ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 12 за 2021 г.

ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

А.Ф. Лемешев, Д.Д. Жданов,
Б.Х. Барладян

Метод восстановления параметров освещения в системах смешанной реальности

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Лемешев А.Ф., Жданов Д.Д., Барладян Б.Х. Метод восстановления параметров освещения в системах смешанной реальности // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2021. № 12. 17 с. **https://doi.org/10.20948/prepr-2021-12**
https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2021-12

О р д е н а Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В. Келдыша
Р о с с и й с к о й а к а д е м и и н а у к

А.Ф. Лемешев, Д.Д. Жданов, Б.Х. Барладян

Метод восстановления параметров освещения в системах смешанной реальности

Москва — 2021

Лемешев А.Ф., Жданов Д.Д., Барладян Б.Х.

Метод восстановления параметров освещения в системах смешанной реальности

В работе рассматривается проблема дискомфорта зрительного восприятия, присущая системам смешанной реальности, а именно, определение параметров освещения объектов виртуального мира, соответствующих условиям освещения реального мира, в который встраиваются виртуальные объекты. В работе предлагается эффективное решение проблемы восстановления координат источника света по RGBD изображению реального мира. Приводится детальное описание алгоритма и результаты численного эксперимента по восстановлению координат источников света в модельной сцене. Анализируется точность восстановления координат и рассматриваются ограничения метода, связанные с неточностью определения границ объектов и их теней, а также недостаточностью взаимосвязанных областей границ объектов и их теней на RGBD изображении сцены.

Ключевые слова: смешанная реальность, распределение яркости, изображение широкого динамического диапазона, RGBD изображение, 3D-сцена, дополненная реальность, восстановление параметров освещения, прямое освещение, точечный источник света

Andrew Fedorovich Lemeshev, Dmitry Dmitrievich Zhdanov, Boris Khaimovich Barladyan

Lighting parameter restoration method in mixed reality systems

The paper deals with the problem of visual perception discomfort inherent in mixed reality systems, more precisely, the determination of the lighting parameters of the objects of the virtual world, corresponding to the lighting conditions of the real world, into which the virtual objects are embedded. The paper proposes an effective solution to the problem of reconstructing the coordinates of a light source from an RGBD image of the real world. A detailed description of the algorithm and the results of a numerical experiment on reconstructing the coordinates of light sources in a model scene are given. The accuracy of coordinate recovery is analyzed and the limitations of the method are considered, associated with the inaccuracy of determining the boundaries of objects and their shadows, as well as the lack of interconnected areas of the boundaries of objects and their shadows in the RGBD image of the scene.

Key words: mixed reality, luminance distribution, wide dynamic range image, RGBD image, 3D scene, augmented reality, lighting recovery, direct illumination, point light source

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 20-01-00547.

1. Введение

В настоящее время быстро развиваются технологии дополненной и смешанной реальности. Устройства дополненной реальности с помощью камер захватывают изображение окружающего пространства, а затем синтезируют виртуальные объекты, которые добавляют поверх изображения реального мира. Люди видят виртуальные объекты в реальном мире и могут взаимодействовать с ними с помощью специальных интерфейсов, зависящих от вида устройства. Устройства дополненной реальности можно разделить на две большие группы. К первой группе можно отнести устройства, имитирующие реальное зрительное восприятие виртуальных объектов с помощью нашлемных индикаторов или специальных очков дополненной реальности, например, Google glass. Ко второй группе относятся переносные устройства (смартфоны или планшеты), транслирующие с помощью камер изображение реального мира, на который накладываются виртуальные объекты. Существует множество производителей, которые позволяют дополнять реальность виртуальными объектами на экранах смартфонов. Большое количество исследователей изучают эффективность применения технологий виртуальной, дополненной и смешанной реальности для разных областей человеческой деятельности [1, 2, 3]. Есть множество проектов, использующих эти технологии вне индустрии развлечений и игр, например, проекты, использующие их в медицине [4], в архитектуре [5], в военном деле [6] и т. д.

В определенном смысле технология смешанной реальности значительно сложнее, чем виртуальной или дополненной реальностей. В смешанной реальности виртуальные объекты в пространстве реального мира должны выглядеть реалистично и не вызывать у пользователя конфликта зрительного восприятия. Для реалистичной визуализации виртуальных объектов необходимо выполнить ряд условий. Одно из важнейших условий – виртуальный объект должен иметь естественные текстуры и оптические свойства поверхности (отражение, пропускание, преломление). Оптические свойства объектов и текстуры назначаются в соответствии с природой виртуального объекта из достоверных библиотек оптических материалов. Вторым важнейшим условием является формирование параметров освещения виртуальных объектов в соответствии с условиями освещения в реально наблюдаемом мире. Это значит, что на поверхностях виртуальных объектов должны проявляться световые эффекты, аналогичные эффектам, возникающим на аналогичных объектах реального мира, например, затенение, блики, перепады яркости и т. п. Формирование естественного освещения виртуальных объектов должно вызывать их естественное восприятие и не создавать чувства зрительного дискомфорта.

В этой статье предлагается численный метод восстановления координат источников света, использующий изображения реальных объектов сцены и тени, формируемые этими объектами. Метод основывается на поиске точек на

границе тени, сопряженных с точками на границе объекта, посредством проекции этих точек на виртуальные плоскости экрана с последующей их кластеризацией и нахождением плоскостей экрана с максимальной плотностью расположения точек. Для проведения анализа работы представленного метода была построена тестовая сцена, состоящая из трех точечных источников света и нескольких объектов, отбрасывающих тени.

2. Анализ существующих работ

Возможность восстановления параметров естественного освещения рассматривалась многими исследователями, предложившими ряд методов для решения этой проблемы. Например, метод трех сфер, заключающийся в определении координат положения источника света в пространстве сцены [7]. Метод заключается в анализе распределения яркости освещаемого плоского диффузного объекта. Авторы показали, что предложенный подход позволяет найти положение источника света с высокой точностью даже при наличии фонового освещения. Тем не менее, метод имеет ряд недостатков: метод адекватно работает только для одного источника и только на поверхностях с идеальными диффузными свойствами.

Другой подход – это метод с использованием сверточной нейронной сети (СНС) [8]. Исследователи используют заранее синтезированные изображения для обучения СНС и затем используют обученную сеть для анализа изображений реальных сцен. Точность и эффективность метода удается повысить, объединяя результаты анализа освещенности сцены от нескольких экземпляров СНС. Как показывают эксперименты, использование СНС в данном методе позволяет получить достаточно точные оценки при анализе изображений реального мира. К недостаткам данного метода можно отнести то, что он не ищет источники света в сцене, а моделирует модель освещения по «знакомым» объектам вокруг. Данный подход может привести к формированию ложного освещения виртуальных объектов сцены.

Метод анализа теней на основе теневых объемов [9] показывает точные результаты и работает в реальном времени. Метод строит трафарет теней сцены и по нему определяет место, где должна появиться тень от виртуального объекта. Такой метод построения теней не учитывает геометрию окружающего пространства. Эта проблема решается с помощью частичного или полного построения модели сцены. Еще одним ограничением данного метода является возможность работы только с одним источником света в сцене.

В работе [10] авторы предлагают восстанавливать свойства сцены по случайно отсканированной геометрии. Статья описывает метод восстановления как параметров освещения, так и оптических свойств материалов поверхности случайно отсканированной геометрии. Под случайным сканированием авторы понимают быструю и потенциально зашумленную процедуру сканирования необработанных сцен с помощью обычного RGB-D сенсора. Предложенный

метод работает с входными данными, которые могут быть получены обычными пользователями систем дополненной реальности. Для обеспечения высокой надежности процедуры восстановления оптических характеристик сцены авторы сегментируют реконструированную геометрию на области с однородными оптическими свойствами материалов и вычисляют перенос освещения между этими областями. Такой подход позволяет решить обратную задачу и восстановить условия освещения сцены, включая оптические свойства материалов сцены. Восстановленные свойства сцены записываются в буфер, который затем используется для отрисовки объектов дополненной и смешанной реальностей. При этом положение источника света не восстанавливается, вместо этого результирующее освещение аппроксимируется из полученного буфера.

Для восстановления параметров освещения по HDRI изображениям сцены существует ряд работ [11-13], которые позволяют найти и выделить яркие источники света, создающие блики и тени. Однако при наличии естественного освещения гарнитуры смешанной реальности чаще всего используют датчики, которые позволяют найти положение солнца по ориентации гарнитуры в пространстве и данным времени (широта, долгота, дата и время).

В работе [14] был предложен метод, который частично или полностью решает вышеперечисленные проблемы. Положение источника света определяется по теням, которые отбрасывают объекты, освещенные источником света. Контур выбранного объекта «обстреливается» пучками лучей по контуру тени. Число лучей выбирается в зависимости от сложности контура тени и границы объекта. Для формирования пучков лучей по контуру объекта и тени достаточно получить изображение сцены и карту глубин, привязанную к системе координат наблюдателя. Для каждого источника лучей формируется соответствующий контур трасс. Затем анализируются точки пересечения полученных контуров на виртуальных плоскостях. Зная координаты точек пересечения и положение виртуальной плоскости, в которой происходит максимальная концентрация точек пересечения контуров, можно говорить о том, что область концентрации точек пересечения контуров с высокой точностью воспроизводит положение источника света.

В данном методе большую часть времени вычислений занимает анализ изображения линий контуров. В следующих разделах будет показано, как можно значительно сократить время, затрачиваемое на восстановление координат источников света, практически не теряя точности вычислений.

3. Метод определения координат источника света

Предлагаемое решение предназначено для устройств смешанной реальности. Устройства смешанной реальности анализируют пространство, наблюдаемое пользователем данного устройства. Анализ пространства включает в себя процесс формирования необходимых данных для дальнейшего распознавания объектов пространства и распознавания теней этих объектов. В

частности, строится RGBD изображение видимого участка сцены. Для того чтобы виртуальный объект, добавленный в реальную сцену устройством смешенной реальности, не вызывал конфликта зрительного восприятия, он должен учитывать условия освещения реальной сцены, а именно, быть освещенным с нужной стороны и отбрасывать тень в соответствии с положением источника света. Для соблюдения этих условий необходимо в первую очередь определить положение источников света в сцене. Для того чтобы определить положение источников света, предлагаемый алгоритм должен обладать двумя основными наборами данных. Во-первых, точки на RGBD изображении, соответствующие границам объектов, и, во-вторых, точки на RGBD изображении, соответствующие границам теней от объектов. Хотя эти данные представляют собой два несвязанных набора точек, однако алгоритм предполагает, что имеется прямое соответствие между объектами и их тенями на RGBD изображении.

Полученные наборы точек используются алгоритмом нахождения положений источников света, поскольку пересечение лучей, сформированных сопряженными точками, находящимися на границах тени и объекта, даст точку, соответствующую положению источника света, сформировавшему эту тень от объекта. Поэтому алгоритм состоит из двух основных функций: нахождение сопряженных точек и определение точки пересечения лучей, сформированных сопряженными точками. Для реализации этих функций формируется набор виртуальных плоскостей с регулярной пространственной сеткой. Плоскости располагаются параллельно поверхности земли, которая формируется из анализа RGBD изображения. Лучи, сформированные точками от границ тени на точки границ объектов, пересекают виртуальные плоскости и оставляют на них следы (точки). Положения источников света находятся итерационно на основе результатов анализа распределения точек на регулярной сетке. Метод поэтапно проверяет все возможные плоскости, на которых может находиться источник света. Регулярная сетка позволяет найти все скопления точек среди всего множества точек, пересекших виртуальную плоскость. Все скопления точек запоминаются для следующих итераций. На дальнейших итерациях проверяется характер распределения этих скоплений. 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 источник света находится на высоте виртуальной плоскости (рисунок 4). Одним из ограничений данного метода является невозможность восстановить интенсивность и диаграмму излучения источника света. Поэтому для освещения виртуального объекта модель использует Ламбертову диаграмму излучения с интенсивностью, соответствующей яркости объекта, отбрасывающего тень.

После того как виртуальная плоскость найдена, появляется одна координата положения источника света. Центр скопления точек на виртуальной

плоскости позволяет определить две оставшиеся координаты. При этом абсолютная ошибка определения координаты источника света по высоте не превышает половины шага, с которым чередуются виртуальные плоскости. Если ошибка определения координат источника света окажется значительной, то на следующих кадрах, формируемых видеосистемой смешанной реальности, можно скорректировать положение источника света на основе новых данных. Этими данными могут быть параметры RGBD изображения сцены, найденные устройством смешанной реальности, например, более четкие границы теней и объектов сцены. Используя вычисленные положения источников света, система смешанной реальности формирует корректное освещение виртуальных объектов сцены.

Алгоритм, разработанный на основе представленного метода, состоит из следующих шагов:

1. Получение входных данных от устройства смешанной реальности: RGBD изображение сцены (HDR видимого пространства и карта глубины сцены).
2. Поиск и распознавание объектов и теней этих объектов по RGBD изображению сцены.
3. Формирование наборов точек на границах объектов и их теней. Контуры объектов и контуры теней дают два несвязанных набора точек. Количество найденных точек практически не сказывается на точности, но найденные точки 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.
4. Построение лучей, направленных из каждой точки контура тени объекта на каждую точку контура соответствующего объекта, и поиск точек пересечения полученных лучей с виртуальными плоскостями «потолка», расположенными параллельно горизонту. В результате на виртуальных плоскостях формируются облака точек. Высокая плотность распределения группы точек говорит о близости положения виртуальной плоскости к источнику света.
5. Формирование распределения точек на регулярной сетке виртуальной плоскости. Поскольку проверка взаимного расположения точек на плоскости является затратной операцией, то для более быстрой обработки точек используется двумерная регулярная сетка с фиксированным размером ячеек. Сетка заполняется точками, полученными на предыдущем шаге.
6. Поиск виртуальных поверхностей с максимально плотным распределением групп точек. Максимальное количество точек в ячейке регулярной сетки свидетельствует о том, что данные точки с большой вероятностью были сформированы лучами, идущими от границы тени на объект в направлении источника света. Следовательно, максимальная плотность найденных точек будет свидетельствовать о том, что в этой

области находится источник света. Если ни для одной виртуальной плоскости не удается достичь высокой плотности точек, то источник света не найден. Это может происходить, например, если объекты и их тени были некорректно согласованы или видимый край объекта не является краем, создающим тень. Если была найдена группа точек с высокой плотностью, геометрический центр этих точек формирует положение источника света. Тип найденного источника света устанавливается точечным, а диаграмма излучения — Ламбертовой.

7. Уточнение координат источников света с использованием билинейной интерполяции между двумя виртуальными плоскостями с максимальной плотностью точек. На следующих RGBD кадрах, формируемых видеосистемой смешанной реальности, можно скорректировать положение источника света на основе новых данных.

8. Синтез виртуальных объектов при найденных источниках освещения.

9. Вывод синтезированного изображения.

Первые три пункта представленного метода не решаются в рамках данной работы и являются входными данными для предложенного метода. Решение проблем, связанных с распознаванием теней, связью теней с отбрасывающими их объектами, выделением контуров объектов, подробно описано в работах [15-18].

4. Виртуальная модель эксперимента

Приведенный выше алгоритм был реализован на языке C++. Входные данные для работы алгоритма были получены путем ручного распознавания объектов и соответствующих теней. На изображениях разработанной модели сцены (изображения на рисунках 1 и 2 отличаются положением камеры) присутствует ряд теней, которые формирует стол, расположенный под тремя источниками света. К этой модели применялся алгоритм, описанный в разделе «Метод». На рисунке 3 показана схематичная визуализация набора точек для одной из теней, полученных на виртуальной плоскости во время выполнения одного из этапов алгоритма. Высота возможного расположения источников освещения итерационно увеличивается с фиксированным шагом 0.1 м. Данный шаг достаточно мал, и погрешность положения источника света, вызванная этим шагом, не приводит к конфликту зрительного восприятия.

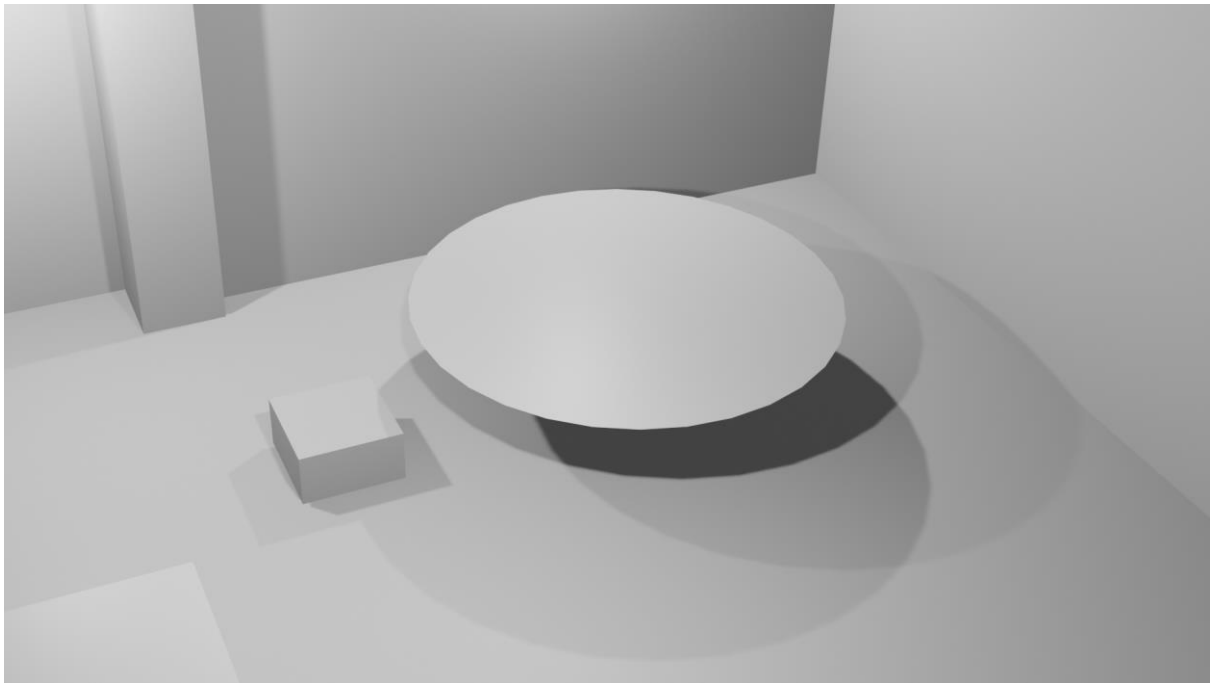

Рис. 1. Модель комнаты с тремя источниками света (камера 1)

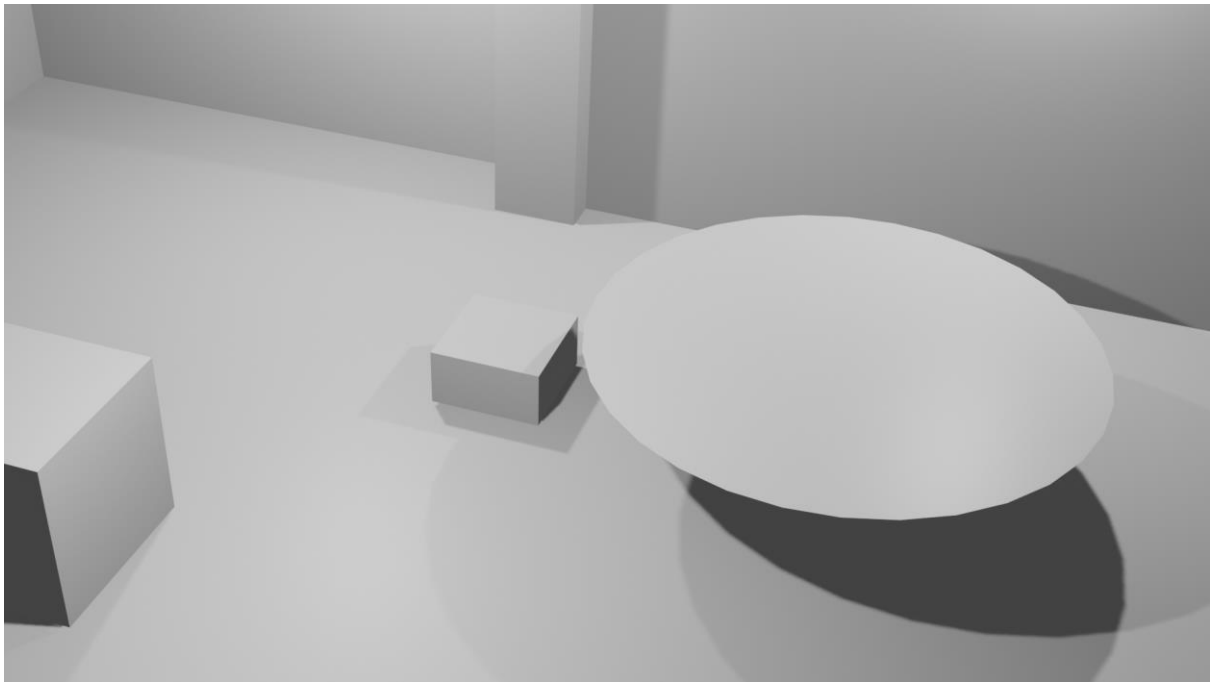

Рис. 2. Модель комнаты с тремя источниками света (камера 2)

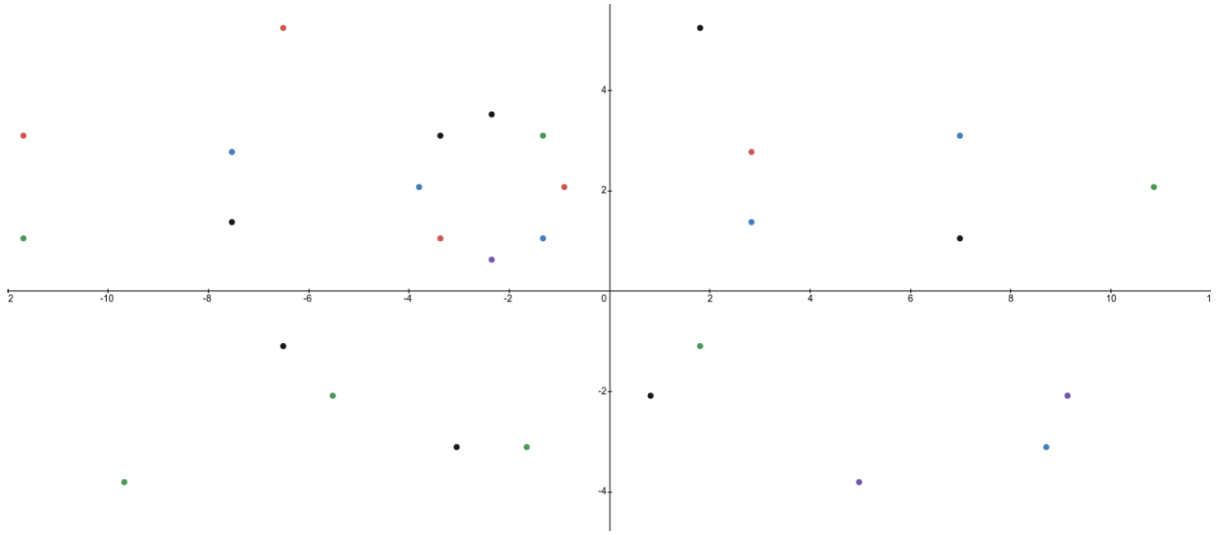

Рис. 3. Визуализация множества точек, полученных обратной трассировкой, на виртуальной плоскости предполагаемого источника света

Размер ячейки регулярной сетки фиксирован для всех виртуальных поверхностей и подбирается эмпирически. Как правило, размер ячейки варьируется в пределах (1-5)% от размера виртуальной плоскости и для данной сцены он равен 0.5x0.5 м. Визуализация работы алгоритма показана на рисунке 4. В таблицах 1, 2, 3 представлены результаты, полученные после восстановления координат трех источников света для модельной сцены, показанной на рисунках 1 и 2. Центр диска, отбрасывающего тень, расположен в точке с координатами (-4.71139, 1.5851, 4.1556).

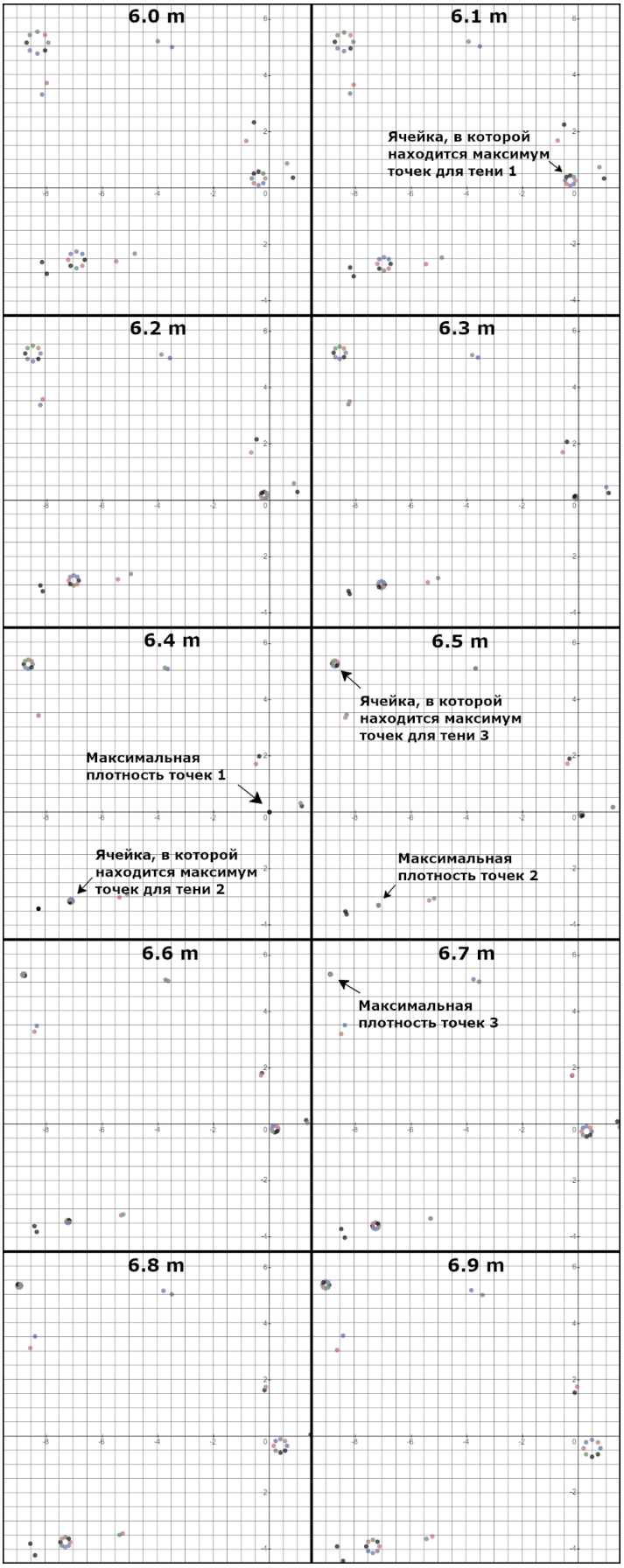

Рис. 4. Визуализация работы алгоритма

Таблица 1

Исходное и восстановленное положение источника 1

Ось	X (м)	Y (м)	Z (м)
Исходное положение источника света	0	6.4156	0
Восстановленное положение источника света	3.576e-07	6.4	-4.768e-07
Расстояние от центра диска к источнику	7.924641132354736		
Расстояние от центра диска к восстановленному источнику	7.915142536163330		
Абсолютная погрешность	0.009498596191406		
Относительная погрешность	0.001198615296744		

Таблица 2

Исходное и восстановленное положение источника 2

Ось	X (м)	Y (м)	Z (м)
Исходное положение источника света	-7.1811	6.5031	-3.3162
Восстановленное положение источника света	-7.17945	6.5	-3.31139
Расстояние от центра диска к источнику	9.279762268066406		
Расстояние от центра диска к восстановленному источнику	9.273807525634766		
Абсолютная погрешность	0.005954742431641		
Относительная погрешность	0.000641691265628		

Таблица 3

Исходное и восстановленное положение источника 3

Ось	X (м)	Y (м)	Z (м)
Исходное положение источника света	-8.8897	6.682	5.3233
Восстановленное положение источника света	-8.90445	6.7	5.32742
Расстояние от центра диска к источнику	6.693294048309326		
Расстояние от центра диска к восстановленному источнику	6.716927528381348		
Абсолютная погрешность	0.023633480072021		
Относительная погрешность	0.003530919086188		

Точность полученных результатов сопоставима с половиной шага между виртуальными плоскостями. Для большинства сцен данная ошибка не окажет существенного влияния на распределение яркости в синтезированном изображении сцены, что позволит наблюдать виртуальные объекты без видимого дискомфорта. На рисунке 5 показаны результаты сравнения изображений сцены, полученные при исходном положении источников света и после восстановления по представленному алгоритму. Результаты представлены для двух положений камер (левые изображения для первой камеры, правые для второй камеры) и для исходного (верхние рисунки) и восстановленного положения источников света (нижние рисунки).

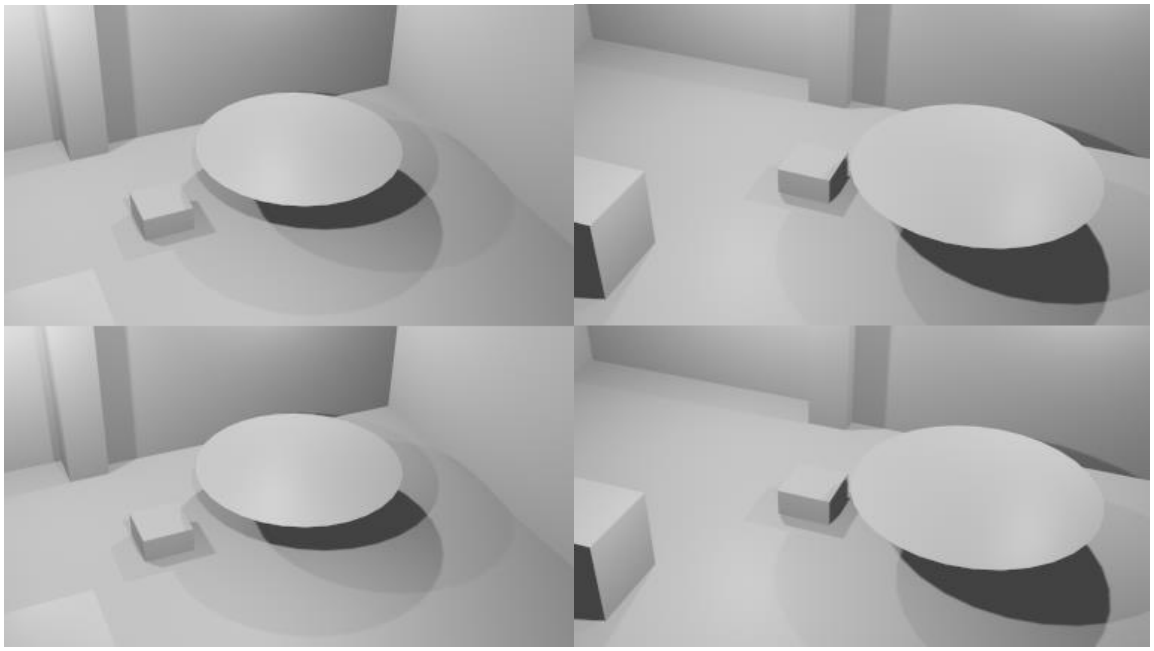

Рис. 5. Сравнение исходных и восстановленных источников света.
Левые рисунки соответствуют первой камере, правые – второй.
Верхние рисунки соответствуют исходному положению источников света,
нижние – восстановленному

Разработанный метод может быть использован в системах реального времени. Для модельной сцены время восстановления трех источников света на компьютере с процессором core i7-4770 составило 4 мс для восьми точек на контуре объектов и восьми точек на контуре теней. Для сравнения, алгоритм, представленный в работе [14], требовал для восстановления координат источника света нескольких секунд. Высокая скорость работы алгоритма позволяет на каждом последующем кадре работы устройства смешанной реальности уточнять положение источников света.

5. Ограничения метода

Основным ограничением данного метода является 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. Чтобы оценить влияние согласованности областей контуров объектов и их теней на точность восстановления координат источника света, необходимо проверить, при каком расхождении областей контура тени от контура объекта ошибка определения координат источника света будет более 5%. Такое расхождение контура тени от контура объекта можно назвать “допустимой ошибкой распознавания”. На рисунке 7 показаны несколько возможных наборов данных, получаемых от устройства распознавания изображения. В

случае а) устройство лишь частично распознало объект. Размер распознанных областей контуров объекта и тени составляет около 15% от всего контура объекта и тени. Эти области согласованы друг с другом, и ошибка определения координат источника света не выходит за рамки 5%. В случае б) размер распознанных областей контуров объекта и тени составляет около 50% от всего контура объекта и тени. При этом только 38% от распознанной части контура согласованы друг с другом, и ошибка определения координат источника света не выходит за рамки 5%. В случае в) показано, что контуры, распознанные более чем на 80%, при любой ошибке согласования позволяют определить координаты источника света с относительной погрешностью менее 5%.

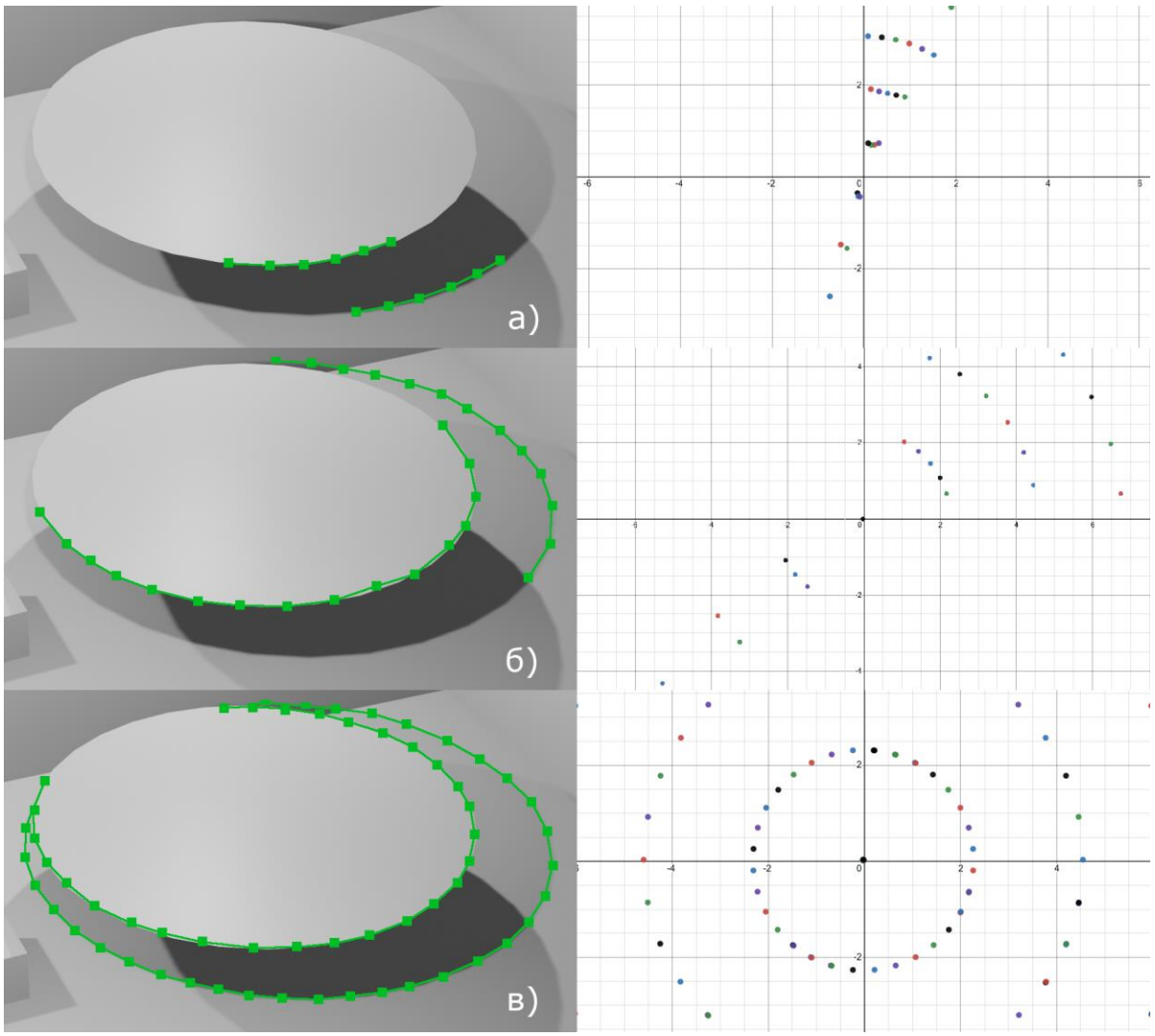

Рис. 6. Примеры частичного распознавания контуров объектов и тени

6. Заключение

В данной статье был усовершенствован метод восстановления координат источника света, представленный в работе [14]. Исследование показало, что поиск областей концентрации точек проекции теневых лучей на виртуальную

плоскость с регулярной сеткой значительно эффективнее, чем метод, основанный на поиске пересечения теневых контуров на виртуальной плоскости. Кроме того, точность работы предложенного метода находится в том же диапазоне, что и точность метода, представленного в работе [14]. Разработанный метод обладает высокой точностью и находит положение источника света в режиме реального времени. Это позволяет использовать его для работы в устройствах смешанной реальности. В качестве дальнейшего улучшения алгоритма рассматривается возможность адаптации параметров метода к анализируемой сцене и перенос алгоритма на GPU.

Список литературы

[1] William, R. and Craig, A., [Understanding virtual reality: Interface, application, and design], Morgan Kaufmann, (2018).

[2] Iis, T. P., Jung, T. H., and Claudia M. D., "Embodiment of wearable augmented reality technology in tourism experiences," Journal of Travel research 57(5), 597-611 (2018).

[3] Trout, T., "Collaborative mixed reality (MxR) and networked decision making," Next-Generation Analyst VI. Vol. 10653. International Society for Optics and Photonics, (2018).

[4] Sheena, B., Anandasabapathy, S. and Shukl, R. "Use of augmented reality and virtual reality technologies in endoscopic training," Clinical Gastroenterology and Hepatology 16(11), 1688-1691 (2018).

[5] Kiljae, A., Ko, D., and Gim, S. "A Study on the Architecture of Mixed Reality Application for Architectural Design Collaboration," International Conference on Applied Computing and Information Technology. Springer, Cham, 4861 (2018).

[6] Livingston, M., Zhuming, A., and Decker, J. W., "Human Factors for Military Applications of Head-Worn Augmented Reality Displays," International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics. Springer, Cham, 56-65 (2018).

[7] Wang, X., Zhdanov, D. D., Potemin, I. S., Wang, Y. and Cheng, H., "The efficient model to define a single light source position by use of high dynamic range image of 3D scene, " Proc. SPIE 10020, Optoelectronic Imaging and Multimedia Technology IV, 100200I (31 October 2016)

[8] Mandl, D., Yi, K. M., Mohr, P., Roth, P. M., Fua, P., Lepetit, V., Schmalstieg, D. and Kalkofen D., "Learning lightprobes for mixed reality illumination," 2017 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR). IEEE, 82-89(2017).

[9] Haller, M., Drab, S. and Hartmann, W., "A real-time shadow approach for an augmented reality application using shadow volumes," Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology. ACM, 56-65 (2003).

[10] Thomas Richter-Trummer, Denis Kalkofen, Jinwoo Park, Dieter Schmalstieg, "Instant Mixed Reality Lighting from Casual Scanning", 2016 IEEE International

Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), vol. 00, no. , pp. 27-36, 2016, doi:10.1109/ISMAR.2016.18
[11] Волобой А.Г., Галактионов В.А., Копылов Э.А., Шапиро Л.З. Расчет солнечного освещения, заданного изображением с большим динамическим диапазоном // Труды 16-й международной конференции по компьютерной графике и ее приложениям - ГрафиКон'2006, Россия, Новосибирск, июль 1-5, 2006, с. 467-472.
[12] Волобой А.Г., Галактионов В.А., Копылов Э.А., Шапиро Л.З. Моделирование естественного дневного освещения, задаваемого изображением с большим динамическим диапазоном // "Программирование", № 5, 2006, с. 62-80.
[13] Валиев И.В., Волобой А.Г., Галактионов В.А. Физически корректная модель солнечного освещения, задаваемая изображением с большим динамическим диапазоном // "Вестник компьютерных и информационных технологий", № 9, 2009, с. 10-17.
[14] Bogdanov N. N., Potemin I. S., Zhdanov D. D., Zhdanov A. D., Sorokin M. I. The efficient method of mixed reality light restoration using HDR image of 3D scene //Digital Optical Technologies 2019. – International Society for Optics and Photonics, 2019. – Т. 11062. – С. 110621Y.
[15] Hariharan, Bharath, et al. "Simultaneous detection and segmentation" European Conference on Computer Vision. Springer, Cham, (2014).
[16] Gupta, Saurabh, Pablo Arbelaez, and Jitendra Malik. "Perceptual organization and recognition of indoor scenes from RGB-D images." Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, (2013).
[17] Kim, Dong, Muhammad Arsalan, and Kang Park. "Convolutional neural network-based shadow detection in images using visible light camera sensor" Sensors 18.4 (2018): 960.
[18] Ji, Jing, Xudong Jiang, and Wei Sun. "Shadow detection using double-threshold pulse coupled neural networks." 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2016.

Оглавление

1. Введение 3
2. Анализ существующих работ 4
3. Метод определения координат источника света 5
4. Виртуальная модель эксперимента 8
5. Ограничения метода 14
6. Заключение 15
Список литературы 16