

РЕФЕРАТ

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 Анализ предметной области	7
1.1 Предметная область	7
1.2 Актуальность задачи	7
1.3 Основные определения	8
1.3.1 Дополненная реальность и компьютерное зрение	8
1.3.2 Данные об окружении	9
1.3.3 Модели освещения	11
1.3.4 Наложение теней	12
1.4 Сложность наложения теней в ДР	14
2 Классификация существующих методов	16
2.1 Обзор существующих методов наложения теней в ДР	16
2.1.1 Метод на основе анализа гистограммы изображения окру- жения	16
2.1.2 Метод на основе анализа контура теней ИС	19
2.1.3 Метод на основе построения теневых объемов	21
2.1.4 Метод с использованием сверточных нейронных сетей и трассировки теневых лучей	26
2.2 Критерии сравнения	30
2.3 Классификация методов	30
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	31
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	34
ПРИЛОЖЕНИЕ А	35

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

1. ДР – Дополненная реальность.
2. ИС – источник света.

ВВЕДЕНИЕ

ДР является средством воздействия информационных технологий на окружающую среду. Они позволяют создать в реальности дополнительные цифровые элементы или видоизменить органы чувств пользователя с помощью специального устройства. Интерактивная технология предоставляет возможность накладывать элементы виртуальной информации поверх объектов физического мира в реальном времени. Часть виртуальной информации можно представить в виде текстовой информации, графики, звуков, реакции на прикосновения и т.д. Также ДР способна внедрять виртуальные объекты в среду реального мира. Она используется во множестве сфер деятельности человека: медицина, построение анатомических моделей, образование, туризм и т. д. [1].

Важными условиями реалистичного восприятия виртуальных объектов является наличие соответствующих текстур и оптических свойств поверхности (отражение, пропускание, преломление) и их способность отбрасывать тени в соответствии с условиями освещения. Виртуальные объекты должны визуализироваться таким образом, чтобы их виртуальные тени коррелировали с тенями от реальных объектов и не вызывали чувства дискомфорта при наблюдении смешанного изображения [2].

Цель работы – провести анализ предметной области и классифицировать методы наложения теней в ДР.

Для достижения поставленной цели нужно решить следующие **задачи**:

- провести обзор существующих методов наложения теней в ДР;
- провести анализ предметной области наложения теней;
- сформулировать критерии сравнения методов;
- классифицировать существующие методы.

1 Анализ предметной области

В данном разделе определяется предметная область, обосновывается актуальность задачи, вводятся основные определения ДР, компьютерного зрения, моделей освещения и наложения теней, а также определяются сложности решения задачи наложения теней в ДР.

1.1 Предметная область

Предметная область – наложение теней на виртуальные объекты в ДР на основе информации о реальном окружении.

Объект исследования – методы наложения теней на виртуальные объекты в ДР.

Предмет исследования – способы восстановления модели освещения окружения.

1.2 Актуальность задачи

Рендеринг синтетических объектов в реальных сценах является важным применением компьютерной графики, особенно в области архитектуры и визуальных эффектов. Часто предмет обстановки, реквизит, цифровое существо или актер должны быть плавно перенесены в реальную сцену. Эта сложная задача требует, чтобы объекты освещались последовательно с поверхностями, находящимися поблизости от них, и чтобы взаимодействие света между объектами и их окружением было должным образом смоделировано. В частности, объекты должны отбрасывать тени, появляться в отражениях и преломлять, фокусировать и излучать свет точно так же, как это делали бы реальные объекты [3].

Проблема визуализации виртуальных объектов в реальном мире – низкое качество конечного изображения, из-за чего у пользователя не создается ощущение погружения в происходящее. Проблему низкого качества изображения можно разделить на две части: проблема материала и проблема освещения. Однако даже с использованием ультрареалистичных материалов для виртуальных объектов наблюдение за ними без использования системы освещения и отбрасывания теней не способствует реалистичности сцены [4].

Таким образом, использование системы освещения, в частности, наложе-

ние теней на виртуальные объекты в ДР имеет важное значение для высокого качества конечного изображения, поскольку это уменьшает дискомфорт от восприятия виртуальных объектов в реальном окружении и увеличивает уровень ощущения погружения в происходящее.

1.3 Основные определения

1.3.1 Дополненная реальность и компьютерное зрение

ДР – технология интеграции цифровой информации в виде изображений, компьютерной графики, текста, видео, аудио и т.д. и объектов действительного (физического) мира в режиме реального времени [1].

Компьютерное зрение – теория и технология создания машин, которые могут производить обнаружение, слежение и классификацию объектов [5].

Компьютерное зрение визуализирует трехмерные виртуальные объекты с той же точки зрения, с которой изображения реальной сцены снимаются камерами слежения. Регистрация изображений в дополненной реальности использует другой метод компьютерного зрения, в основном связанный с отслеживанием видео. Эти методы обычно состоят из двух этапов: отслеживания и реконструкции/распознавания. Во-первых, на изображениях камеры обнаруживаются опорные маркеры, оптические изображения или точки интереса. Отслеживание может использовать обнаружение объектов, обнаружение краев или другие методы обработки изображений для интерпретации изображений с камеры. В компьютерном зрении большинство доступных методов отслеживания можно разделить на два класса: основанные на объектах и основанные на моделях. Методы, основанные на объектах, состоят в обнаружении связи между элементами двухмерного изображения и их координатами трехмерной сцены. Методы, основанные на моделях, используют модели характеристик отслеживаемых объектов, такие как модели САПР [6] или двухмерные шаблоны элемента, основанные на различных признаках. Как только установлено соединение между двухмерным изображением и трехмерной сценой, можно определить положение камеры, проецируя трехмерные координаты объекта в наблюдаемые двухмерные координаты изображения и минимизируя расстояние до соответствующих двухмерных объектов. Ограничения для оценки

положения камеры чаще всего определяются с использованием точечных объектов. Этап восстановления/распознавания использует данные, полученные на первом этапе, для восстановления системы координат реального мира [7].

1.3.2 Данные об окружении

При решении данной задачи в качестве исходных данных используются HRD-изображения или RGBD-изображения.

HDR – общее название технологий работы с изображениями, диапазон яркости которых превышает возможности стандартных технологий. *Динамический диапазон* – отношение между максимальным и минимальным значением физической величины: для фотографии это отношение между самой яркой и самой темной частями изображения. Фотографической широты современных камер и пленок недостаточно для того, чтобы передать любой сюжет окружающего мира. Эта проблема решается путем увеличения динамического диапазона самих камер или комбинирования изображений, снятых с разной экспозицией, в результате которого возникает единое изображение, содержащее все детали из всех исходных изображений, как в крайних тенях, так и в максимальных светах. *HDR-изображение* – изображение с расширенным динамическим диапазоном. Информация о цвете каждого пикселя HDR-изображения хранится в виде числа с плавающей точкой, в отличие от цветовой модели RGB, где используется 3 байта для трех основных цветов: красный, зеленый, синий [8].

RGBD-изображение – изображение, в котором каждый его пиксель помимо информации о цвете хранит информацию и о глубине [9]. Существует несколько способов получения информации о глубине точек кадра:

- структурированный свет;
- Time-of-Flight;
- лидар (также LIDAR или LiDAR);

Структурированный свет

Данный способ полагается на проектор света, захваченный камерой. Самый простой способ достичь такой цели – спроецировать точку с помощью

устройства и запечатлеть эту точку в сцене с помощью камеры. Глубина этой точки может быть измерена с помощью триангуляции. Для оценки глубины необходимо найти положение проецируемой точки в плоскости изображения, иметь расстояние между камерой и световым проектором, внутренние параметры камеры и положение проектора в пространстве. Используя эту информацию, можно создать треугольник и рассчитать высоту треугольника, образованного камерой, проектором и освещенной точкой сцены, чтобы определить расстояние. Большинство датчиков структурированного света не работают под прямыми лучами солнца, поскольку они полагаются на проекцию света в сцене. Поэтому они обычно подходят для использования в помещениях [9].

Time-of-Flight

Данный способ основан на оценке расстояния объекта в сцене до датчика путем измерения времени, необходимого для приема датчиком излучаемого света. Поэтому датчики полагаются на время, которое требуется световой волне, чтобы дойти до точки сцены и отразиться от датчика. Концепция практически не отличается от ультразвуковых и радарных датчиков, но здесь в качестве излучаемого сигнала используется свет. При сильном солнечном свете датчик может давать сбои, поэтому данный способ также чаще всего используют в помещениях [9].

Лидар

Данный способ использует ту же идею измерения времени, в течение которого излучаемый свет принимается датчиком, но они полагаются на один или несколько лазерных лучей (концентрированный свет) для измерения глубины точек в сцене. Лидарный датчик полагается на сфокусированные лазерные лучи, которые позволяют проводить измерения расстояния до нескольких километров. Точность измерений обычно не зависит от расстояния, хотя может зависеть от погодных условий: при неблагоприятных условиях, например, густой туман и бурный снегопад, она может падать. Лидарные датчики излучают свет, поэтому они работают в сложных условиях освещения, таких как темная среда. Они подходят для использования в помещениях и на открытом воздухе [9].

1.3.3 Модели освещения

Свет – электромагнитная энергия, воспринимаемая человеческим глазом [10].

Интенсивность света рассчитывается по Закону Ламберта:

$$I = I_l k_d \cos \theta, \quad (1.1)$$

где I – интенсивность отраженного света, I_l – интенсивность ИС, k_d – коэффициент диффузного отражения ($0 \leq k_d \leq 1$), θ – угол между направлением света и нормалью к поверхности ($0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$). Если $\theta > \frac{\pi}{2}$, то источник света расположен за объектом. Коэффициент диффузного отражения k_d зависит от материала и длины волны света, но обычно считается постоянным [11].

ИС бывают:

- направленными – предполагается, что ИС находится бесконечно далеко, так что все направления световых лучей параллельны;
- точечными – ИС расположен в пространстве и излучает свет во всех направлениях;
- прожекторными – ИС имеет местоположение в пространстве, но излучает свет только внутри конуса;
- рассеянными – является источником общего освещения, благодаря которому вся сцена обладает одинаковой интенсивностью света.

Модель освещения – алгоритм расчета освещения сцены [12].

Модели освещения бывают простыми и полными. Простые модели освещения основаны на эстетической и экспериментальной аппроксимациях, в особенности зеркальная компонента отражения. Полные же удаляет внимание распределению энергии падающего света, т. е. вводят зависимость компонентов модели от физических параметров: длина волны света, свойств вещества, шероховатости поверхности, геометрии отражения и т. д. [11].

Среди простых моделей освещения выделяют:

- плоская модель освещения – интенсивность света вычисляется для каждой вершины грани трехмерного объекта, а затем усредняется и присваивается всей грани;
- модель освещения Гуро – происходит интерполяция интенсивности света между вершинами грани;
- модель освещения Фонга – происходит интерполяция нормали к поверхности между вершинами грани;
- модель освещения Блина-Фонга – улучшение модели Фонга, в котором бликовая составляющая света вычисляется отдельно с помощью медианного вектора, который расположен между вектором взгляда и вектором освещенности.

Среди полных моделей освещения выделяют модель освещения Кука-Торренса. В ней интенсивность света в заданной точке зависит от следующих факторов:

- шероховатость поверхности;
- загораживание и затенение;
- коэффициент Френеля.

Также модели освещения м. б. локальными, т. е. интенсивность света в заданной точке зависит только от параметров ИС и материала поверхности, и глобальными, т. е. интенсивность света в заданной точке зависит и от освещенности соседних объектов [11].

1.3.4 Наложение теней

Тень состоит из двух частей: полутени и полной тени. Полная тень – центральная, темная, резко отчерченная часть, а полутень (или мягкая тень) – окружающая ее более светлая часть [11].

Существует несколько методов построения теней:

- использование теневой карты;
- построение теневого объема;
- трассировка лучей.

Теневая карта

Теневая карта – объект, хранящий информацию о затененных пикселях буфера кадра. Основная идея использования теневой карты – построение карты глубины с т. з. ИС и сравнение с картой глубины виртуальной камеры: те пиксели, которые видны с т. з. камеры, но не видны в т. з. ИС, являются затененными. Этот процесс называется *теневым тестом*. Такой подход не требователен к вычислительным ресурсам, но требователен к памяти, поскольку теневая карта обладает тем же разрешением, что и конечное изображение, и таких карт м. б. несколько в зависимости от количества ИС [13].

Теневой объем

Теневой объем – это область пространства, доступ света в которую закрывает объект. Боковые границы теневого объема образуются четырехугольниками, простирающимися от границ объекта, в направлении от источника света, до некоторой пересекающейся с ним плоскостью. Границы ближнего основания образуются т. н. границами силуэта. Эти границы образуются сторонами треугольников, находящимися на границе затененной и освещенной областей объекта или рядом с ней. В общем случае граница силуэта пролегает по границе между треугольниками, один из которых обращен к источнику света, а другой – в обратную сторону. Чтобы получить теневой объем, нужно найти все границы силуэта и нарисовать четырехугольники для каждой из них. Границы же дальнего основания образуются границами пересечения теневого объема с ближайшей плоскостью [14].

Освещенность точки определяется следующим образом: от точки местоположения камеры до нее бросается луч, который обладает счетчиком прохождения граней теневого объема. При входе в грань теневого объема счетчик увеличивается, при выходе – уменьшается. В итоге, если счетчик больше нуля, то точка считается затененной, иначе – она освещена.

Такой подход может давать ложные результаты, если камера находится внутри теневого объема. Эта проблема устраняется решением обратной задачи – трассировкой лучей из бесконечности к точке местоположения камеры [14].

Трассировка лучей

Трассировка лучей – это метод оценки освещенности, при котором для каждого пикселя в буфере кадра луч сталкивается с объектами сцены, чтобы определить отраженный цвет объекта. Луч может быть прослежен дальше, после первого столкновения с некоторым объектом, для создания эффектов, подобных зеркалу или стеклу. Тени с трассировкой лучей оцениваются аналогичным образом, но вместо оценки столкновения лучей из буфера кадра со сценой проверка столкновения выполняется для лучей от сцены к источнику света. Если луч от текущего пикселя столкнется с каким-либо объектом до того, как достигнет источника света, текущий пиксель окажется в тени, и, таким образом, его цвет будет темнее по сравнению с его основным цветом материала [13].

1.4 Сложность наложения теней в ДР

Основные проблемы данной задачи – обеспечение геометрического и светового взаимодействия виртуального и реального миров [15].

Геометрическое взаимодействие подразумевает то, что объекты виртуального мира, находящиеся за объектами реального мира, не должны быть видны [15].

Световое взаимодействие подразумевает обеспечение корректного освещения виртуальных объектов ИС реального мира (включая правильное формирование теней от виртуальных объектов на реально существующие предметы) и корректное освещение предметов реального мира виртуальными ИС (включая вторичное освещение, возникающее при переотражении света между объектами реального и виртуального миров). Появление некорректностей в модели освещения виртуальных объектов вызывает дискомфорт восприятия реальности, в которой смешаны объекты реального и виртуального миров, что ограничивает время возможного пребывания человека в среде ДР [15].

Вывод

В данном разделе была определена предметная область, обоснована актуальность задачи, введены основные определения ДР, компьютерного зрения, моделей освещения и наложения теней, а также определены сложности

решения задачи наложения теней в ДР.

2 Классификация существующих методов

В данном разделе проводится обзор существующих методов наложения теней в ДР, вводятся критерии сравнения и проводится классификация этих методов.

2.1 Обзор существующих методов наложения теней в ДР

2.1.1 Метод на основе анализа гистограммы изображения окружения

В этом методе в качестве исходных данных используется информация о глобальном освещении окружающей среды и любых источниках света, присутствующих вокруг пользователя, из HDR-изображений [4]. Исходные изображения должны обладать следующими свойствами:

- они должны быть всенаправленными, т.е. для каждого направления пространства имеется пиксель, представляющий это направление;
- значения пикселей соответствуют количеству света, поступающего с этого направления.

Метод состоит из 4 основных этапов:

1. захват изображения;
2. обработка изображения;
3. поиск положения источников света;
4. отрисовка теней.

Захват изображения

На основе исходных снимков создается т. н. карта сферы, которая представляет собой сферическое изображение на 360 градусов окружения, где будут размещены синтетические объекты. Чтобы удовлетворить свойство

всенаправленности, наиболее часто используемым методом является фотографирование зеркальной сферы: этот метод позволяет получать свет, исходящий из-за сферы, поскольку лучи за сферой отклоняются и захватываются камерой спереди. Более простой метод состоит в том, чтобы сделать несколько фотографий всего окружения и скомпоновать их вместе, накладывая друг на друга, чтобы сформировать карту сферы [4].

Обработка изображения

Полученную карту сферы конвертируют из RGB-изображения в черно-белое для более простого применения порогового значения к значениям цвета пикселей, поскольку они варьируются только от 0 до 255. Стоит отметить, что не все RGB-изображения после конвертирования в черно-белый формат имеют пиксели, которые варьируются от 0 до 255, например, слишком яркие или слишком темные.

После преобразования изображения можно применить для него пороговое значение, чтобы удалить все пиксели со значением цвета ниже заданного порога. Этот порог выбирается путем анализа гистограммы изображения [16].

Далее проверяется следующее условие:

$$\frac{Max(PixelValue)}{Average(PixelValue)} \geq 1.5 \quad (2.1)$$

Если это условие верно, то это означает, что разница между максимальным значением и средним значением пикселей достаточно, чтобы утверждать, что существует видимая разница между окружающим светом и возможным точечным светом. В ином случае возможно ошибочное отождествление окружающего света с точечным светом, что приводит, во-первых, к слишком высокой плотности белых пикселей и, во-вторых, к неточному расположению света на этапе поиска положения источников света [4].

Далее происходит оценка порогового значения. Если 93% спектра (начиная с 0) покрывают не менее 98% пикселей, то можно пороговать оставшиеся 7%. Этот шаг позволяет обрезать изображение и рассматривать только те области изображения, которые соответствуют реальным источникам света. Полученный результат обрабатывается медианным фильтром размытия в качестве метода шумоподавления, поскольку возможно наличие некоторых областей со значением пикселей выше порогового значения из-за отражений

объектов в окружающей среде [4].

Поиск положения источников света

У полученного изображения вычисляются контуры источников света. Из полученных контуров определяются его моменты, из которых можно получить центроиды каждого источника света.

Из координат центроида (x, y) можно получить координату z следующим образом. Координата x пропорциональна повороту вокруг оси Y , а координата y пропорциональна повороту вокруг оси X , из чего следуют соотношения [4]:

$$\begin{aligned}\frac{x}{\theta} &= \frac{width}{2\pi} \\ \frac{y}{\phi} &= \frac{height}{\pi},\end{aligned}\tag{2.2}$$

где θ, ϕ – углы поворота вокруг осей Y и X соответственно, $width, height$ – ширина и высота исходного изображения окружения. Зная углы поворота вокруг осей, можно вычислить модуль координаты z следующим образом:

$$\begin{aligned}z_{xz} &= x \cos(\theta) \\ z_{yz} &= y \cos(\phi), \\ |z| &= \sqrt{z_{xz}^2 + z_{yz}^2}\end{aligned}\tag{2.3}$$

где z_{xz} – координата z проекции точки положения виртуального ИС на плоскость XZ , z_{yz} – координата z проекции точки положения виртуального ИС на плоскость YZ . Знак координаты z можно восстановить следующим образом:

$$z = |z| \cdot \text{sign}(z_{xz} \cdot z_{yz})\tag{2.4}$$

Таким образом, становится известно положение ИС в трехмерном пространстве.

Отрисовка теней

Этот этап ничем особым не отличается по сравнению с остальными: отрисовка теней происходит по тем же алгоритмам, что и в машинной графике. Зная местоположение каждого ИС, расставляются их виртуальные аналоги. В итоге происходит синтез и отображение виртуальной сцены с виртуальным объектом, отбрасывающий тень от «реальных» ИС.

Преимущества и недостатки

Преимуществами данного метода являются:

- для наложения тени на виртуальный объект требуется только вычислить тень, падающую от него, т. к. все шаги с расчетом положения ИС уже были проделаны;
- возможность распознавания нескольких ИС.

Недостатками данного метода являются:

- требуется предварительная подготовка информация об окружении, т. е. динамическая смена окружения не предусмотрена;
- корректная отрисовка теней происходит только на плоской поверхности, т. е. нельзя воспроизвести её искажение, т. к. нет информации о поверхности проецирования.

2.1.2 Метод на основе анализа контура теней ИС

В качестве исходных данных используются RGBD-изображения.

Из исходных данных вычисляется следующий набор данных: точки, соответствующие границам объектов, и точки, соответствующие границам теней от объектов. Предполагается, что имеется прямое соответствие между объектами и их тенями на RGBD-изображении. Количество найденных точек практически не сказывается на точности, но они должны быть расположены равномерно по контуру изображения объекта и отклонение точек от границы контура не должно быть значительным. Количество точек на контурах объектов и их теней не должно быть меньше 3 [17].

Полученные наборы точек используются для нахождения положений ИС следующим образом.

1. Строится набор плоскостей параллельно поверхности земли.
2. Из сопряженных точек, находящимися на границах тени и объекта, пускают лучи, которые пересекают ранее построенные плоскости, тем самым итеративно получают точки пересечения лучей с плоскостями.
3. Проверяется характер распределения скоплений этих точек на каждой плоскости. Скопление точек, полученное данным методом, уплотняется при приближении к виртуальной плоскости к источнику света. На определенном шаге итераций скопление точек перестанет уплотняться и в дальнейшем будет расширяться. Максимальная плотность скопления свидетельствует о том, что ИС находится на высоте этой виртуальной плоскости.
4. После этого определяется центры скоплений этих точек. Зная высоту найденной виртуальной плоскости и центры скоплений, можно восстановить положения ИС. При этом абсолютная ошибка определения координаты ИС по высоте не превышает половины шага, с которым чередуются виртуальные плоскости [17].
5. Далее уточняются координаты ИС с помощью билинейной интерполяции между двумя виртуальными плоскостями с максимальной плотностью точек.

Также стоит упомянуть случай, когда не был найден ни один ИС. Это может происходить, например, если объекты и их тени были некорректно согласованы или видимый край объекта не является краем, создающим тень [17].

Т. к. ограничение данного метода является невозможность восстановить интенсивность и диаграмму излучения ИС, то тип найденного ИС устанавливается точечным, а диаграмма излучения – Ламбертовой [17].

Преимущества и недостатки

Преимущества данного метода являются:

- работа в помещении;

- возможность распознать несколько ИС.

Недостатками данного метода являются:

- зависимость качества его работы от результатов распознавания контуров объектов и теней. Устройство распознавания может распознать только часть контуров, например, распознанная часть тени может не соответствовать обнаруженному контуру объекта.

2.1.3 Метод на основе построения теневых объемов

Данный метод состоит из трех этапов.

1. Обнаружение теней из видео в реальном времени.
2. Построение теневого объема.
3. Отрисовка виртуального объекта и синтез изображения.

В методе текущий кадр, т. е. k -й кадр, разделяется на две области: область проекции и новую область.

Предыдущий кадр, т. е. $k - 1$ -й кадр, проецируется на k -й кадр с оцененной позицией камеры и информацией о глубине точек кадра. Область, которая является результатом пересечения двух кадров, называется областью проекции. Новая область – область k -го кадра, не попавшая в область проекции, т. е. разность между областью проекции и k -м кадром. Далее фильтруются данные глубины кадра от шумов и оценивается положение камеры. Затем происходит обнаружение граней новых теней в новой области и добавляются к старым.

На основе обнаруженных граней теней строится теновой объем и уточняется с помощью адаптивной стратегии выборки [18] для достижения плавных эффектов отбрасывания теней.

В итоге происходит синтез и отображение конечного изображения с виртуальным объектом.

Обнаружение теней из видео в реальном времени

Поиск теней происходит в пространстве изображения.

Большая часть теней распределена по всей области проекции. В этой области грани тени кадра k могут быть непосредственно спроецированы из кадра $k - 1$. Чтобы устранить ошибки проецирования, вызванные зашумленными параметрами камеры и данными о глубине, происходит оптимизация первоначально спроецированных граней тени в области проецирования. Грани тени в новой области обнаруживаются и объединяются с гранями теней из области проекции путем обеспечения согласованности направления градиента края [19].

Область проекции

Для оптимизации контуров теней используется алгоритм Кэнни. К полученным результатам применяют фильтрацию среднего сдвига чтобы сгладить контуры теней и избежать влияния мягких теней и шума изображения. Затем пиксель на грани тени, для которого отношение интенсивности двух сторон его направления градиента превышает заданный порог (0.65 от темной стороны к светлой стороне), идентифицируется как находящийся на краю тени. Далее происходит объединение пикселей изначального контура теней с пикселями контуров теней, полученные после оптимизации, путем поиска пикселей граней теней в небольшой окрестности (3 на 3 пикселя) каждого пикселя изначального контура теней. Если в окрестности появляется пиксель контура тени после оптимизации, то он заменяет пиксель изначального контура тени [19].

Новая область

Изображение представляет собой попиксельное произведение освещенности и коэффициента отражения:

$$I(x) = R(x)L(x), \quad (2.5)$$

где $I(x)$ – наблюдаемый цвет RGB в пикселе x , а $L(x)$ и $R(x)$ – освещенность и коэффициент отражения (альбедо). Для пикселей p и q , которые находятся в теневой и не теневой областях, соответственно, и на неболь-

шом расстоянии от пикселя x (3 на 3 пикселя) интенсивности изображения следующие:

$$\begin{aligned} I(p) &= R(p)(L_{sun} \cos(\theta) + L_{sky}) \\ I(q) &= R(q)L_{sky} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Т. к. пиксели p и q примыкают к границе тени, то предполагается, что они имеют одинаковую отражательную способность, т. е. $R(p) \approx R(q)$, из чего следует, что:

$$\frac{I(p)}{I(q)} \approx \frac{L_{sun} \cos(\theta) + L_{sky}}{L_{sky}} = 1 + \cos(\theta) \frac{L_{sun}}{L_{sky}}, \quad (2.7)$$

где θ – угол падения между направлением солнечного света и нормалью к поверхности в пикселе p .

Для пикселей с известными нормальными направлениями или плоских пикселей вычисляется отношение $r = \frac{L_{sun}}{L_{sky}}$. Для каждого пикселя x на гранях тени в области проекции вычисляется $r(x)$. Затем вычисляется усредненное соотношение по всем пикселям на гранях тени в области проекции и обозначается как r_s .

В новой области грани тени вычисляются теми же методами, что и в области проекции, но каждая точка грани подвергается анализу: используется пространственное расстояние между пикселем y и краем тени из области проекции в качестве веса $w(y)$, который управляет балансом двух объектов, который определяется как нормализованное среднее расстояние между y и t ближайшими пикселями на гранях тени из области проекции. На основе чего вычисляется вероятность пребывания точки y в тени [19]:

$$\begin{aligned} p(y) &= (1 - w(y)(1 - S(y)) + w(y)M(y) \\ S(y) &= \frac{r(y)}{(r_s + r(y))} \\ M(y) &= \frac{|T(p) - T(q)|}{\max(T(p), T(q))} \\ T(y) &= \frac{H(y)}{V(y) + 0.01} \end{aligned} \quad (2.8)$$

, где $p(y)$ – вероятность пребывания точки y в тени, $S(y)$ – отношение сходства $r(y)$ и r_s , $T(y)$ – отношение оттенка $H(y)$ и значения $V(y)$ точки y в

пространстве HSV [20], $M(y)$ – разница соотношений $T(p)$ и $T(q)$.

Объединение граней тени

Перед объединением граней точки излома из граней из области проекции сортируются с помощью поиска в глубину. Затем порядок граничных пикселей используется для соединения точек излома. Чтобы избежать чрезмерных соединений используется согласованность в градиентных ориентациях для уточнения связанных ребер [19].

Далее выбираются множества соседних точек излома $N_j(x)$, где j – порядок соответствующих точек излома. Далее выбирается набор кандидатов $C_j(x)$, где $C_j(x_i)$ – набор пикселей граней тени в новой области в окрестности $N_j(x)$. Для каждого пикселя x в окрестности $N_j(x)$ вычисляется среднее направление градиента g_x по $N_j(x)$. Затем для каждого пикселя x_i в $C_j(x_i)$ вычисляется направление градиента g_{x_i} . Угловая разница выражается так:

$$d(x_i) = \frac{(g_x - g_{x_i})^2}{g_{x_i}^2} \quad (2.9)$$

Если $d(x_i) < \alpha$ (α – некоторое пороговое значение), x_i идентифицируется как край тени.

Построение теневого объема

Приближенное построение

Для построения приближенного теневого объема помимо градей тени используется также информация о направлении падения солнечного света, полученное на основе местоположения пользователя и времени суток при съемке. Для каждого пикселя на краю тени испускается луч вдоль направления солнечного света, длина которого на практике равна максимально возможной величине. Если закрывающий объект виден не полностью, отбрасываемая тень обычно обрезается по крайней мере на одну границу изображения. Соответственно, его теневой объем будет естественным образом усечен трехмерными плоскими поверхностями границ изображения. Для полностью видимого объекта, отбрасывающего тень, используется информация о его геометрии для усечения объема тени. Благодаря такому подходу поверхность теневого объема

грубо аппроксимируется серией параллелограммов [19].

Уточненное построение

Для более гладкого затенения трехмерных объектов, точки тени заменяются на непрерывные кривые. Делается это с помощью кривых Безье. Из-за сложной конфигурации наружных теней прямая подгонка Безье приводит к большим ошибкам. Вместо этого края тени разделяются на кусочно-гладкие сегменты, используя дискретную кривизну. Затем точки тени делятся на сегменты. Для каждого сегмента первая точка, а именно P_0 , и последняя точка, а именно P_2 , устанавливаются в качестве контрольных точек. Затем, используя координаты других точек на отрезке, оптимальная точка, а именно P_1 , получается с помощью подгонки кривой Безье методом наименьших квадратов [19]:

$$B(t) = \sum_{k=0}^2 p_k B_{k,1}(t) = (1-t)^2 P_0 + 2t(1-t)P_1 + t^2 P_2 \quad (2.10)$$

При повторной выборке подогнанных кривых количество выбранных точек должно быть достаточным для создания плавных краев тени и как можно меньшим для поддержания эффективности. Для достижения этой цели используется адаптивная стратегия выборки. Для каждого двухмерного сегмента l , обладающий n пикселями, обозначается расстояние между первой и последней точкой сегмента P_{2D}^1 и P_{2D}^n соответственно в виде $d(P_{2D}^1, P_{2D}^n)$, и их трехмерное расстояние $d(P_{3D}^1, P_{3D}^n)$. Их соотношение $\frac{d(P_{2D}^1, P_{2D}^n)}{d(P_{3D}^1, P_{3D}^n)}$ представляет трехмерное расстояние, соответствующее единице пикселя на изображении. Чем меньше соотношение, тем больше точек следует отобрать. Далее, когда края тени находятся далеко от камеры, количество точек выборки следует уменьшить. В противном случае следует его увеличить. Наконец, трехмерное расстояние также определяет количество точек выборки [19].

Конечное количество точек выборки, которое обозначается как m , выражается как:

$$m = \max\left(\frac{d(P_{2D}^1, P_{2D}^n)}{d(P_{3D}^1, P_{3D}^n)} \cdot \frac{d(P_{3D}^1, P_{3D}^n)}{1/n \sum_{i=1}^n d_i}, \epsilon\right), \quad (2.11)$$

где d_i - глубина i -й точки и ϵ - минимальное количество точек выборки, которое экспериментально установлено равным $2n$ [19].

Преимущества и недостатки

Преимущества:

- моделирует систему освещения во внешнем пространстве;
- моделирует взаимодействие между тенями реальных и виртуальных объектов.

Недостатки:

- не позволяет моделировать освещение в помещениях;
- работает только со статическими тенями: динамические тени не распознаются, т. к. новые грани тени добавляются к граням предыдущего кадра путем обеспечения согласованности направления градиента края;
- плохо работает с мягкими тенями.

2.1.4 Метод с использованием сверточных нейронных сетей и трассировки теневых лучей

Суть метода – определить координаты ИС по теням, отбрасываемые объектами. Он основан на предположении, что для небольших ИС тень объекта является изображением центральной проекции этого объекта на поверхность «пола». Следовательно, зная сопряженные координаты точек границ теней и координаты точек границ объектов, отбрасывающих эти тени, можно восстановить центральную проекцию и найти положение источника света [15].

Однако найти точки сопряжения – задача нетривиальная, особенно для сложных сцен, когда есть много теней от разных ИС и когда тени не проецируются на плоскую поверхность. Метод основан на формировании пучков лучей, исходящих из точек на границе тени. В этом случае предполагается, что среди пучков лучей, испускаемых из тени к объекту, будет хотя бы один, идущий в направлении источника света. Эти лучи формируются из точек, полученных после определения контуров объектов и теней. В качестве контура объекта рассматривается не только его геометрический контур, но и световой контур, т. е. граница света и тени на самом освещаемом объекте. Группа лучей, исходящих из разных точек тени на разные точки объекта,

может сформировать каустику, которая будет находиться вблизи источника света. Центр перетяжки этой каустики в пространстве сцены соответствует положению источника света. Поэтому основная задача метода – найти группу лучей, формирующих каустику [15].

В качестве исходных данных используется RGBD-изображение сцены, не требующее калибровки по реальным значениям яркости.

Данный метод состоит из двух этапов.

1. Обучение сверточной нейронной сети для определения границ объектов и теневых областей RGBD-изображений, полученных устройством ДР.
2. Использование алгоритмов машинного зрения для определения положения источников освещения в сцене.

Более подробно метод выглядит так.

1. Определяются все теневые области на изображении.
2. Идентифицируются объекты, отбрасывающие тени, и определяются границы объектов, включая световые границы в области освещаемой и теневой части объекта. Точки этих границ формируются и сохраняются.
3. Формируется облака точек вероятного пересечения лучей, исходящих из разных точек тени и объекта. Образуются пары несопряженных лучей, т. е. лучи должны исходить из разных точек через разные точки одного объекта. Поскольку фактическое пересечение таких лучей невозможно, выполняется поиск точки на отрезке с минимальным расстоянием, соединяющим две эти прямые. Точки позади объекта или за пределами области определения сцены отбрасываются.
4. Точки, полученные в результате пересечения траекторий лучей, помечаются номером объекта, через который прошел луч. Эта маркировка позволяет сортировать сформированные лучи.
5. Происходит анализ областей скоплений точек, которые принимаются за положение источников света. Для каждой области координаты ИС усредняются, и средняя точка берется за точку положения ИС.

6. Для найденных точек проверяется правильность нахождения координат ИС. Для этого от источника света на границе тени испускаются лучи и оценивается отклонение координат соответствующих точек от ближайших точек границ объекта. Если отклонение находится в пределах допуска, то найденная точка принимается за центральную точку ИС, в противном случае источник света считается ложным и отклоняется. Кроме того, близкорасположенные ИС, найденные для различных объектов, объединяются в один ИС [15].

Определение контуров теней и объектов

Изображения в оттенках серого и цветные изображения могут содержать значительный шум, заключающийся в случайных вариациях яркости или цветов точек изображения. Поэтому для определения контуров объектов и теней необходимо сперва устранить шум изображения, для чего используются различные методы фильтрации и алгоритмы компьютерного зрения. Для этого используются алгоритмы Кэнни [21] для обнаружения границ изображения, затем размытие по Гауссу [22] и операция наращивания [23] для устранения шума на границах изображения. Чтобы оставить только контуры границ, используется алгоритм скелетизации [24], который уменьшает бинарные объекты до ширины одной точки изображения.

После определения всех контуров объектов и теней на изображении необходимо найти соответствие между ними. В первую очередь строятся регионы интересов [25] области контуров, и если они соприкасаются, т. е. имеют общие границы, то с большой вероятностью контур тени соответствует контуру объекта [15].

Кроме того, используется еще один метод сопоставления контуров, заключающийся в использовании функции, вычисляющей и сравнивающей по заданным регионам интересов «моменты» контуров изображений объектов и теней сцены. Моменты изображения представляют собой средневзвешенное значение интенсивности пикселей изображения, т. е. это суммарная характеристика контура, рассчитанная интегрированием (суммированием) всех пикселей контура. Все что необходимо – это вычислить сумму интенсивностей всех пикселей и получить на выходе значение. Далее в функцию сравнения контуров подаются полученные значения и возвращается метрика, показыва-

ющая сходство. Чем ниже результат на выходе функции (чем ближе она к нулю), тем больше соответствие и тем вероятнее, что сравниваемые контуры тени и объекта имеют одно происхождение, т. е. тень была сформирована данным объектом [15].

Формирование лучей

После того, как были определены все необходимые координаты на исходном изображении контуров объектов и их теней, начинается процесс формирования лучей. Они формируются с заданным шагом по контуру, например, исходя из соображения, что на контуре изображения и тени не должно быть больше 10 или 20 точек [15]. Исходя из этого на контурах выбираются точки с соответствующим шагом, через которые затем выпускаются лучи, и вычисляются точки, находящиеся на минимальном расстоянии между этими лучами, т. е. точки перетяжки лучей. Вычисление точек перетяжки основывается на методе наименьших квадратов, что является стандартным подходом в регрессионном анализе для аппроксимации решения переопределенных систем путем минимизации суммы квадратов, полученных в результатах каждого отдельного уравнения [26].

Далее определяется максимальная плотность точек перетяжки. По найденным точкам в области наибольшей плотности вычисляются моменты и находится средняя точка.

Необходимо отметить, что если в процессе поиска координат источников света использовались два или более объектов сцены, то найденные облака точек, имеющие максимальную плотность и характеризующие источники света от разных групп объектов – теней, можно объединять в один общий источник света, имеющий конечный размер. Это объединение можно делать только в том случае, если облака точек были порождены различными объектами, поскольку один объект, формирующий разные тени, не может создать один источник [15].

Преимущества и недостатки

Преимуществами данного метода являются:

- высокая точность (почти 94 % [15]);

- возможность распознать сложные тени и несколько ИС.

Недостатками данного метода являются:

- высокие требования к производительности системы [27].

2.2 Критерии сравнения

восстановление нескольких ИС

работа метода в помещении

работа метода под открытым небом

динамическая смена окружения

работа с динамическими тенями

2.3 Классификация методов

Вывод

В данном разделе был проведен обзор существующих методов наложения теней в ДР, введены критерии сравнения и проведена классификация этих методов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Технологии дополненной реальности [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-dopolnennoy-realnosti/viewer> (дата обращения 30.09.2022).
2. Эффективный метод восстановления освещения в системах смешанной реальности с использованием HDR-изображения трехмерной сцены / Н. Богданов [и др.] // Графикон-конференции по компьютерной графике и зрению. Т. 29. — 2019. — С. 26—31.
3. *Debevec P.* Rendering synthetic objects into real scenes: Bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography // *Acm siggraph 2008 classes*. — 2008. — С. 1—10.
4. *Osti F., Santi G. M., Caligiana G.* Real time shadow mapping for augmented reality photorealistic rendering // *Applied Sciences*. — 2019. — Т. 9, № 11. — С. 2225.
5. Компьютерное зрение [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompyuternoe-zrenie> (дата обращения 20.11.2022).
6. Латышев П.Н. Каталог САПР. Программы и производители: Каталогное издание. — М.: ИД СОЛОН-ПРЕСС, 2006, 2008, 2011. — 608, 702, 736 с. — ISBN 5-98003-276-2, 978-5-91359-032-9, 978-5-91359-101-2.
7. *Furht B.* Handbook of Augmented Reality. — 2011. — ISBN 978-1-4614-0063-9. — DOI: 10.1007/978-1-4614-0064-6.
8. Использование HDR-технологии для фотографической фиксации процессуальных действий [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-hdr-tehnologii-dlya-fotograficheskoy-fiksatsii-protssessualnyh-deystviy/viewer> (дата обращения 8.11.2022).
9. *Lopes A., Souza R., Pedrini H.* A Survey on RGB-D Datasets // *arXiv preprint arXiv:2201.05761*. — 2022.
10. Большая российская энциклопедия [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://bigenc.ru/vocabulary> (дата обращения 22.11.2022).

11. *Роджерс Д.* Алгоритмические основы машинной графики. — Рипол Классик, 1989.
12. *Eberly D.* 3D game engine design: a practical approach to real-time computer graphics. — CRC Press, 2006.
13. Programming vertex, geometry, and pixel shaders / W. F. Engel [и др.]. — Cengage Delmar Learning, 2008.
14. Вольф Д. OpenGL 4. Язык шейдеров. Книга рецептов / пер. с англ. А. Н. Киселева. — М.: ДМК Пресс, 2015. — 368 с.
15. М. И. Сорокин, Д. Д. Жданов, И. В. Валиев, "Восстановление положения источников освещения сцены в системах смешанной реальности с использованием сверточных нейронных сетей и трассировки теневых лучей", Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 2021, 067, 18 с.
16. Способы обработки гистограммы телевизионного изображения [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposoby-obrabotki-gistogrammy-teplovizionnogo-izobrazheniya> (дата обращения 10.11.2022).
17. А. Ф. Лемешев, Д. Д. Жданов, Б. Х. Барладян, "Метод восстановления параметров освещения в системах смешанной реальности", Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 2021, 012, 17 с.
18. *Thomasian A.* Chapter 8 - Database parallelism, big data and analytics, deep learning // Storage Systems / под ред. А. Thomasian. — Morgan Kaufmann, 2022. — С. 385—491.
19. Simulating shadow interactions for outdoor augmented reality with RGBD data / Н. Wei [и др.] // IEEE Access. — 2019. — Т. 7. — С. 75292—75304.
20. Color image segmentation: advances and prospects / H.-D. Cheng [и др.]. — Elsevier, 2001.
21. Canny, J., A Computational Approach To Edge Detection, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986.
22. Shapiro, L. G. & Stockman, G. C. Computer Vision. Prentice Hall, 2001.
23. Image Analysis and Mathematical Morphology by Jean Serra, ISBN 0-12-637240-3 (1982).

24. Abeysinghe, Sasakthi; Baker, Matthew; Chiu, Wah; Ju, Tao (2008). Segmentation-free skeletonization of grayscale volumes for shape understanding, IEEE Int. Conf. Shape Modeling and Applications (SMI 2008).
25. Ron Brinkmann (1999). The Art and Science of Digital Compositing. Morgan Kaufmann. pp. 184. ISBN 978-0-12-133960-9.
26. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. — 2-е изд. — М., 1962. (математическая теория).
27. О некоторых методах визуализации динамических 3D моделей [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-nekotoryh-metodah-vizualizatsii-dinamicheskikh-3d-modeley> (дата обращения 24.11.2022).

ПРИЛОЖЕНИЕ А