

Цифровое представление изображений

Содержание

1	Основы зрительного восприятия человека	2
1.1	Введение	2
1.2	Строение человеческого глаза	3
2	Цвет	7
2.1	Спектр	7
2.2	Отражаемый свет	8
2.3	Восприятие цвета	9
2.4	Первичные и вторичные цвета	9
3	Цифровое представление изображений	10
3.1	Как видит изображение компьютер	10
3.2	Параметры растрового изображения	10
3.3	Уровни яркости	11
3.4	Светлота, цветовой тон и насыщенность	11
3.5	Координаты цветности	11
3.6	Диаграмма цветностей	12
3.7	Цветовой охват	12
4	Модели цвета	13
4.1	RGB	13
4.2	Цветовая система Манселла	14
4.3	HSI	15
4.4	HSI/HSL/HSV/HSB	15
4.5	CIE Lab	16
4.6	HCL	17
4.7	Представление цифровых изображений	17
4.8	Представление цветного изображения	17

1 Основы зрительного восприятия человека

1.1 Введение

Системы компьютерного зрения, во многом, строятся по аналогии со зрительной системой человека. Если мы хотим научить машину видеть мир и анализировать визуальную информацию так, как это делает человек, то сначала надо разобраться, как же работает зрительная система человека. Как изображение формируется в глазу? Какого рода информацию человек способен извлечь из визуального сигнала? Какими физическими ограничениями обладает система зрительного восприятия человека? Всё это не только интересно, но и важно в практическом плане.

Зрительная система человека обладает удивительными способностями. Мы распознаём людей и предметы в самых различных условиях: с различных ракурсов, при разном освещении, даже если видна только часть объекта. Мы способны с лёгкостью извлечь информацию о размерах предметов, местоположении относительно друг друга, расстояниях между объектами. Наш мозг способен "достроить" картинку, если видна только ее часть.

В то же время, наша зрительная система далеко не идеальна. Мы подвластны иллюзиям, не замечаем многие детали, наше восприятие неоднозначно и субъективно, зависит от нашего "зрительного опыта".

Давайте посмотрим на несколько примеров, иллюстрирующих способности зрительной системы человека.

Как видим мы – внутриклассовая изменчивость объектов Посмотрите на картинки на этом слайде. Для нас не составляет никакого труда понять, что всё это – изображения разных видов ламп, даже если некоторые из этих ламп вы видим впервые в жизни. Лампы могут быть разной формы, разного цвета, разного размера. Но мы всё равно понимаем, что это всё – лампы.

Как видим мы – неоднозначность восприятия А что вы видите на этих изображениях? На самой левой картинке можно увидеть молодую женщину или старуху в платке, на центральном – эскимоса или индейца, на правом – саксофониста или лицо женщины. Наше восприятие неоднозначно.

Несколько фактов о нашем зрительном восприятии – 1 Мозг и наш зрительный опыт играет очень важную роль в том, как мы интерпретируем зрительный сигнал. Мозг способен "достроить" картинку, даже если видна только часть, или добавить семантику, распознать объект, даже когда его

там нет. Человек часто даёт не соответствующее действительности объяснение наблюдаемой им картине. Мы все можем узнать "что-то" или "кого-то" в очертании облака.

То, как наш мозг достраивает и интерпретирует картинку очень сильно зависит от нашего зрительного опыта. Наша зрительная система "самообучается" на протяжении всей нашей жизни. Нам проще распознавать изображения, привычные нашему глазу. Например, типичному европейцу сложно различать лица азиатов, а людям выросшим среди африканцев, все белые будут казаться "на одно лицо".

Посмотрите на эту черно-белую картинку. Можете распознать, что это? А если перевернуть? В привычной ориентации существенно проще распознать очертания карты мира.

Несколько фактов о нашем зрительном восприятии – 2 Ещё пара иллюстраций к тезису о том, что мы часто ищем в изображении знакомые образы, и наш мозг "достраивает" картинку. Это примеры известных оптических иллюзий, в которых глаз восполняет несуществующую информацию.

На левом рисунке ясно видны очертания квадрата, вопреки тому факту, что на изображении отсутствуют линии, определяющие такую фигуру. Аналогичный эффект, на этот раз в виде круга, виден на правом рисунке. Всего нескольких линий достаточно для получения иллюзии круга.

Несколько фактов о нашем зрительном восприятии – 3 От того, где мы выросли, зависит, как мы "видим" мир вокруг нас. Например, на этом рисунке ступеньки идут вверх или вниз? Большинство из нас, кто пишет и читает слева направо, ответят, что вверх. А для тех, кто привык читать справа налево, ступеньки будут вести вниз.

1.2 Строение человеческого глаза

Глаз имеет почти сферическую форму со средним диаметром около 20 мм. По сути, глаз – это оптическая сфера. Свет проникает в глаз через зрачок – отверстие в центре радужной оболочки глаза, преломляется хрусталиком и проецируется на внутреннюю оболочку глаза – сетчатку.

Зрачок может сужаться или расширяться, регулируя тем самым количество попадающего света. Диаметр зрачка может изменяться в пределах от 2 до 8 мм.

Хрусталик, расположенный за радужной оболочкой глаза и зрачком, играет роль оптической линзы. В отличие от жёсткой оптической линзы, оптическая сила хрусталика может изменяться за счёт изменения его формы. Как видно на рисунке, радиус кривизны передней поверхности капсулы хрусталика больше, чем задней. Изменение формы хрусталика происходит путём

ослабления или натяжения передней и задней порции волокон ресничного пояска. Для фокусировки зрения на удалённом предмете ресничная мышца расслабляется, хороидея сжимается, натягивая при этом волокна ресничного пояска, в результате чего хрусталик приобретает уплощенную форму. А для фокусировки на близкорасположенном предмете ресничная мышца сокращается, что приводит к округлению хрусталика и увеличению его преломляющей способности. При изменении преломляющей способности хрусталика с минимального значения до максимального, его фокусное расстояние изменяется от 17 мм до 14 мм. При рассмотрении предметов на расстоянии больше 3 метров преломляющая способность хрусталика минимальна, при разглядывании предметов вблизи, преломляющая способность хрусталика максимальна.

При правильной оптической фокусировке глаза свет от наружного объекта проецируется в виде изображения на сетчатку. По внутренней поверхности сетчатки распределены дискретные светочувствительные клетки (рецепторы), которые регистрируют изображение. Эти рецепторы бывают двух видов – колбочки и палочки. Колбочки обладают высокой чувствительностью к спектральным составляющим света и обеспечивают фотопическое зрение – зрение в ярком свете. В глазу насчитывается от 6 до 7 миллионов колбочек. Все они располагаются преимущественно в центральной области сетчатки, называемой жёлтым пятном. В центре жёлтого пятна имеется так называемая центральная ямка – область наибольшей остроты зрения. Человек различает мелкие детали изображения в основном благодаря колбочкам. Каждая колбочка соединена с отдельным нервным окончанием. Наружные мышцы глаза обеспечивают вращение глазного яблока так, чтобы изображение интересующего объекта попало в область жёлтого пятна.

Палочек в глазу намного больше, чем колбочек – от 75 до 50 миллионов. В отличие от колбочек, палочки распределены по всей поверхности сетчатки, и к одному нервному окончанию присоединено сразу несколько палочек (в среднем, около 10). Это уменьшает их способности различать детали изображения. Палочки позволяют сформировать общую картину всего поля зрения. Они наиболее чувствительны при низких уровнях освещённости и не участвуют в обеспечении функции цветного зрения. Поэтому предметы, имеющие яркую окраску при ярком освещении, выглядят как лишённые цветов образы при сумеречном освещении, так как при сумеречном освещении возбуждаются только палочки. Это явление известно как скотопическое (или сумеречное) зрение.

Яркостная адаптация и контрастная чувствительность – 1 Знание о способности глаза различать разные уровни яркости имеет важное практическое значение. Оно поможет выбрать правильную схему дискретизации уровня яркости для представления цифровых изображений.

Зрительная система человека способна адаптироваться к огромному диапазону значений яркости, порядка 10^{10} – от порога чувствительности скотопического зрения до предела ослепляющего блеска. Эксперименты также показывают, что субъективная яркость (т.е. яркость, как она воспринимается человеком) является логарифмической функцией от физической яркости света, попадающего в глаз. На слайде изображен график этой зависимости субъективной яркости от истинной яркости. Длинная сплошная кривая представляет диапазон яркостей, в котором способна адаптироваться зрительная система человека. При использовании одного фотопического зрения этот диапазон составляет около 10^6 . При низких уровнях яркости происходит постепенный переход от фотопического к скотопическому зрению.

Яркостная адаптация и контрастная чувствительность – 2 Но важно понимать, что это динамический диапазон – зрительная система человека не способна работать во всем этом диапазоне одновременно. Она охватывает такой большой диапазон за счёт изменения общей чувствительности. Это явление известно как яркостная адаптация. Общий диапазон одновременно различаемых уровней яркости относительно мал по сравнению со всем диапазоном адаптации. Для любого данного набора внешних условий текущий уровень чувствительности зрительной системы, называемый уровнем яркостной адаптации, соответствует некоторой яркости, например, точке B_a на графике. Короткая кривая, пересекающая основной график, представляет диапазон субъективной яркости, которую способен воспринимать глаз при адаптации к указанному уровню. Этот диапазон достаточно ограничен: все уровни яркости ниже B_b субъективно воспринимаются зрением как чёрное и неразличимы. Верхняя пунктирная часть этой кривой реально не ограничена, но теряет смысл при большой длине, поскольку при повышении яркости просто повышается уровень адаптации B_a .

Способность зрения различать изменения яркости при данном уровне адаптации также представляет значительный интерес. Классический эксперимент для определения способности зрительной системы человека различать разные уровни яркости состоит в следующем. Испытуемого просят смотреть на большой плоский равномерно освещённый экран. Экран должен быть такого размера, чтобы занимать все поле зрения испытуемого. Яркость экрана (обозначенная I на слайде) можно регулировать. На это равномерно освещённый экран накладывается добавочная яркость δI в форме кратковременной вспышки в области круглой формы, расположенной в центре экрана, как изображено на слайде.

Малые приращения δI неразличимы для испытуемого – он не замечает вспышек. По мере увеличения δI в какой-то момент испытуемый начнёт замечать вспышки, т.е. будет воспринимать изменение яркости. Величина

$\delta I_c/I$, где δI_c – величина приращения яркости, различимая в 50% случаев на фоне яркости I , называется отношением Вебера. Малое значение отношения Вебера означает, что различаются очень малые относительные изменения яркости, т.е. имеет место высокая контрастная чувствительность. Большое значение отношения Вебера означает, что требуется большое относительное изменение яркости, чтобы его можно было заметить. Это говорит о низкой контрастной чувствительности.

График зависимости логарифма отношения Вебера от логарифма фоновой яркости ($\log(\delta I_c/I)$ от $\log(I)$) изображён на слайде. Эта кривая показывает, что низкая контрастная чувствительность (т.е. большое отношение Вебера) наблюдается при малых уровнях яркости. Контрастная чувствительность заметно возрастает при увеличении фоновой яркости. Наличие двух частей кривой отражает тот факт, что при малых уровнях яркости зрение осуществляется благодаря палочкам, а при больших уровнях яркости – за счёт колбочек.

Если поддерживать фоновую яркость постоянной, а яркость добавочного источника варьировать не вспышками, а ступенчатым изменением яркости от неотличимого до заметного всегда, то типичный наблюдатель способен различить всего 10-20 ступеней яркости. Грубо говоря, это означает, что в произвольной точке монохромного изображения, человек способен различить всего 10-20 уровней яркости. Но это не означает, что всё изображение может быть представлено таким небольшим числом градаций яркости. По мере движения глаза по изображению меняется среднее значение яркости фона, что позволяет нам обнаруживать различные множества относительных изменений яркости для каждого нового уровня адаптации. Следствием этого является способность глаза различать яркости в намного более широком общем диапазоне, чем 20 уровней.

Воспринимаемая яркость, как функция истинной яркости: полосы Маха Воспринимаемая яркость не является простой функцией истинной яркости. Известны два явления, подтверждающие это утверждение. Первое основывается на том факте, что вблизи границ соседних областей с отличающимися, но постоянными яркостями зрение человека склонно "подчёркивать" яркостные перепады. Посмотрите на картинку на слайде. Нам кажется, что яркость полос не постоянна, что вблизи границы с более светлой полосой яркость становится ниже, а вблизи границы с более тёмной полосой яркость становится выше. Хотя на самом деле яркость каждой из полос постоянна. Эти полосы с кажущимися изменениями яркости на краях называются полосами Маха в честь Эрнста Маха, впервые описавшего этот феномен в 1865г.

Воспринимаемая яркость, как функция истинной яркости: одновременный контраст Второе явление, называемое одновременным контрастом, связано с тем фактом, что воспринимаемая яркость некоторой области определяется не только ее собственной истинной яркостью, но и яркостью соседних областей. В верхней части слайда все три внутренних квадрата имеют одинаковую яркость. Но зрительно левый внутренний квадрат воспринимается светлее, чем правый – потому что фон левого квадрата темнее, чем фон правого. Чем более светлый фон, тем темнее кажется объект на этом фоне.

Тот же эффект наблюдается и на картинке в нижней части слайда. Обе тонкие полосы имеют одинаковую яркость, но нам кажется, что левая полоса светлее правой.

Ещё одним примером является лист белой бумаги, который кажется белым, когда он лежит на столе, но может показаться совершенно чёрным, если им закрывать глаза, глядя на яркое небо.

Иллюзия с тенью на шахматной доске И ещё одна иллюзия, в основе которой также лежит феномен одновременного контраста. Зрительно квадрат А нам кажется темнее квадрата В. Хотя на самом деле, оба квадрата, А и В, абсолютно одинаковой яркости.

2 Цвет

Мы поговорили немного о яркости и её восприятии человеком. Давайте теперь обратимся к цвету. Что есть цвет? Как наша зрительная система распознает разные цвета?

Как и в случае с яркостью, воспринимаемый нами цвет зависит не только от физических свойств освещения и объектов. Строго говоря, воспринимаемый нами цвет – это результат взаимодействия между световыми волнами и нашей зрительной системы.

2.1 Спектр

Хотя процесс восприятия и интерпретации цвета человеческим мозгом представляет собой не до конца исследованное психофизиологическое явление, физическая природа цвета может быть точно описана.

Ещё в 1666г. сэр Исаак Ньютон обнаружил, что при прохождении луча солнечного света через стеклянную призму выходящий поток лучей не является белым, а состоит из непрерывного спектра цветов, от фиолетового цвета на одном конце до красного на другом. Диапазон цветов, которые мы воспринимаем как видимый свет, составляет очень малую часть спектра электромагнитного излучения. На одном конце этого спектра находятся радиоволны,

длина которых в миллиарды раз превышает длины волн видимого света, а на другом конце – гамма-лучи, длина которых в миллионы раз меньше длины световых волн.

Электромагнитные волны можно трактовать как распространяющиеся синусоидальные колебания с длиной волны λ , а можно – как поток частиц с нулевой массой, движущихся со скоростью света. Каждая такая частица не имеет массы, но обладает определённой энергией и называется квантом излучения, или фотоном. Энергия фотона пропорциональна частоте излучения, т.е. электромагнитные колебания более высокой частоты (т.е. с более короткой длиной волны) обладают большей энергией фотона. Таким образом, у радиоволн энергия фотона мала, у микроволн энергия больше, у инфракрасного излучения еще больше, далее энергия фотона последовательно возрастает для диапазонов видимого спектра, ультрафиолетового излучения, рентгеновских лучей, и, наконец, гамма-лучей, обладающих самой большой энергией.

Свет является особым видом электромагнитного излучения, которое воспринимается человеческим глазом. На слайде приведён видимый цветовой спектр в "растянутом" виде. Видимый диапазон электромагнитного спектра охватывает длину волны приблизительно от 400 до 700 нм. Для удобства цветовой спектр часто делят на шесть широких цветовых диапазонов: фиолетовый, синий, зелёный, жёлтый, оранжевый и красный. Это деление достаточно условно – иногда говорят о пяти цветах, объединяя красно-оранжевый или сине-фиолетовый участки спектра, а иногда о семи цветах, выделяя голубой участок спектра между синим и зелёным. Ни один цветовой диапазон не имеет ярко выраженных границ, вместо этого каждый цвет плавно переходит в другой.

Итак, каждый источник света может быть однозначно определён его спектром – количеством излучаемой энергии для каждой длины волны.

2.2 Отражаемый свет

Цвет, воспринимаемый человеком, как цвет объекта, определяется характером света, отражённого от этого объекта. Предмет, который отражает свет приблизительно одинаково во всём видимом диапазоне, представляется наблюдателю белым. Предмет, который отражает свет только в каком-то ограниченном диапазоне волн, будет восприниматься того цвета, который соответствует отражаемому диапазону волн. Например, красный предмет в основном отражает свет с длинами волн 625-740 нм, поглощая большинство энергии в других интервалах длин волн.

Свет, лишенный цветовой окраски, называется ахроматическим или монохроматическим. Единственным параметром такого освещения является его интенсивность, или яркость. Для описания монохроматической яркости так-

же используется термин уровень серого поскольку яркость изменяется от черного до белого, с промежуточными оттенками серого.

2.3 Восприятие цвета

Рецепторами глаза, отвечающими за восприятие цветов человеком, являются колбочки. Экспериментально было установлено, что все 6-7 миллионов колбочек в нашем глазу могут быть разделены на три основных группы по их восприимчивости к спектральному составу света. Эти три группы приблизительно соответствуют чувствительности к коротким, средним и длинным волнам, или синему, зелёному и красному цветам. Примерно 65% всех колбочек воспринимают красный цвет, 33% – зелёный и только около 2% – синий. На слайде показаны экспериментальные кривые спектральной чувствительности колбочек каждой из трёх групп для среднего нормального глаза.

2.4 Первичные и вторичные цвета

Вследствие таких спектральных характеристик человеческий глаз воспринимает цвета как различные сочетания так называемых первичных цветов: красного, зелёного и синего. В 1931 г. Международная комиссия по освещению (МКО) разработала стандартный набор монохроматических первичных основных цветов, зафиксировав длины волн для стандартных синего, зелёного и красного цветов. Но важно понимать, что наличие стандартного набора монохроматических первичных основных цветов не означает, что все цвета спектра могут быть получены на основе этих фиксированных RGB цветов. Использование термина «основные» часто приводит к тому заблуждению, что все видимые цвета могут быть воспроизведены при смешении основных первичных цветов в различных пропорциях. Это не верно, за исключением того случая, когда длина волны основных цветов также может изменяться. Но в этом случае уже нельзя говорить о трёх стандартных первичных основных цветах.

Первичные основные цвета могут складываться, что даёт вторичные основные цвета: пурпурный (красный плюс синий), голубой (зелёный плюс синий) и жёлтый (красный плюс зелёный). Смешение трёх первичных основных цветов, или вторичного основного цвета и противоположного ему первичного, в правильных пропорциях даёт белый цвет. Результат такого смешения показан на слайде, где также показаны три первичных основных цвета и их сочетания, дающие вторичные основные цвета.

Также важно различать первичные основные цвета световых источников и первичные основные цвета красителей. Для красителей первичный основной цвет определяется как цвет, который поглощает один первичный основной цвет светового источника и отражает два оставшихся. Поэтому для красителей первичными основными цветами являются пурпурный, голубой и

жёлтый, а вторичными — красный, зелёный и синий. Правильная комбинация трёх первичных основных цветов красителей или вторичного основного цвета и противоположного ему первичного даёт чёрный цвет.

Основные цвета световых источников ещё называют аддитивными, а красителей — субтрактивными.

3 Цифровое представление изображений

3.1 Как видит изображение компьютер

Для формирования цифрового изображения необходимо преобразовать непрерывный аналоговый сигнал, поступающий с сенсоров, в цифровую форму путём дискретизации и квантования. Давайте сначала рассмотрим монохромное изображение. Исходное аналоговое изображение непрерывно по координатам x и y , а также по уровню яркости. Чтобы преобразовать эту функцию в цифровую форму, необходимо ее представить отсчётами по обеим координатам и по уровням яркости. Представление координат в виде конечного множества отсчётов называется дискретизацией, а представление уровня яркости в значениями из конечного множества — квантованием.

В результате операций дискретизации и квантования возникает матрица действительных чисел. Такой формат представления изображения в виде матрицы называется растровым. Каждый элемент матрицы соответствует одному пикселю изображения. Значение элемента соответствует уровню яркости, или интенсивности, соответствующего пикселя. Значения интенсивности часто нормированы в диапазоне от 0 до 1. При такой нормировке белый пиксель будет иметь значение 1, чёрный — значение 0.

3.2 Параметры растрового изображения

Два основных параметра растрового изображения — это его пространственное и яркостное разрешение. Дискретизация является главным фактором, определяющим пространственное разрешение изображения. По существу, пространственное разрешение — это размер мельчайших различимых деталей на изображении. Пространственное разрешение (resolution) измеряется в числе пикселей на единицу пространственного измерения. Стандартная единица измерения — ppi, pixels per inch.

Размерность изображения тесно связана с его разрешением. Чем выше разрешение изображения, тем большего размера можно напечатать или отобразить на экране изображение без видимой потери качества.

Если нет необходимости измерять реальное пространственное разрешение и достигаемую степень детализации исходной сцены, то изображение,

имеющее размеры $M \times N$ пикселей, часто называют изображением с пространственным разрешением $M \times N$ пикселей.

3.3 Уровни яркости

Яркостным (или полутоновым) разрешением, называется мельчайшее различимое изменение яркости. Часто яркостное разрешение задают в числе уровней (или градаций). В виду особенностей цифровой техники, число уровней обычно выбирается равным степени 2. Наиболее частым решением является выбор 8-битного представления, что соответствует 256 уровням яркости. В некоторых приложениях используется 16 бит, если необходимо иметь более точное представление полутонов. Иногда можно встретить системы, в которых квантование уровней яркости изображения проводится с 10 или 12 битами точности, но это скорее исключение, чем правило.

На слайде приведены примеры изображений с разными уровнями яркости.

3.4 Светлота, цветовой тон и насыщенность

Часто для различения цветов используются такие параметры, как светлота, цветовой тон и насыщенность. Светлота является субъективной характеристикой. Она отражает уровень зрительного ощущения интенсивности света.

Цветовой тон характеризует доминирующий цвет, воспринимаемый наблюдателем. Когда мы называем некоторый объект красным, оранжевым или жёлтым, мы обозначаем его цветовой тон.

Насыщенность цвета связана с его относительной белизной. Спектрально чистые (монохроматические) цвета являются полностью насыщенными. Такие цвета как розовый (смесь красного и белого) или бледно-лиловый (смесь фиолетового и белого) менее насыщены. Причём величина насыщенности цвета обратно пропорциональна количеству белого цвета в смеси.

Цветовой тон и насыщенность вместе называют цветностью. Каждый цвет может быть охарактеризован своей цветностью и светлотой.

3.5 Координаты цветности

Величины красного, зелёного и синего, необходимые для получения некоторого конкретного цвета, называются координатами цвета и обозначаются соответственно X , Y и Z . Часто при описании цвета светлота не представляет интереса, и в таком случае цветовой тон и насыщенность можно выразить в координатах цветности x , y и z , которые определяются как

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, y = \frac{Y}{X + Y + Z}, z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (1)$$

Из данных выражений видно, что $x + y + z = 1$.

3.6 Диаграмма цветностей

Другой способ задавать цвета основан на использовании диаграммы цветностей, созданной Международной Комиссией по Освещению (МКО) в 1931г на основе серии экспериментов по оценке восприятия цвета человеком. Вся совокупность цветов может быть представлена как функция x (красной) и y (зелёной) координат цветности. Для любых значений координат x и y соответствующее значение синей координаты цветности z может быть получено из выражения $z = 1 - (x + y)$.

Вдоль границы диаграммы цветностей, имеющей форму языка, расположены различные цвета спектра — от фиолетового с длиной волны 380 нм до красного с длиной волны 780 нм. Любая точка, расположенная не на границе, а внутри диаграммы, представляет некоторую смесь цветов. Точка равной энергии, соответствующая координатам $(x, y) = (1/3, 1/3)$ соответствует равным долям трёх первичных основных цветов; она представляет опорный белый цвет стандарта МКО. Любая точка, расположенная на границе диаграммы цветностей, имеет максимальную цветовую насыщенность. По мере того как точка смещается от границы к точке равной энергии, соответствующий ей цвет содержит в своём составе все большую долю белого и становится все менее насыщенным. Цветовая насыщенность точки равной энергии равна нулю.

Диаграмма цветности полезна при рассмотрении процедуры смешения цветов, поскольку отрезок, соединяющий любые две точки диаграммы, определяет всевозможные различные цвета, которые могут быть получены при смешении двух данных цветов. Аналогично, отрезок, проведённый от точки равной энергии к любой точке границы диаграммы, определяет все оттенки выбранного цвета.

3.7 Цветовой охват

Такая процедура обобщается и на случай смешения трёх цветов. Для того чтобы определить диапазон цветов, которые могут быть получены комбинацией трёх любых заданных цветов, нужно просто соединить между собой отрезками соответствующие точки на диаграмме цветности. В результате получится треугольник, и все цвета, соответствующие точкам внутри этого треугольника, могут быть получены как различные комбинации трёх первоначальных цветов.

Заметим, что никакой треугольник с вершинами в трёх точках с неизменными цветами не может включать весь диапазон цветов диаграммы цветностей. Это означает, что нельзя получить все цвета с помощью трёх фиксированных первичных основных цветов.

Треугольник, отмеченный правом рисунке, представляет типичный для RGB мониторов диапазон воспроизводимых цветов, который называют цветовым охватом. Область сложной формы внутри этого треугольника представляет типичный цветовой охват печатающих устройств. Граница области охвата для печатающих устройств имеет сложную форму, потому что в процессе цветной печати одновременно используются аддитивные и субтрактивные процедуры смешения цветов. Управлять таким процессом намного труднее, чем процессом воспроизведения цветов на экране монитора, основанном на смешении трёх хорошо контролируемых первичных основных цветов.

4 Модели цвета

Для того, чтобы сделать возможным описание цветов некоторым стандартным способом, введём понятие цветового пространства. Цветовое пространство также иногда называют цветовой моделью или системой цветов. По существу, цветовое пространство определяет некоторую систему координат и подпространство внутри этой системы, в котором каждый цвет представляется единственной точкой.

Большинство современных цветовых пространств ориентированы либо на устройства цветовоспроизведения (например, цветные мониторы или принтеры), либо на определённые прикладные задачи обработки изображений. Аппаратно-ориентированными цветовыми моделями, наиболее часто используемыми на практике, являются модель RGB для цветных мониторов и широкого класса цветных видеокамер, модели CMY и CMYK для цветных принтеров, и модели, разделяющие цветовую и яркостную информацию на изображении, такие как Hue-Saturation-Intensity (HSI), Hue-Saturation-Value (HSV), Hue-Saturation-Lightness (HSL), Hue-Saturation-Brightness (HSB). Такие модели лучше соответствуют цветовосприятию человека и дают возможность применять многие из полутоновых методов обработки изображений и для цветных изображений.

Ещё одно популярное цветовое пространство, используемое в задачах обработки изображений – CIE LAB, в котором изменение цвета более линейно с точки зрения человеческого восприятия.

Далее рассмотрим более подробно некоторые из этих пространств.

4.1 RGB

Наверное, самым распространенным цветовым пространством является пространство RGB. В данной модели каждый цвет представляется красным, зеленым и синим первичными основными цветами. В основе модели лежит декартова система координат. Цветовое пространство представляет собой куб.

Точки, отвечающие красному, зелёному и синему цветам, расположены в трех вершинах куба, лежащих на координатных осях. Голубой, пурпурный и желтый цвета расположены в трёх других вершинах куба. Чёрный цвет находится в начале координат, а белый — в наиболее удалённой от начала координат вершине. В рассматриваемой модели оттенки серого цвета (точки с равными RGB значениями) лежат на диагонали, соединяющей чёрную и белую вершины. Различные цвета в этой модели представляют собой точки на поверхности или внутри куба и определяются вектором, проведённым в данную точку из начала координат. Для удобства предполагается, что все значения цвета нормированы таким образом, чтобы куб был единичным кубом, т.е. все значения R, G и B лежат в диапазоне $[0,1]$.

Представляемые в цветовой модели RGB изображения состоят из трёх отдельных изображений-компонент, по одному для каждого первичного основного цвета. При воспроизведении RGB монитором эти три изображения смешиваются на люминесцирующем экране и образуют составное цветное изображение. Число битов, используемых для представления каждого пикселя в RGB пространстве, называется глубиной цвета. Рассмотрим RGB изображение, в котором каждая из компонент — красная, зеленая и синяя — является 8-битовой. В таком случае говорят, что каждый цветной RGB пиксель (т.е. триплет значений (R, G, B)) имеет глубину 24 бита (три цветовые плоскости умножить на число битов на каждую плоскость); для такого изображения часто используется термин полноцветное изображение. Суммарное число всевозможных цветов в 24-битовом RGB изображении составляет $(2^8)^3 = 16777216$.

4.2 Цветовая система Манселла

Цветовая (или колориметрическая) система Манселла — цветовое пространство, разработанное профессором Альбертом Манселлом в начале XX века. Цвет в нем описывается с помощью трёх чисел — цветового тона, значения (светлоты) и хромы (насыщенности). Попытки создать цветовое пространство, цвет в котором описывался бы тремя координатами, были и до Манселла, но он первым решил разделить цвет на независимые значения тона, светлоты и насыщенности. Его система, особенно её поздние редакции, основывалась на тщательных экспериментах по изучению цветового восприятия человека, то есть под неё была подведена научная основа. Благодаря этому, цветовая система Манселла пережила многие системы того времени, и, хотя в большинстве приложений её заменили более современные системы, такие как $(CIE L^*a^*b)$, она все ещё применяется в некоторых областях. Например, в стандартах ANSI для определения цвета кожи и волос человека, в судебной медицине, в геологии для сравнения цвета почвы и в пивоварении для определения цвета пива.

Цветовая система Манселла включает три координаты. Цветовое тело можно представить как цилиндр в трёхмерном пространстве. Цветовой тон измеряется в градусах по горизонтальной окружности, хрома (насыщенность) измеряется радиально от нейтральной оси цилиндра к более насыщенным краям, значение (светлота) измеряется вертикально по оси цилиндра от 0 (черный) до 10 (белый). Расположения цветов определялось экспериментально изучением цветового ощущения испытуемых. Цвета Манселл пытался расположить визуально одинаково, что привело к образованию цветового тела неправильной формы.

Каждый горизонтальный круг в системе Манселла разделен на пять основных тонов: красный (Red), желтый (Yellow), зеленый (Green), голубой (Blue) и фиолетовый (Purple). Между ними располагаются пять переходных тонов. В нижней части слайда показаны цветовые тона по Манселлу для фиксированных значений насыщенности и светлоты. Два цвета одинаковой светлоты и насыщенности на противоположных сторонах круга смешиваются в нейтральный серый того же значения.

4.3 HSI

Другими цветовыми пространствами, используемыми в обработке изображений и схожими с системой Манселла, является семейство пространств HSI/HSL/HSV/HSB. Цветовое пространство RGB идеально приспособлено для аппаратной реализации и удачно согласовано со зрительной системой человека в том смысле, что человеческий глаз восприимчив к красному, зеленому и синему — первичным основным цветам. Но пространство RGB плохо приспособлено для описания цветов так, как это свойственно человеку. Например, описывая цвет автомобиля, мы не говорим о процентном содержании в нем красного, зелёного и синего. И рассматривая цветное изображение мы не думаем о том, что оно составлено из трёх отдельных изображений — по одному для каждого первичного основного цвета. Глядя на окрашенный объект, человек описывает его с помощью цветового тона, насыщенности и светлоты.

Пространство HSI и другие схожие пространства позволяют отделить информацию о цветности (тон и насыщенность) от информации о яркости (интенсивность). Поскольку в основе модели лежит естественное и интуитивно близкое человеку описание цвета, пространство HSI часто использовалось для построения алгоритмов обработки изображений.

4.4 HSI/HSL/HSV/HSB

Все пространства этого семейства могут быть представлены, как геометрическое преобразование RGB куба. Если поставить RGB куб на угол, соответствующий черному цвету с осью-диагональю от черного к белому, то тогда насыщенность можно измерять, как расстояние от этой оси — чем дальше от

оси, тем насыщеннее цвет. А цветовой тон можно измерять как угол вокруг этой оси, начиная с угла в 0° , соответствующего красному цвету. Основное отличие всех пространств этого семейства лежит в определении яркостной составляющей. Интенсивность I в пространстве HSI определяется как среднее арифметическое R , G и B координат в исходном пространстве RGB. Светлота L (lightness) в пространстве HSL определяется, как среднее арифметическое максимума и минимума значений R , G , B . Значение V (value) определяется как максимум R , G , B .

4.5 CIE Lab

Цветовое пространство XYZ (или, что тоже самое, диаграмма цветностей МКО) вмещает в себя все воспринимаемые человеком цвета. Но данное пространство нелинейно, или, иными словами, зрительно неоднородно. Это значит, что два равноудалённых цвета от некоторой точки в данном пространстве необязательно будут восприниматься зрительно как равноудалённые от цвета, соответствующего этой некоторой точке. Было предпринято несколько попыток устранить нелинейность XYZ. В итоге в 1976 году была разработана модель CIE $L^*a^*b^*$, которая является сейчас международным стандартом.

В цветовом пространстве Lab значение светлоты отделено от значения хроматической составляющей цвета (тон, насыщенность). Светлота задана координатой L (изменяется от 0 до 100, то есть от самого тёмного до самого светлого), хроматическая составляющая — двумя декартовыми координатами a и b . Первая обозначает положение цвета в диапазоне от зелёного до красного, вторая — от синего до жёлтого.

В отличие от цветовых пространств RGB или CMYK, которые являются, по сути, набором аппаратных данных для воспроизведения цвета на бумаге или на экране монитора, и в которых цвет может зависеть от типа печатной машины или марки красок, или производителя монитора и его настроек, CIE Lab однозначно определяет цвет. Поэтому данное пространство нашло широкое применение в программном обеспечении для обработки изображений в качестве промежуточного цветового пространства, через которое происходит конвертирование данных между другими цветовыми пространствами. Помимо этого, особые свойства Lab сделали редактирование в этом пространстве мощным инструментом цветокоррекции. Благодаря характеру определения цвета в Lab появляется возможность отдельно воздействовать на яркость, контраст изображения и на его цвет. Во многих случаях это позволяет ускорить обработку изображений. Lab предоставляет возможность избирательного воздействия на отдельные цвета в изображении, усиления цветового контраста.

4.6 HCL

И ещё одним цветовым пространством, которое мы кратко упомянем, является пространство HCL. Это пространство было создано, чтобы совместить в себе свойства пространств, полученных при помощи цилиндрических преобразований RGB (пространств семейства HSI) и свойства линейности цвета пространства CIE Lab.

4.7 Представление цифровых изображений

Как же компьютер представляет и хранит цветное изображение? Ранее мы говорили, что монохромное черно-белое растровое изображение представляет собой матрицу, в которой значение каждого элемента соответствует уровню яркости, или интенсивности, соответствующего пикселя.

4.8 Представление цветного изображения

Для хранения информации о цвете изображения нам необходимо хранить информацию о цвете каждого пикселя. Поскольку большинство цветовых пространств позволяет задать цвет при помощи трёх координат, цветное растровое изображение будет хранить значения трёх цветовых координат для каждого пикселя. Так, при представлении изображения в пространстве RGB, для каждого пикселя будут храниться значения красной, зелёной и синей составляющих данного цвета. Т.е. цветное изображение, в отличие от монохромного, может быть представлено трехмерным тензором, в котором одна из размерностей соответствует координатам цвета (или цветовым каналам).