объединяет прямой звук и его повторения, в результате мы слышим один звук, но обогащенный информацией об акустике помещения.

Интересно, что совсем иначе воспринимаются звук и его повторения, если они поступают с одного направления. Если просто объединить прямой звук и его задержанную копию, то произойдет изменение тембра звука, известное как результат действия *гребенчатого фильтра*: в определенном порядке одни частоты будут усилены, а другие ослаблены. Например, при объединении звука и его копии, задержанной на одну миллисекунду, будут усилены частоты 1 кГц, 2 кГц, 3 кГц и т. д. и ослаблены частоты 500 Гц, 1,5 кГц, 2,5 кГц и т. д.

Однако в реальной жизни всего этого не происходит. Система человеческого слуха устроена таким образом, что когда прямой и задержанный звуки приходят с одного направления, то это воспринимается как информация о тембре; если же звуки приходят с разных направлений, то это воспринимается как информация о пространстве. Таким образом, если для имитации акустики помещения применяются небольшие по времени задержки (до 50 миллисекунд), то необходимо убедиться, что прямой и за-

В лесу тяжело определить направление на источник звука, потому что ухо воспринимает звуки, пришедшие не только непосредственно от их источника, но и те, которые пришли со стороны, отразившись от деревьев

держанный звуки разнесены по панораме. Кроме того, уровень ранних отражений обязательно должен быть, как минимум, на 6–10 дБ меньше прямого звука: во-первых, потому, что это соответствует реальным акустическим условиям, а во-вторых, для снижения эффекта гребенчатого фильтра при монофоническом воспроизведении.

Большинство современных систем позиционирования звука в трехмерном пространстве используют:

- изменения тембра, связанные с head-related transfer function (HRTF);
- имитацию отражений звука (реверберацию);
- имитацию окклюзии — процесса изменения звука при прохождении через препятствие (звуки, вызванные этим прохождением);
- имитацию обструкции — процессов задержания звука преградами для моделирования дифракции звука.

В заключение коснемся проблемы создания с помощью звукового сопровождения необходимой эмоциональной обстановки, предполагаемой создателями при просмотре мультимедиа-сцены. Существуют «тревожные» и «расслабляющие» сочетания звуков. Сочетание звука и изображения представляет собой видеозвуковую композицию кадра, которая может быть применена при совпадении характеров звука и изображения по ходу действия, при контрастном сочетании звука и изображения или при подкреплении видеоряда бытовым звуком (шумами).

Даже построение речи при озвучивании должно подчиняться определенным правилам, чтобы не допускать *акофонии / эвфонии* — неблагозвучия, возникающего как следствие недостаточного внимания к организации звучащей речи и закономерностям ее восприятия. Частично считаются допустимыми следующие недочеты:

- скопление гласных на стыке слов («*a u аэродрома*»);
- скопление нескольких согласных — особенно свистящих и шипящих («*встретившись с сопротивлением*»);

Иллюзия Шепарда:
при увеличении громкости тон воспринимается как более высокий

- повторение одних и тех же звукосочетаний («*работа по пополнению запасов*»);
- скопление в рамках одной фразы или микроконтекста причастий на «-щий».

Правильное озвучивание мультимедиа-продукции может многократно усилить эффект ее воздействия на пользователя.

Звуки, не существующие в природе

В предыдущих разделах были рассмотрены особенности восприятия звука, которые необходимо иметь в виду для его реалистичной имитации в виртуальной среде. Однако далеко не всегда нам нужна имитация именно реального мира. Современные технические средства позволяют не только записывать и воссоздавать то, что существует в действительности. Можно создать и нечто, не имеющее аналогий в реальном мире, попытаться воздействовать на слушателя так, чтобы у него создалась иллюзия реальности, не существующей на самом деле.

Идея погружения человека в некоторую искусственную синтетическую реальность посредством звука появилась задолго до появления мультимедийных устройств. Первые практические эксперименты в этой области отмечены во второй половине 1960-х гг. — в эпоху «психodelической» музыки. Это было связано с появлением электронных музикальных инструментов. В частности, огромное влияние на развитие этого жанра оказал синтезатор инженера Роберта Муга.

Основным принципом построения первых синтезаторов было использование так называемого *субтрактивного синтеза звука*. При таком методе звук создается путем генерации волновых форм с богатым спектром и с последующим отсечением ненужных гармоник системой фильтров (по такому же принципу работает и голосовой аппарат человека). В этих синтезаторах использовались генераторы, создающие волновые формы, которых не существует в природе, — в частности, пилообразную, прямоугольную, треугольную и чистую синусоидальную.

Появление электронных синтезаторов дало возможность создавать принципиально новые звуки, которые человек до этого никогда не слышал

Ниаким естественным образом такие звуки в природе появиться не могут; более того, даже аналоговая электронная аппаратура не в состоянии генерировать эти сигналы в идеальной форме. Использованная в синтезаторах система фильтров для имитации отражения от ближайших поверхностей также не имела аналогов в реальном мире. Таким образом, появилась возможность создания звуков, которые человек никогда до этого не слышал.

Вспомним известную композицию английской группы Pink Floyd «On The Run», созданную в 1973 г., где продемонстрировано использование резонансного фильтра с пилообразным источником сигналов. Причем во всей этой композиции музыкальной партии как таковой в привычном понимании этого слова нет, — просто на протяжении всей композиции повторяется один и тот же короткий набор нот размером менее одного такта, и вся музыка играется именно резонансным фильтром. Таким образом, была продемонстрирована новая модель музыки, в которой нет мелодии и нет гармонии, т. е. того, что до этого считалось неотъемлемой частью музыкального произведения.

Большое влияние на музыкальный прогресс также оказали электронные приборы для обработки звука. Изначально ориентированные на моделирование естественных акустических процессов, таких как эхо, реверберация и многие другие, эти приборы могут создавать звуковые картины, не существующие в реальном мире. В качестве примера можно привести очень распространенный в электронной музыке эффект «обратной реверберации», когда громкость отражений звука значительно громче основного звукового сигнала.

В 1990-е гг. появились целые направления в музыке, главенствующую роль в которых играет звуковой дизайн. Мелодия и гармония в такой музыке либо отсутствуют вообще, либо играют второстепенную роль. Для примера можно привести такой стиль танцевальной музыки, как *psy-trance*. Основное воздействие на слушателя здесь достигается путем создания причудливых звуков и пространственных эффектов. Интересной особенностью таких музы-

кальных произведений является то, что их невозможно сыграть на обычных музыкальных инструментах; более того, многие из них вообще невозмож но исполнять без применения компьютера.



Мультимедийное резюме

- Звук — это один из важнейших представителей мультимедиа-данных, вносящий второй по значимости после зрения вклад в информацию, получаемую головным мозгом. В мультимедийной продукции выделяют два широко используемых типа звука: *музыку и речь*.
- Слуховой аппарат является нелинейной системой. При этом наблюдаются такие явления, как *бienia*, т. е. появление *разностных частот* при прослушивании двух звуковых сигналов с незначительно отличающимися частотами.
- Человеческий слух имеет ограниченные возможности восприятия звуковых сигналов. Нижний порог восприятия (*порог слышимости*) зависит от частоты звукового сигнала, а верхний (*болевой порог*) от частоты сигнала практически не зависит. Изменение громкости звука кажется одинаковым, если сила звука изменилась в одно и то же число раз относительно первоначальной величины.
- Человеческому слуху доступен ограниченный диапазон частот, в среднем от 20 Гц до 20 кГц. Причем количество частот, которые воспринимаются как различные, также ограничено.
- При восприятии звука человеком наблюдается *эффект маскирования*. Маскирование бывает частотным и времененным. При частотном маскировании более громкий звук заглушает более слабый, если их частоты близки. Временное маскирование заключается в том, что звук достаточной амплитуды маскирует другие звуки, непосредственно предшествующие ему или следующие за ним по времени.
- Человеческому слуху присущи весьма тонкие пространственные локализационные свойства. При этом способность к локализации звука зави-

сит от частоты. Звуки выше 1,5 кГц плохо локализуются, так как слуховой нерв не способен передавать сигналы с такой частотой и передает лишь амплитуду зафиксированной гармоники. Низкочастотные звуки не локализуются вообще.

- Современные системы записи, синтеза и обработки звука предназначены не только для работы с естественными сигналами. Возможности по созданию звуков, отсутствующих в природе, позволяют воздействовать на человека совершенно новым способом. Например, появились направления в музыке, имеющие совершенно иной принцип построения композиции, отличный от существующих до сих пор. Появились композиции с неразвитой гармонической и мелодической линией, воздействующие на слушателя в основном необычной тембровой окраской используемых звуков.
- Для представления информации о звуке используются два основных принципиально различных способа — *аналоговый* и *цифровой*. Цифровой способ (наиболее важный в мультимедиа) состоит в периодическом измерении мгновенных значений звукового давления. Возникающая при этом последовательность чисел и есть выражение исходных звуковых данных.

Контрольные вопросы и задания



1. При каких изменениях силы звука изменения громкости кажутся одинаковыми?
2. Почему трудно локализовать в пространстве источники высоких звуков?
3. Какими причинами объясняется максимальная чувствительность слухового анализатора к диапазону человеческой речи?
4. Приведите примеры частотного и временного маскирования из обычной жизни.
5. Какие еще эвфонические недочеты могут быть отнесены к разряду допустимых?
6. Приведите примеры явлений окклюзии и обструкции.

Глава 11

Фрактальная геометрия природы

- Применение фракталов
- Связь природных и фрактальных объектов
- Самоподобие и виды фракталов
- Геометрические парадоксы

Эта специальная глава размещена в книге для рассмотрения принципиально иного подхода к созданию мультимедийных объектов. Обычно большинство технологий изначально разрабатываются с учетом или даже полностью исходя из специфики человеческого восприятия, подстраиваются под физиологию и психологию ощущений. Однако фрактальная теория является хорошим примером того, что и сугубо теоретические немультимедийные исследования нелинейных процессов в конце концов могут привести к результатам, которые позволяют создавать искусственные объекты, воспринимаемые человеком как естественные.

Фракталы широко используются в различных мультимедиа-технологиях:

- для моделирования отдельных природных объектов, таких как деревья, листья, горы, облака, береговая линия, поверхность воды (рис. 11.1);
- для эмуляции физических процессов в моделируемых средах, например вспышки молнии или появления изморози на окне (рис. 11.2);
- для создания искусственных ландшафтов с помощью программ — «террагенов» (рис. 11.3);

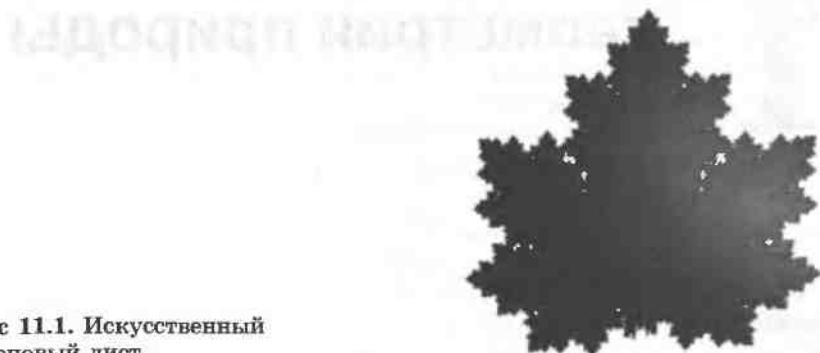


Рис. 11.1. Искусственный кленовый лист

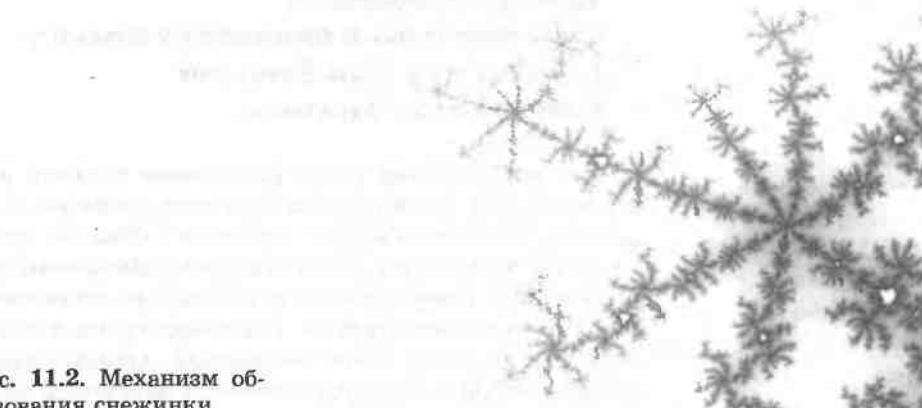


Рис. 11.2. Механизм образования снежинки



Рис. 11.3. Фрактальный ландшафт: небо, горы, волны и деревья на этом рисунке представляют собой фракталы

- использование фракталов возможно и «в чистом виде», поскольку они обладают самостоятельной художественной ценностью (рис. 11.4).



Рис. 11.4. Трехмерный фрактал на базе множества Мандельброта

Этот список далеко не полон, так как фрактальные теории продолжают постоянно развиваться (пример — написание *фрактальной музыки*). Фракталы широко используют физики, биологи, социологи, экономисты и многие другие. Фракталы еще не изучены до конца, им находят все новое применение в разных областях наук, изменяющее наше отношение как к самим фракталам, так и к окружающей нас природе.

Связь восприятия с фрактальными объектами

Книга «Фрактальная геометрия природы» Бенуа Мандельброта открывается следующими словами: «Почему геометрию часто называют «холодной» и «сухой»? Одна из причин заключается в ее неспособности описать форму облака, горы, береговой линии или дерева. Облака — не сферы, горы — не конусы, береговые линии — не окружности, древесная кора — не гладкая, молния распространяется не по прямой. В более общем плане я утверждаю, что

многие объекты в природе настолько иррегулярны и фрагментированы, что по сравнению с Евклидом — термин, который в этой работе означает всю стандартную геометрию, — Природа обладает не просто большей сложностью, а сложностью совершенно иного уровня. Число различных масштабов длины природных объектов для всех практических целей бесконечно».

Слово *фрактал* образовано от латинского *«fractus»* и в переводе означает «состоящий из фрагментов». Оно было предложено Б. Мандельбротом в 1975 г. для обозначения нерегулярных, но самоподобных структур, которыми он занимался. Другое трактование термина «фрактал» — это производная от латинского глагола *«frangere»* — «ломать».

Рождение фрактальной геометрии принято связывать с выходом в 1977 г. книги Мандельброта «Фрактальная геометрия природы». Интересно, что в его работах использованы изыскания многих ученых, работавших в 1875–1925 гг., таких как Пуанкаре, Фату, Жюлиа, Кантор. Понятие же фрактальной (дробной) размерности появилось в 1919 г. в работе Феликса Хаусдорфа.

Однако только в наше время удалось объединить работы этих исследователей в единую систему. Отношение к самоподобным математическим объектам изменилось с появлением компьютеров, когда появились первые изображения алгебраических и стохастических фракталов. За этот короткий промежуток времени вышли десятки книг и сотни статей, в которых обсуждаются как чисто математические проблемы (например, связность множеств), так и вопросы взаимоотношения фракталов и искусства, хаоса, синергетики. Так, работы по связи фракталов с психологией восприятия устанавливают внутреннюю связь рационального научного познания с эмоциональностью восприятия и эстетической привлекательностью, наглядно демонстрируя, что именно теряется в технических объектах по сравнению с природными: это «роскошь» некоторой нерегулярности, беспорядка и непредсказуемости. Фрактальность мира — это еще одна уловка, к которой прибегает разум, чтобы вместить в памяти необъятное.

Фракталы представляют собой процессы, являющиеся упрощенной моделью действительности, — они преувеличивают некоторые свойства, чтобы сделать их более ясными для восприятия

Когда-то большинству людей казалось, что геометрия в природе ограничивается такими простыми фигурами, как линии, круги, конические сечения, многоугольники, сферы, квадратичные поверхности, а также их комбинациями. Однако многие природные системы настолько сложны и нерегулярны, что использование только знакомых объектов классической геометрии для их моделирования представляется делом безнадежным. Как, к примеру, построить модель горного хребта или кроны дерева в терминах геометрии? Как смоделировать систему каскадных водопадов? Фракталы и математический хаос — вот подходящие средства для исследования поставленных вопросов!

В работах Б. Мандельброта (например, в [65]) приводится классический пример дробной береговой линии. «Сначала представим себе берег Бретани — таким, каким он выглядит с борта низко летящего самолета. ... Мы будем рассматривать форму береговой линии на некотором очень малом участке как результат нерегулярностей на прямолинейном отрезке. Если изучать берег с борта самолета, летящего несколько выше, то «локальные» нерегулярности становятся невидимыми и, как следствие, пренебрежимыми. Напротив, мы заметим новые нерегулярности, скажем, «районные». Если взлететь еще выше, то и они скроются за другими нерегулярностями, которые можно назвать «областными», и так далее. Даже если рассматривать всю Бретань целиком, никому в голову не придет определять «общее направление» береговой линии посредством прямолинейной экстраполяции...» (т. е. упомянутого первоначального отрезка). Из факта, что при уменьшении масштаба будут получаться все большие и большие значения длины, Мандельброт вывел интересный геометрический парадокс, что длина береговой линии Бретани — бесконечность.

Этот факт следует в том числе и из основного свойства фракталов — *самоподобия*, т. е. вид фрактала не претерпевает существенных изменений при его рассмотрении с любым увеличением [56]. В самом простом случае небольшая часть фрактала при увеличении дает образ всего фрактала; вообще

В рамках исследования самоподобия природных объектов интересно отметить предположение Леонардо да Винчи о том, что суммарная толщина всех веток дерева на любой заданной высоте равна толщине ствола (ниже их уровня)

же рассматриваются и ситуации с нелинейным преобразованием подобия, подобием разных по размеру частей и т. п.

Объясним, что понимается под *самоподобием природных объектов*. Нередко то, что мы наблюдаем в природе, интригует нас бесконечным повторением одного и того же узора, увеличенного или уменьшенного в любое количество раз. Например, у дерева есть ветви; на этих ветвях есть ветки поменьше и т. д. Теоретически элемент «разветвление» повторяется бесконечно много раз, становясь все меньше и меньше. То же самое можно заметить, разглядывая фотографию горного рельефа. Если немного приблизить изображение горной гряды, то мы снова увидим горы. Если еще увеличить изображение, то мы по-прежнему будем различать нечто, напоминающее горы, благодаря нашей способности (по сути, статистической) различать тип объекта на рисунке [57]. Пример естественного самоподобного объекта приведен на рис. 11.5.



Рис. 11.5. Морская раковина как пример естественного объекта с эффектом самоподобия

Геометрические фракталы

Чтобы представить себе все многообразие фракталов, удобно прибегнуть к их классификации по способу построения, предложенному Калге в 1988 г. В ней фракталы делятся на три группы: *геометрические, арифметические и стохастические* [58].

История фракталов началась с геометрических фракталов, которые исследовались математиками еще в XIX в.

Геометрическими парадоксами снежинки Коха являются ее бесконечная длина и то, что к любой точке этого фрактала невозможно провести касательную.

Фракталы этого класса — самые наглядные, потому что в них сразу видна самоподобность. Их получают с помощью некоторой ломаной линии (или, в трехмерном случае, поверхности), называемой *аттрактором*, или *генератором*. Пусть, например, исходная фигура — это отрезок. За один шаг алгоритма все отрезки текущей фигуры заменяются ломаной линией. Изображение (так называемая «снежинка Коха») получается в результате бесконечного повторения этой процедуры (т. е. перехода к пределу). В этом случае части полученной фигуры будут подобны всей или почти всей фигуре (рис. 11.6).

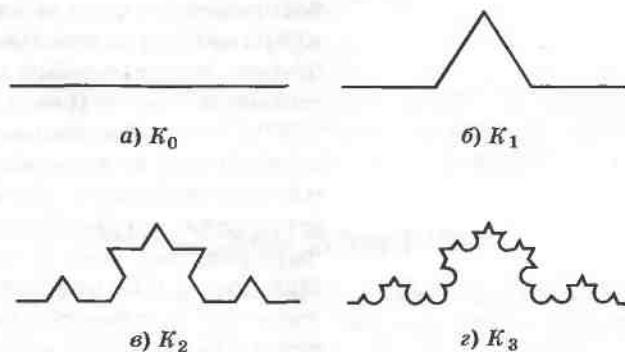


Рис. 11.6. Этапы построения снежинки Коха

При всей видимой сложности полученной кривой ее общий вид задается только формой аттрактора (рис. 11.6б). После небольшой художественной обработки применения аттрактора не к отрезку, а к треугольнику можно получить фрактал, подобный показанному на рис. 11.7.

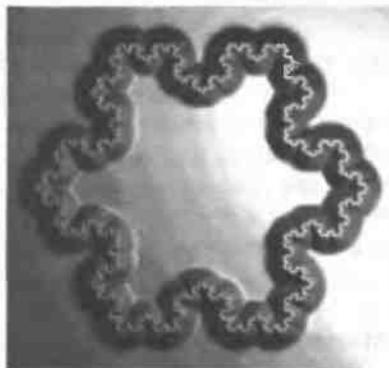


Рис. 11.7. Замкнутая снежинка Коха, выдавленная на плоскости

Другие примеры геометрических фракталов — кривая дракона, кривая Леви, кривая Минковского, кривая Пеано. К геометрическим фракталам также относят фракталы, получаемые с помощью так называемых «*итеративных систем функций*» (*Iterated Function System*), например папоротник Барнсли, квадрат Кантора, ковер Серпинского, губку Менгера, дерево Пифагора. Итеративные системы функций также используются во *фрактальной компрессии изображений* [69].

При первом взгляде на папоротник Барнсли (рис. 11.8) обычный пользователь, скорее всего, воспримет эту фигуру как естественную, имеющую природное происхождение. Однако это — фрактал, причем итерационный процесс для его получения довольно прост (рис. 11.9). Исходный квадрат $ABCD$ четырьмя сжимающими преобразованиями переводится в три квадрата с индексами 2, 3, 4 и плоский стебель 1. Далее эти преобразования повторяются, при этом в качестве исходного квадрата подставляется результат предыдущей итерации. При достаточно большом количестве итераций получается лист папоротника [70]. Причем поскольку предел сходящейся последовательности не зависит



Рис. 11.8. Папоротник Барнсли

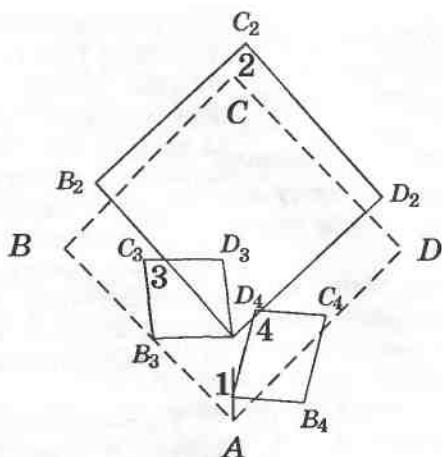


Рис. 11.9. Аффинные преобразования для папоротника Барнсли

от выбора начальной точки, исходной фигурой для построения может служить любое непустое изображение — отрезок, окружность, ломаная и т. п.

Алгебраические фракталы

Это самая большая группа фракталов. Получают их в процессе итераций функций или систем функций. Наиболее известны изображения множеств Мандельброта и Жюлиа, получаемые при итерациях комплексных многочленов второй степени.

Алгебраические фракталы строят следующим образом. Задается фрактальная функция, на комплексной плоскости выбирается прямоугольная область и на ней фиксируется сетка — пиксельный растр изображения. От выбранной исходной точки зависит начальное значение функции. Каждое применение функции к комплексному числу-точке переводит ее в другое число.

При большом количестве итераций можно отследить характер поведения получившейся последовательности — сходится ли она, расходится, остается ограниченной или ведет себя хаотически. Характер поведения влияет на цвет выбранной исходной точки, — например, все расходящиеся точки можно окрасить в белый, а сходящиеся — в черный цвет. Одним из самых распространенных способов цвет-

ногого раскрашивания точек — узлов сетки является сравнение текущего значения с заранее выбранным числом, которое считается «бесконечным», т. е. цвет исходной точки зависит от номера итерации, на которой функция достигла «бесконечности», или черный — в противном случае.

Меняя функцию, положение изображаемой области и алгоритм выбора цвета, можно получать сложные фрактальные картины с причудливыми многоцветными узорами. Несмотря на примитивность алгоритма и используемых функций, получающие изображения весьма нетривиальны.

Рассмотрим теперь алгоритм построения алгебраического фрактала на примере *множества Жюлиа*, основанного на простой формуле:

$$z_{n+1} = f(z_n) = z_n^2 + c.$$

Выбрав произвольное число z_0 , возведем его в квадрат и прибавим константу c , чтобы получить z_1 . Затем повторим вычисления, чтобы получить z_2 , z_3 и т. д.

Возьмем простейшее из возможных значений константы c , а именно $c = 0$. Тогда при каждой итерации вычисляется точный квадрат числа $z_0 \rightarrow z_0^2 \rightarrow z_0^4 \rightarrow z_0^8 \dots$

Для этой последовательности, в зависимости от выбора z_0 , существуют три возможности [66]:

- 1) числа получаются все меньшими и меньшими, их последовательность приближается к нулю. В этом случае считается, что нуль является *аттрактором* для процесса $z \rightarrow z^2$. Все точки, находящиеся на расстоянии меньше единицы от этого аттрактора, движутся к нему;
- 2) числа становятся все большими и большими, стремясь к бесконечности. Тогда бесконечность также является *аттрактором* для этого процесса, а все точки, лежащие на расстоянии больше единицы от точки «нуль», движутся к бесконечности;
- 3) точки находятся и продолжают оставаться на расстоянии единицы от нуля. Их последователь-

ности лежат на границе двух областей притяжения, в данном случае — на окружности единичного радиуса с центром в нуле.

Иными словами, плоскость делится на две зоны влияния, или бассейна притяжения неподвижных точек 0 и ∞ , а границей между ними является просто окружность, точки которой никуда не притягиваются.

Более интересная ситуация возникнет, если мы выберем значение c , немного отличающееся от нуля, например $c = -0.15 + 0.55i$. Здесь для последовательности также имеются три перечисленные выше возможности, но внутренний аттрактор, отмеченный белой точкой на рис. 11.10, уже не является нулем, а граница уже не является гладкой. Из рисунка видно, что эта граница сильно изломана, причем при увеличении она выглядит столь же изломанной, как и без увеличения.

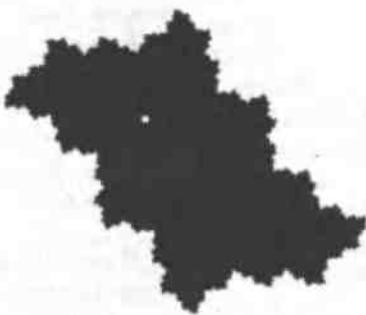


Рис. 11.10. Множество Жюлиа: бассейн притяжения при $c = \text{const} \neq 0$

Границы таких множеств (но не внутреннюю область!) называют *множествами Жюлиа*. Во время Первой мировой войны французские математики Гастон Жюлиа и Пьер Фату изучали их свойства для общего случая рациональных отображений в комплексной плоскости.

Аналогично строится и *множество Мандельброта* (рис. 11.11), только вместо $c = 0$ фиксируется $z_0 = 0$, а график поведения функции при количестве итераций, стремящихся к бесконечности, строится в зависимости от выбора начального значения точки c на действительной и мнимой осях $Re(c)$ и $Im(c)$.

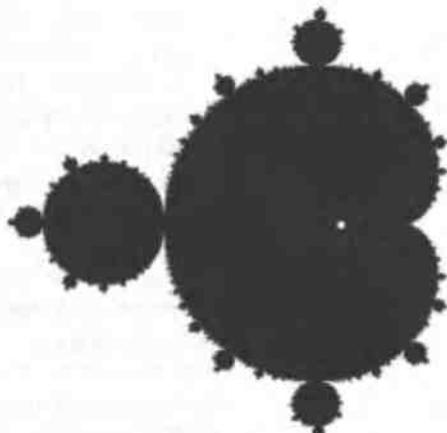


Рис. 11.11. Классическое множество Мандельброта

В этом случае множеству Мандельброта принадлежат уже все нерасходящиеся точки. Изучение отдельных участков границы множества дает принципиально разные изображения, например уже приведенную выше снежинку Коха (см. рис. 11.2).

Аналогично снежинке Коха, длина связного множества Жюлия и границы множества Мандельброта равна бесконечности. Поразительным свойствам алгебраических фракталов можно посвятить не одну книгу; подробнее этот вопрос освещен в основных источниках [66, 67].

В заключение этого раздела коснемся еще одного геометрического парадокса, называемого *проблемой сэра Артура Кэли* и заключающегося в исследовании сходимости классического алгоритма Ньютона для нахождения корней уравнений [71]. Этот метод заключается в выборе начальной точки, которая путем итераций должна попасть в бассейн притяжения одного из корней уравнения. Однако в случае комплексных уравнений (всего лишь третьего порядка) форма границ бассейнов притяжения становится невероятно сложной и образует фрактал (рис. 11.12), форму которого в XIX в., не имея компьютерной техники (!), пытался получить Артур Кэли.

Оказалось, что любая точка, находящаяся на границе какого-либо бассейна, является трехсторон-

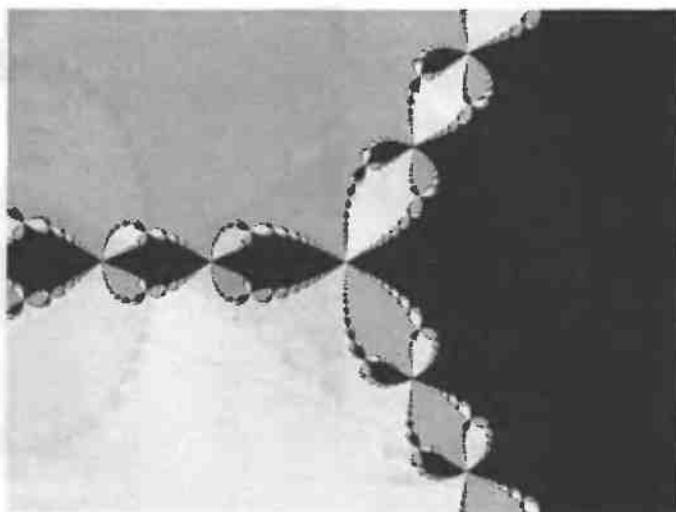


Рис. 11.12. Области притяжения корней кубического уравнения

Если взять произвольную точку на границе одного фрактального государства, то, двигаясь из нее непрерывным образом, можно попасть на террито-рию любой другой страны

ней точкой по отношению к бассейнам притяжения всей тройки корней. В обычном случае единственной трехсторонней точкой является начало координат, но в случае кубического уравнения для метода Ньютона по плоскости разбрасывается бесконечное количество копий этой исключительной точки.

Для иллюстрации этого интересного свойства алгебраических фракталов необходимо вспомнить старую задачу о том, как, используя карандаши только четырех цветов, раскрасить политическую карту мира, чтобы государства-соседи не были закрашены одним цветом. При этом предполагается, что территория каждого государства — единая область без разрывов, перешейков и колоний.

Только совсем недавно возможность решения этой задачи была доказана в общем случае; из этого доказательства следует, что точкой, у которой может быть три и более соседа, является единственная точка на стыке всех этих областей. Однако в случае проблемы Кэли территория каждого государства — это бесконечное количество уменьшающихся колоний — бассейнов притяжения каждого из корней уравнения. На увеличенном фрагменте (рис. 11.13) хорошо видно, что фрактальные колонии всех трех цветов прилепляются друг к другу, как «связки ба-

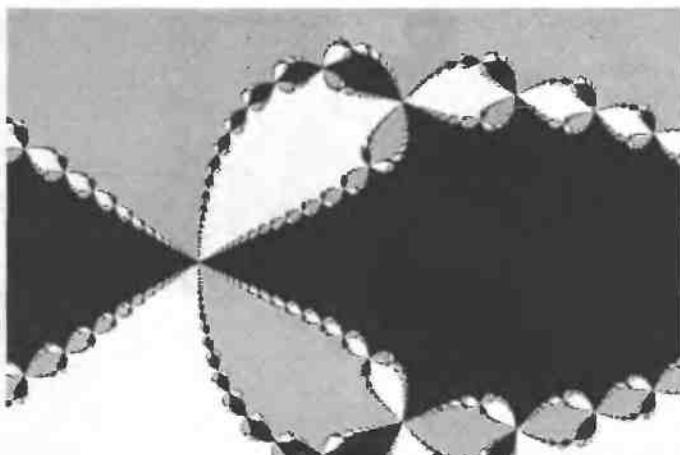


Рис. 11.13. Увеличенный фрагмент границы областей

нанов», бесконечно уменьшаясь в размерах. Поэтому оказывается, что каждая точка на границе является «трехсторонней» точкой — «дверью» во все страны одновременно.

Стохастические фракталы

Кривая Коха, как бы ни была она похожа на границу берега, не может выступать в качестве ее модели из-за того, что она всюду одинакова, самоподобна, слишком «правильна». В процессе создания всех природных объектов всегда есть случайность. Фракталы, при построении которых в итеративной системе случайным образом изменяются какие-либо параметры, называются *стохастическими*. (Термин «стохастичность» происходит от греческого слова, обозначающего «предположение».)

В технологиях мультимедиа при получении изображений деревьев, кустов или береговой линии в геометрические фракталы добавляют случайные возмущения, повышающие реалистичность синтезируемых объектов. Так, природные ландшафты — особенно горные и пересеченные местности — легко имитировать с помощью самоподобия на построенной сетке географических высот.

Этап 1

1=***				

Этап 2

				2-1+**
				2-1+**

Этап 3

	→ 3-(1+2)/2+*			3-(1+2)/2+*	
↓					↓
3-(1+2)/2+*				3-(1+2)/2+*	

Этап 4

				4 = (3+3+3+3)/4+*	

Рис. 11.14. Процесс построения фрактальной карты ландшафта. Количество звездочек обозначает степень случайного возмущения стохастического фрактала

Пусть у нас имеется разбиение ландшафта на симметричные области (квадраты). На первом этапе (рис. 11.14) задается случайное значение для верхней левой ячейки каждого квадрата. На следующем этапе сетка разбивается на 4 подсетки, и в каждую подсетку копируются значения из соответствующего квадрата, а значения в ячейках задаются как среднее арифметическое между соседними по горизонтали и вертикали проинициализированными ячейками плюс случайная величина (которая тем меньше, чем мельче разбиение на подсетки) и т. д. [72]. При этом чем



Рис. 11.15. Фрактальная карта высот местности

больше будет значение случайной величины, тем более «рваным» будет рисунок. Этот метод также носит название «плазмы».

Именно на этом принципе основано моделирование гор в большинстве программ — генераторов фрактальных ландшафтов (см. ранее рис. 11.3). В них с помощью алгоритма, похожего на «плазму», строится карта высот, к ней применяются различные фильтры, накладывается текстура и т. д.

Мультимедийное резюме



- Подводя итоги, подчеркнем, что существуют основные свойства, объединяющие все типы фракталов:
 - они имеют тонкую структуру, т. е. содержат произвольно малые масштабы;
 - они слишком нерегулярны, чтобы быть описанными на традиционном геометрическом языке;
 - они имеют некоторую форму самоподобия, в том числе нестрогую;
 - они имеют дробную «фрактальную» размерность, называемую также *размерностью Хаусдорфа*.

- Фракталы, несмотря на их «искусственное» происхождение, очень хорошо подходят для моделирования природных объектов и событий. Это может быть:
 - моделирование отдельных природных объектов, таких как деревья, листья, горы, облака, береговая линия, поверхность воды;
 - эмуляция физических процессов в моделируемых средах, например вспышки молнии или появления изморози на окне;
 - создание искусственных ландшафтов местности с помощью программ — «террагенов».
- Кроме того, фракталы используются и сами по себе, поскольку они обладают самостоятельной художественной ценностью.
- Экспериментально доказана психологическая связь восприятия нерегулярных природных объектов и синтезированных на компьютере фракталов, — в основном вследствие свойства самоподобия и тех и других.
- Различают геометрические фракталы, когда на плоскости или в пространстве при каждой итерации каждый отрезок текущей фигуры заменяется аттрактором, алгебраические фракталы, изображение которых является графиком, отражающим поведение функции на бесконечности, и геометрически-стохастические фракталы, являющиеся частным случаем геометрических фракталов с внесенными в них случайными изменениями.
- Отдельно рассмотрен способ построения под названием «*итеративная система функций*», который позволяет получать реалистичные природные объекты путем применения к текущей фигуре набора сжимающих (как правило, аффинных) преобразований.
- Рассмотрен геометрический парадокс метода Ньютона на комплексной плоскости, демонстрирующий уникальную возможность перейти непрерывным образом из точки на границе двух областей в любую другую область на изображении.



Контрольные вопросы и задания

1. Можете ли вы привести свои примеры сугубо теоретических исследований, результаты которых позволяют создавать искусственные объекты, воспринимаемые как естественные?
2. Объясните, почему восприятие природных объектов связано с восприятием фрактальных объектов.
3. Можно ли считать фракталом изображение, содержащее бесконечно повторяющиеся контуры, но с неточным самоподобием?
4. Покажите, как получить замкнутую снежинку Коха. Нарисуйте первые три итерации этого процесса.
5. Как вы считаете: почему в итеративных системах функций используются только сжимающие отображения?
6. Какие еще процессы, характеризующие поведение алгебраического фрактала (кроме сходимости/расходимости), можно использовать для визуализации?
7. В осах какой переменной построено множество Жюлиа?
8. Как изменится вид бассейнов притяжения метода Ньютона при увеличении степени уравнения до 4? До 7?
9. Можно ли предложить метод построения «плазмы» без разбиения на 4 подсетки?

Глава **12**

Мультимедиа и психология социальных культур

- Генетический имбриндинг
- Значения цветов в различных человеческих культурах
- Связь родного языка и полушарий мозга
- Влияние культуры на ассоциации
- Виртуальные модели поведения

Анализ воздействия мультимедийных технологий на восприятие человека был бы неполным без рассмотрения психологических особенностей социального плана. В зависимости от национальных, возрастных, образовательных и других социально-демографических причин одни и те же мультимедиаданные могут вызывать различные ощущения. Кроме того, мультимедиа-технологии сами по себе являются источником зарождения новых киберкультур со своими особенностями восприятия, социальными условиями и поведенческими моделями. Типичный пример таких новых культур — виртуальные игровые сообщества в сети Интернет.

Самоорганизация разнородного, хаотического поведения отдельных индивидуумов, в том числе в виртуальной среде, является предметом изучения *социальной синергетики* — науки о самоорганизации социальных сообществ.

Язык цветов в различных культурах

Некоторые цвета приобретают особое значение благодаря ассоциациям с определенной культурой. Очевидным примером служат цвета национального флага, вызывающие патриотические чувства, являющиеся символом власти или традиционных ценностей в конкретной культуре. Цвета же флага другой нации могут иметь по сравнению с этим более отчужденный и не вполне уместный вид. Цветовые ассоциации через национальные, художественные, религиозные и культурные традиции придают цветам разное значение в каждой культуре [11].

На цветовое восприятие также оказывает воздействие фактор *генетического имбриндинга*. Несмотря на то что каждый человек является представителем определенного этноса, частью культуры — религиозной или национальной, он принадлежит и к общечеловеческой культуре и подсознательно реагирует на цветовые сигналы природы. Нас радует песочно-желтый цвет, но мы предпочтем избежать сочетания черного с желтым, так как в природе оно часто является сигналом опасности: такую раскраску имеют пчелы, тигры, некоторые ядовитые растения.

Цвета вызывают у человека не только определенные физические и эмоциональные реакции, но и воздействуют на него в социокультурном плане. О цвете мы узнаем благодаря языку, мифологии, общению с людьми внутри своей культуры, своей страны. Если вы выросли в обществе, где женщины выходят замуж в белом платье, то подсознательно белый цвет будет ассоциироваться с чистотой, целомудренностью, новыми начинаниями.

Кроме общепризнанных природных цветов распространение глобальных корпораций способствует отождествлению определенных цветов и с популярными фирменными знаками, подобно, например, «кока-коле». Специалисты, занимающиеся маркетингом, активно используют цветовые сигналы для возбуждения эмоций и укрепления положительного настроя. В зависимости от отрасли, разные цвета ассоциируются с разной продукцией. В супермаркете по

Покраска наручников в розовый цвет в ряде стран призвана усилить ощущение стыда арестованного

зеленому цвету узнается напиток «7 Up». В сфере ИТ-технологий фирму IBM называют «синим гигантом». Выходящая на рынок компания, планируя выпуск нового продукта, считает выбор цвета для дизайна одним из наиболее ответственных маркетинговых решений. В связи с этим не редкостью является цветовая наценка на товар, например на автомобиль перламутрового цвета, на компьютер фирмы Apple в корпусе зеленого или красного цвета и т. д. [2]

Различные человеческие культуры расширяют цветовую палитру, активно используя национальные предпочтения. Например, кочевники из Тимбукту, живущие в Сахаре, предпочитают исключительно синий индиго, а народность бамбара в Мали отличается ослепительно пестрыми цветами, причем во время праздников особенно богатые женщины обязательно не менее пяти раз в течение дня должны менять свои яркие наряды.

Особым вкусом в области дизайна и цвета отличаются жители Японии. Цвет одежды может говорить о статусе и происхождении человека. Например, опытные гейши имели белые воротнички, а начинаяющие — красные. Молодые японки носят кимоно нежно-розовых тонов, чего не позволяют себе женщины старшего возраста.

В зависимости от важности цветов в обыденной жизни народа, некоторые из них могут иметь большее или меньшее отражение в языке. Например, в языках слабо развитых сельскохозяйственных народов есть множество слов для обозначения оттенков зеленого, что связано с жизненно важной необходимостью контролировать и оценивать состояние выращиваемых растений. А в русском языке присутствуют два отдельных слова: «синий» и «голубой», — в отличие от многих европейских языков, в которых диапазон цветов соответствующей части спектра перекрывается единым обозначением (англ. *blue*, нем. *blau*, фр. *bleu*).

Наиболее «древними» цветами, первыми появившимися в человеческой культуре, обычно считаются белый, черный и красный. Количество «основных» цветов в разных культурах различно. Древний Восток предполагал наличие 5-элементного мира, в

Европе фиксировалось 3 основных цвета (сначала — красный, желтый, синий, а позже — красный, зеленый и синий). А со временем Ньютона часто говорят о 7 цветах.

Цветовые традиции уходят своими корнями глубоко в историю. С глубокой древности человеку было свойственно выражать свои чувства, отношения и идеи с помощью цвета одежды или цветка.

Красный цвет ассоциировался с цветом жизни, любви, а также воспринимался как цвет крови, символ гнева и мести (цвет войны и революции). Белый цвет — это символ чистоты и невинности (лилия). Черный — символ печали, траура. Желтый — символ отвращения, ненависти, — кроме золотистого — символа солнца и радости. Зеленый — это символ надежды. Голубой — цвет богов (неба и «небожителей»). Синий — символ верности (незабудки, фиалки). Пурпурный — символ величия.

Пурпурный и фиолетовый цвета использовались в королевских мантиях и в одежде людей, занимающих высокое положение. Но тем, кто родился в Латинской Америке, где фиолетовый цвет традиционно используется для траурной одежды, этот оттенок, наоборот, навевает грустные чувства и может напоминать похороны. В Китае же траурным является белый цвет и на похороны приносят белые цветы, реже — желтые.

Язык цветов — это цветная символика, значение, придаваемое различным цветам для выражения тех или иных настроений, чувств и идей. Язык цветов может быть реализован как с помощью разноцветных предметов или раскраски объектов, так и путем создания цветочных композиций из живых растений — букетов, венков и т.п.

Восприятие цвета даже внутри одной культуры может меняться со временем. Так, черный цвет в США первоначально ассоциировался с мрачными нарядами женщин-иммигранток, а теперь он очень распространен и считается признаком городского шика, как и в законодателе мод — Париже.

В средние века был широко распространен язык цветов. Для каждого отдельного случая создавался букет, все компоненты которого несли кроме цветовой скрытую смысловую нагрузку. Роза означала любовь и тайну, белая лилия — невинность и чистоту и т. д.

В работах, предназначенных для публичного показа, трудно избежать разного истолкования цвета различными категориями зрителей

Создавая анимацию персонажа, играющего в гольф в Майами (штат Флорида), можно окрасить его брюки для гольфа в розовый цвет, чтобы передать настроение персонажа, находящегося на отдыхе. Но в результате одни зрители узнают в розовом распространенный в Майами цвет или найдут забавным неумение данного персонажа одеваться, а другие — посчитают предосудительным для мужчины розовый цвет одежды и неправильно истолкуют намерения автора. Сложность создания подобной продукции как раз в том и состоит, что разные люди могут по-разному воспринимать такие элементы оформления, как цвет. Скажем, зеленый может оказаться цветом популярной политической партии в одной стране, но символом экстремистской полуவенной организации — в другой.

В работах, предназначенных для публичного показа, трудно избежать разного истолкования цвета различными категориями зрителей. И решением этой проблемы может быть как «нивелирование» используемой цветовой гаммы, так и, наоборот, ориентация на более узкий круг зрителей.

Избирательность культурных ассоциаций

Исследователи из Калифорнийского университета в Беркли и Чикагского университета провели серию экспериментов, в которой показали, что зрительное восприятие зависит от родного языка человека. Эта работа подтверждает гипотезу лингвистической относительности, согласно которой структура языка определяет структуру мышления и способ познания внешнего мира для левого полушария (но не для правого).

Испытуемым-добровольцам демонстрировали цветные квадраты, расположенные по окружности. Все квадраты, кроме одного, были окрашены в одинаковый зеленый цвет. Этот особый квадрат в одной серии экспериментов также имел зеленый цвет, но другого оттенка, а в другой серии был голубого цвета. От участников требовалось как можно быстрее

найти отличающийся квадрат и с помощью кнопок указать, в какой половине кольца — справа или слева — он находится.

В первой серии экспериментов участники в среднем одинаково быстро находили зеленый квадрат отличного оттенка независимо от того, с какой стороны он появлялся. Но для голубого квадрата ситуация менялась. Если он появлялся в правой части кольца, то участники находили его достоверно быстрее, чем когда он находился слева.

Авторы работы объясняют этот эффект, ссылаясь на функциональную асимметрию полушарий головного мозга. Как известно, зрительные нервы, несущие сигнал от левого поля зрения человека, идут в правое полушарие, а правая часть поля зрения поступает на обработку в левое полушарие, которое также отвечает и за речевую деятельность человека. Несимметричный результат эксперимента указывает на то, что левое полушарие легче различает оттенки цвета, если в его родном языке они имеют разные названия. А «немое» правое полушарие различает цвета одинаково, независимо от выделяемых языком стандартных группировок — гештальтов (см. ранее раздел о гештальт-психологии). Чтобы подтвердить свои выводы, авторы работы повторили эксперимент с участием людей, которые перенесли операцию *лейкотомии* — рассечения полушарий мозга, и убедились, что у них описанный эффект выражен значительно сильнее.

Таким образом, *родной язык человека делает более четким разделение зрительных образов в правой части поля зрения и не влияет на восприятие того, что появляется с левой стороны.*

Кроме родного языка сильное влияние на восприятие оказывают, например, архитектурные особенности устройства жилых домов. По традициям Японии, в домах часто жило сразу много человек, и вместо того, чтобы добавлять какие-то пристройки и делить уже существующие комнаты новыми стенами, японцы ставили перегородки-ширмы, которые были полупрозрачными. Через них не было видно самого человека, но отчетливо прорисовывался си-

Леви-Стросс в своей работе «Колдун и его магия» отмечает: человек фиксирует не весь поток действительности, — он избранителен и выбирает в потоке событий то, что ему объяснено в формулах культуры того народа, того племени, в котором он существует

луэт и можно было проследить за всеми его передвижениями. В результате создавалось ощущение присутствия человека в комнате, но в то же время люди могли уединиться.

В современных мультимедиа-технологиях эта традиция нашла отражение в создании *устройства телетени*. Оно работает по принципу web-камеры, но вместо цветного изображения человека на специально оборудованном маленьком экране появляется его тень. Получается средство связи, которое может скрыть отдельные стороны личной жизни человека, но одновременно создает эффект постоянного участия в жизни близких людей, даже если они находятся далеко. Таким образом, разработчики избегают предельного реализма жизни «за стеклом» и одновременно — бесчувственности статичной картинки, которая не вызывает большого интереса у «избалованной» мультимедийной доступностью современной молодежи.

Культура каждого времени вырабатывает свою версию мира, определяя способы поведения, типы реагирования, формулы существования и т. д., тем самым формируя психологический каркас личности, ее «интеллектуальный профиль». Человек стремится каким-то адекватным способом создать себе простую, ясную картину мира. Это необходимо ему не только чтобы преодолеть мир, в котором он живет, но и чтобы в известной мере попытаться заменить этот мир созданной им виртуальной картиной. На эту картину и ее оформление человек переносит центр тяжести своей духовной жизни, чтобы в ней обрести покой и уверенность, которых он не может найти в слишком бурном круговороте собственной жизни.

Виртуальные сообщества

Принято считать, что первые *виртуальные сообщества* (*virtual community*) возникли с появлением «смайликов», которые давно уже стали неотъемлемой частью лексикона пользователей сети Интернет. Выразить свои эмоции в печатном виде бывает

гораздо сложнее, чем в устной личной беседе, поэтому существенной помощью для пользователей Интернета как раз стали «смайлики» (от английского *smile* — «улыбка»). Недавно им исполнилось уже 25 лет [73].

Используя «смайлики» и новые специальные аббревиатуры (например, *AKA* — *Also Known As* — «также известен как»), первые любители онлайн-переписки ощущали свою причастность к новой, зарождающейся культуре виртуального интернет-общения.

Значки, используемые для изображения эмоций на письме, лингвисты называют **эмодзиониками**, относя к ним и «смайлики». Эти символы помогают лучше понять настроение невидимого и неслышимого собеседника, эмоциональную окраску посланного им текстового сообщения, тем самым добавляя в него мультимедийную составляющую. Первый виртуальный эмотикон появился 19 сентября 1982 г. В этот день на форуме Университета Карнеги–Меллона появилось следующее сообщение профессора Скотта Фальмана: «Я предлагаю использовать данные символы, чтобы помечать шутки: : -). Читать нужно, склонив голову набок. Чтобы пометить предложение, которое не является шуткой, пишите: : - (».

Со временем количество возможных смайлов и аббревиатур сильно разрослось. Вот некоторые из них:

Россияне первыми додумались «ругаться матом» при помощи электронных символов верхнего регистра. Например, случайный набор !#@%!\$ — это эмоционально окрашенная негативная реакция, по смыслу адекватная ругательству. Стоит отметить, что нецензурные смайлы не используются больше ни в одной стране мира

: -) или :)	Основная улыбка
: -) или ;)	Шутливая, подмигивающая улыбка
: - (или : (Нахмутившийся, опечаленный
: - T	Равнодушный
: - e	Разочарованный
: - &	Прикусивший язык
: -]	Болван
: - Q	Курящий
: - [Грустный болван
: - P	С высунутым языком
: - D	Хохочущий
: - \	Нерешительный

:-/	Скептик
% -)	Опухший, либо сильно изумленный
(- :	Левосторонняя улыбка
:- { }	Намазавший губы, целующийся
C=}>; * {})	Пьяный злой черт в парике, с усами и двойным подбородком

Как видно из их списка, даже простые последовательности типографских символов могут стать платформой для зарождения отдельного направления искусства — поиска способов передачи эмоций с помощью текстовой псевдографики.

С течением времени, развитием мультимедиатехнологий и повышением скорости передачи информации усложнялись и виртуальные сообщества. Одними из самых «продвинутых», проработанных виртуальных сообществ по праву считаются группы игроков в игры класса *MMORPG* — *Massive Multiplayer Online Role Playing Game* («масштабная многопользовательская ролевая игра в режиме реального времени»). В них игроки взаимодействуют друг с другом через сеть Интернет в искусственно спроектированной, чаще всего «фэнтезийной» игровой вселенной.

В масштабной многопользовательской игре тысячи игроков могут одновременно находиться в одном и том же виртуальном мире. Они могут вместе попадать в приключения или сражаться друг с другом в эпических битвах, объединяться, вступать в союзы и сражаться с общими врагами.

Игры этого класса активно используют давнее эволюционное свойство человека (которое многими учеными считается решающим для доминирования *homo sapiens* над остальными обитателями Земли) — стремление объединяться в отряды или команды с четким разделением обязанностей для решения сложных задач.

Разработчики такой игры регулярно обновляют игровой мир, и с каждым новым обновлением перед игроками открываются все новые и новые горизон-

Чувство виртуального самовыражения — это один из мощнейших стимулов, побуждающих игроков часами проводить время за дисплеями

ты самосовершенствования. По словам источника [74], виртуальных игроков обычно стимулируют четыре мотива:

1) достижение во внутриигровом контексте — игроки ставят для себя внутриигровые цели и всеми силами стараются их достичь. Чаще всего это подразумевает накопление больших сумм золота или другого богатства, получение высокого уровня (в том числе чтобы иметь возможность без ущерба для себя перемещаться сквозь толпы агрессивных монстров) и т. д. Примеры из лексикона таких «карьеристов»:

- «Я занят»;
- «Конечно, я тебе помогу. Что я за это получу?»;
- «Так как ТЫ тогда сумел убить дракона, а?»;
- «Осталось набрать всего 4211 очков!»;

2) исследование игры — игроки стараются узнать как можно больше о виртуальном мире. Вначале это подразумевает изучение его топологии, а позднее ведет к экспериментам с «механикой» мира: исследуется глубина возможностей и способностей виртуального персонажа. Примеры из лексикона таких «исследователей»:

- «Ты и в самом деле не знаешь самый короткий путь из <тайной комнаты 1> в <тайную комнату 2>?»;
- «Я еще не пробовал это делать. Что из этого выйдет?»;
- «Почему, если ты несешь с собой уран, то получаешь лучевую болезнь. Если кладешь его в сумку, то все равно ее получаешь. А если кладешь его в сумку, на 20 секунд бросаешь ее на землю, а затем поднимаешь снова, то уже нет?»;

3) социализация с другими игроками — игроки используют коммуникативные средства игры для отыгрывания своей социальной роли через общение с другими игроками. Примеры из лексикона «социофилов»:

- «Привет!»;
- «Ну да, у меня проблемы с моим бойфрендом»;
- «Что случилось? Я пропустил, пока разговаривал»;

- «Серьезно? О нет! Боже, какой кошмар! Ты уверен? Ужасно, просто ужасно!»;

4) влияние на других игроков — игроки используют возможности игры, чтобы причинять страдания (или, в редких случаях, для помощи) другим игрокам. Там, где это разрешено, это часто означает приобретение оружия и процесс «приятного» убивания персонажа другого игрока. Примеры из лексикона «киллеров»:

- «Ха!»;
- «Трус!»;
- «Умири!»;
- «Умири! Умири! Умири!».

Однако по большей части взаимоотношения между игроками разных стилей — более тонкие: резкое уменьшение количества «исследователей» в игровом мире приводит к постепенному уменьшению количества «карьеристов», которым рано или поздно становится скучно набирать очки без «секретных лазеек», о которых они узнают от «исследователей». Это, в свою очередь, может повлиять на количество «социофилов» (чем меньше в мире игроков, тем меньше поводов для разговоров) и обязательно уменьшит количество «киллеров» (из-за общего сокращения популяции «подходящих жертв»).

Тем не менее не следует трактовать игроков в такие игры, как лиц, страдающих аутизмом в реальном мире. Результаты одного из исследований показали, что поклонники многопользовательских сетевых игр вовсе не являются замкнутыми и необщительными. Оказалось, что три четверти игроков нашли себе в виртуальных мирах друзей. Более половины игроков встречались друг с другом и вне Интернета, а между десятью процентами поклонников MMORPG даже завязались какие-то отношения.

В силу специфики ролевых игр, в виртуальных вселенных действуют свои законы физики и «виртуальной магии», существуют свои моральные ценности и «кодексы чести». Примечательным фактом являются правила поведения в игровой вселенной, постоянно совершенствуемые разработчиками. В них в достаточно высокой степени определяются стерео-

Интернет-зависимость (аддикция) — психическое расстройство, навязчивое желание подключиться к Интернету и болезненная неспособность вовремя отключиться от Интернета. Эта зависимость является широко обсуждаемым вопросом, но ее статус признания пока находится на неофициальном уровне

типы поведения, например: быть корректным по отношению к члену своей гильдии, не нападать на «потерявшего сознание» другого игрока и т. д.

Наглядным примером использования игровых мультимедиа-технологий в среде Интернет является моделирование распространения эпидемических заболеваний. Например, вышедшее из-под контроля разработчиков заклинание «*Corrupted Blood*», произошедшее в виртуальном мире «Warcraft» в 2005 г., привело к гибели населения целых виртуальных городов, породило панику и социальный хаос среди выживших персонажей. По мнению ученых, эта эпидемия в виртуальном мире стала идеальной моделью настоящих вспышек инфекционных заболеваний, которая кроме обычных параметров позволяет учитывать такие факторы, как роль домашних животных при распространении инфекции, быстрое и неконтролируемое перемещение инфицированных лиц между населенными пунктами, а также рискованное и откровенно глупое поведение отдельных граждан.

Отдельно следует отметить неигровые виртуальные среды, также служащие средством виртуального самовыражения или даже «избегания реальности» (*escape from reality*). Популярный проект *Second Life* в 2007 г. стал средством организации виртуальных забастовок. Работники итальянского подразделения компании IBM провели в виртуальной среде акцию протеста против низкой заработной платы и игнорирования требований о ее повышении со стороны работодателя. Члены профсоюза, пользуясь интернациональностью среды Интернет, привлекли к забастовке работников представительств IBM по всему миру, чтобы показать работодателям свое единство в обозначении социальных требований.

Характеризуя тенденции развития виртуальных сообществ в целом, следует отметить, что интернет-сообщества все больше и больше выступают в роли «громоотвода», когда социально значимые слои населения вместо того, чтобы обустраивать свою жизнь

на самом деле, погружаются в мультимедийные виртуальные миры и ищут выход своему самовыражению не в реальности, а в искусственно созданной среде. Подводя итоги сказанному, хотелось бы подчеркнуть, что такая перспектива недостойна гордого звания «человек разумный». По мнению автора книги, перспективы перемещения основной поведенческой модели в виртуальный мир — это временная тенденция, и в силу превалирующего свойства человека, обеспечившего ему господство на Земле, — *умению думать и объединяться*, оно же и выведет его из нынешнего мультимедийного тупика.

Мультимедийное резюме



В этой, завершающей, главе рассмотрены психологические особенности восприятия мультимедиа-продукции, связанные с различными социумами, к которым может относиться пользователь.

- Существует отдельная наука — *социальная синергетика*, которая занимается вопросами изучения феномена самоорганизации внутри социумов, состоящих из отдельных, независимых индивидуумов.
- Социокультурное воспитание пользователя оказывает подсознательное влияние на восприятие им различных цветов и образов. Другие факторы, такие как географическая расположенностъ, генетические взаимосвязи, специфика профессии человека тоже обеспечивают различные психологические реакции людей на одинаковые мультимедиа-сигналы. В связи с этим в работах, предназначенных для публичного показа, трудно избежать различного их истолкования разными категориями зрителей. Избирательность культурных ассоциаций обязательно должна учитываться создателями мультимедиа-продукции.
- В различных культурах существует *язык цветов* — цветовая символика, отображающая разные идеи или чувства. Однако даже в пределах одной культуры значение цвета может меняться с течением времени, иногда даже быстрее, чем скорость изменения самой культуры — носителя значения того или иного цвета.

- Вместе с распространением сети Интернет начали активно развиваться *виртуальные сообщества*, объединяющие по какому-либо признаку пользователей сети. Появляются новые *киберкультуры* — игровые, профессиональные, или даже сленговые (пример — «язык падонкафф»). Одним из характерных примеров новых субкультур являются *масштабные многопользовательские игры (MMORPG)*, которые служат хорошим полигоном для выявления основных моделей поведения и психотипов игроков, проверки различных положений социальной синергетики. Эти тенденции демонстрируют эволюционное преимущество человека, которое заключается в способности к объединению в группы для решения сложных задач. Наличие этого преимущества позволяет надеяться, что человечество сможет и в дальнейшем органично развивать современные мультимедиа-технологии, избавившись, вместе с тем, от психологической зависимости от них.

Литература

1. Балаховская Т. Три значения мультимедиа // КомпьютерПресс. 1995. № 2.
2. Шлыкова О.В. Культура мультимедиа: Уч. пособие для студентов. М.: ФАИР_ПРЕСС, 2004.
3. Сторчак В.В. Знакомьтесь — multimedia. М.: Компьютеры + программы, 1993.
4. Воган Т. Самое полное руководство по созданию мультимедийных проектов. М.: НТ Пресс, 2006.
5. Баузер Ф.Л., Гооз Г. Информатика. Вводный курс: В 2 ч. Ч. 1. М.: Мир, 1990.
6. Гайсарян С.С., Луговая И.З. Принципы программирования на абсолютно универсальных вычислительных машинах. М.: МАИ, 1981.
7. Зайцев В.Е., Крапивенко А.В., Лукашевич С.Ю. Об одной технологии конструирования технической документации // Информационные технологии в проектировании и производстве. 1997. №1. С. 46–48.
8. Крапивенко А.В. Кроссп-кадровая интерполяция видеоданных / Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МАИ, 2001.
9. Физиология человека: Уч. пособие / Под ред. А.А. Семеновича. Минск: Вышэйшая школа, 2007.
10. Рош У. Библия Мультимедиа. Киев: Диасофт, 1998.
11. Берн, Дж. Цифровое освещение и визуализация / Пер. с англ. М. : Издательский дом «Вильямс», 2003.
12. http://www.gazeta.ru/science/2007/02/08_a_1343848.shtml
13. Психологический словарь: <http://dedeve.narod.ru/slovar/3a31.htm>
14. Величковский Е.М., Зинченко Д.Л., Лурия А.Р. Классификация перцептивных процессов: <http://zalisa.ru/ps/percep.shtml>
15. Психология: Учебник / Под ред. А.А. Крылова. М.: Проспект, 2003.
16. Прохоров А. Запах, форма, вкус и цвет через Интернет // КомпьютерПресс. 2001. № 3.
17. Trisenx Products: <http://www.trisenx.com/product.html>
18. Немов С.Р. Общие основы психологии: Кн. 1. М.: Владос, 2008.
19. Оулетт Т. Устройства виртуальной реальности производят сенсацию // ComputerWorld Россия. 1996. № 2.
20. http://www.valeon.kiev.ua/index.php?lang_id=1&content_id=705&lp=58
21. Прохоров А. Периферийные устройства для глубокого погружения // Компьютер-Пресс. 2001. № 4.

22. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.
23. Брайс Р. Справочник по цифровому телевидению. Жуковский: Эра, 2001.
24. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006.
25. Красильников Н.Н. Цифровая обработка изображений. М.: Вузовская книга, 2001.
26. Хацевич Т.Н. Медицинские оптические приборы. Физиологическая оптика: Учебное пособие. Новосибирск: СГГА, 1998.
27. Демидов В.Е. Как мы видим то, что видим. М.: Знание, 1987.
28. Варикаш В. М., Кимбар Б. А., Варикаш И. М. Физика в живой природе. Минск: Народная асвета, 1984.
29. Острота зрения: <http://n-t.ru/tp/nr/oz.htm>
30. Приваленко П. Как мы видим? Или предыстория вопроса «Что мы видим?» // Hard'n'soft. 1996. № 5.
31. Сайрус М. Смит. Приборы ночного видения для сил специального назначения: <http://eoossib.ssga.ru/pnv/index.html>
32. Джакония В.Е., Гоголь А.А., Друзин Я.В. и др. Телевидение: Учебник для вузов. М.: Радио и связь, 2000.
33. Оптические основы фотографии: <http://www.artprojekt.ru/Photo/OsOptica/Optic.html>
34. Физиология сенсорных систем. Ч. 1: Физиология зрения / Под ред. Г.В. Гершун. Л.: Наука, 1971.
35. Форсайт Д. А., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Издательский дом «Вильямс», 2004.
36. Википедия (раздел «Психология восприятия цвета»).
37. Purves D., Lotto B., Nundy S., Coppola D., Shimpri S: Why are angles misperceived? // Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), PNAS, 2000. 97:5592-5597
38. Грегори Р.Л. Разумный глаз. М.:Мир, 1972.
39. Арнольди Э.М. Жизнь и сказки Уолта Диснея. Л.: Искусство, 1968.
40. Сойнова Н. Что такое синестезия?: <http://www.humanus.ru/humanus/> 20322
41. Журавлёв А.П. Звук и смысл. М.: Просвещение, 1991.
42. Галеев Б.М. Что такое синестезия: мифы и реальность: http://prometheus.kai.ru/mif_r.htm
43. Казанцев О.В., Крапивенко А.В. Бизуальный мониторинг аудиоданных: Материалы конференции. Ч. 7. М.: МГАТУ (МАТИ), 1996.
44. Lotto R.B., Purves D. The Effects of Color on Brightness // Nature Neurosci. 1999. 2. 1010-1014.
45. Кроль В.М. Психология: Учебное пособие. М.: Высшая школа, 2005.
46. Лапин А.И. Плоскость и пространство. М.: Издатель Л.Гусев, 2006.
47. Елхов В.А., Кондратьев Н.В. и др. Стереокомпьютерные методы формирования изображения и их применение // Техника кино и телевидения. 2001. № 8.
48. Мелкумов А. Красно-синее кино: <http://www.stereokino.ru/artical3.htm>
49. Краткий толковый словарь терминов стереоскопии: <http://www.stereomir.ru>
50. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. В 2 кн. М.: Мир, 1985.

51. Purves D., Lotto B. Tricking the eye or trapping the reflex? // Duke Magazine Perspectives. 2000. July–August.
52. Ярбус А.Л. Движения глаз при восприятии сложных объектов // Хрестоматия по ощущению и восприятию. М.: Наука, 1975.
53. Рубинштейн С. Л. Основы общей психологии. СПб.: Питер, 1998.
54. Эблан Д. Цифровая съемка и режиссура. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003.
55. Синецкий Д. Видеокамеры и видеосъемка: Практическое руководство. М.: Международное агентство «A.D.&T», 1999.
56. Бабиченко Д.Н. Искусство мультипликации. М.: «Искусство», 1964.
57. Четыре лекции по анимации: <http://lostmarble.ru/help/L-animation/index.html>
58. 12 принципов анимации Диснея: <http://lostmarble.ru/help/disney12/index.html>
59. Ватолин Д.С. Алгоритмы сжатия изображений. М: МГУ, 1999.
60. Recommendation ITU-R BT.500. Methodology for the Subjective Assessment of the Quality of Television Pictures.
61. Фили Дж. Как измеряют качество видеосигнала // Цифровое видео online. 1999. № 3.
62. Артюшенко В.М., Шелухин О.И. и др. Цифровое сжатие видеоинформации и звука. М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2003.
63. Чепмен Н., Чепмен Дж. Цифровые технологии мультимедиа: 2-е изд. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006.
64. Багларов И.А. и др. Стереофоническое вещание. М.: Радио и связь, 1993.
65. Мандельброт М. Фракталы, случай и финансы. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004.
66. Пайтген Х.-О., Рихтер П.Х. Красота фракталов. М.: Мир, 1993.
67. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. М.: Постмаркет, 1999.
68. Ватолин Д. Применение фракталов в машинной графике // Computer World. 1995. № 15.
69. Гребеник В. Усовершенствованный алгоритм сжатия изображений на основе ИФС // Труды конференции GRAPHICON-1998.
70. Barnsley M. Fractals Everywhere. San Diego: Academic Press, 1989.
71. Крапивенко А.В. О геометрических фрактальных парадоксах рациональных эндо-морфизмов: Сборник НИРС. М.: МАИ, 2007.
72. Крапивенко А.В., Сулеев И.М. Генерация ландшафтов с использованием воксельной графики // САПР. 1999. № 8.
73. <http://www.utro.ru/articles/2007/09/19/681016.shtml>
74. <http://www.ireon.org/docs/html/hcds.html>

Учебное издание

Крапивенко Андрей Викторович

ТЕХНОЛОГИИ МУЛЬТИМЕДИА И ВОСПРИЯТИЕ ОЩУЩЕНИЙ

Учебное пособие

Ведущий редактор Д. Усенков

Художественный редактор С. Инфантэ

Технический редактор О. Лапко

Художник Н. Зотова

Корректор Е. Клитина

Компьютерная верстка Е. Голубова

Подписано в печать 12.02.09. Формат 70×90/16

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 19,89

Тираж 2000 экз. (первый завод - 1000 экз.) Заказ 5138.

Издательство «БИНОМ. Лаборатория знаний»

Адрес для переписки: 125167, Москва, проезд Аэропорта, 3

Телефон: (499) 157-5272. E-mail: binom@Lbz.ru

<http://www.Lbz.ru>

Отпечатано в производственной фирме «Полиграфист»

160001, г. Вологда, ул. Челюскинцев, 3.



Крапивенко Андрей Викторович – кандидат физико-математических наук, доцент факультета прикладной математики и физики Московского Авиационного Института. Автор и основной лектор нескольких спецкурсов цикла дисциплин «Методы, средства и технологии мультимедиа» на кафедре «Вычислительная математика и программирование».

Основная сфера научных интересов – мультимедиа-технологии, обработка цифрового видео, фракталы, менеджмент в IT-дисциплинах. Автор более 15 печатных работ. В 2002–2003 гг. удостоен Гранта Президента РФ молодым кандидатам наук.

ISBN 978-5-94774-967-0

9 785947 749670