

Создание условий для естественного зрительного восприятия в видео-прозрачных системах смешанной реальности

А.Д. Жданов¹, Д.Д. Жданов¹

¹ Университет ИТМО, Кронверкский пр. 49, лит. А, Санкт-Петербург, 197101, Россия

Аннотация

В данной работе представлены результаты исследования методов коррекции конфликта конвергенции, который может возникнуть при использовании систем смешанной реальности. Существуют два принципиально различных типа систем смешанной реальности. Первый – это оптически-прозрачные системы, второй – видео-прозрачные. Принципиальное различие между ними заключается в том, каким образом пользователь наблюдает объекты реального мира. Если в оптически-прозрачных системах они наблюдаются непосредственно, то в видео-прозрачных системах изображение реального мира отображается на экране устройства одновременно с изображением виртуальных объектов. В результате, при наблюдении объектов реального мира с использованием видео-прозрачных систем смешанной реальности может возникнуть конфликт конвергенции и аккомодации зрения, аналогичный с возникающим в системах виртуальной реальности.

Большинство существующих видео-прозрачных систем смешанной реальности имеют две фиксированные камеры, расположенные на передней части устройства, предназначенные для получения изображения, которое далее будет отображаться на экранах устройства и наблюдаться пользователем. Как правило, для этих целей используются две фронтальные камеры, для каждого из глаз пользователя. Однако в данном случае конфликт конвергенции возникает из-за несовпадения фиксированного направления камер с постоянно изменяющимся направлением глаз пользователя. В данной работе авторы предлагают использовать специальные методы обработки изображений, полученных с фронтальных RGB камер, и карты глубин для восстановления изображения с учетом правильной конвергенции глаз пользователя.

Были рассмотрены различные модели, отличающиеся количеством и расположением фронтальных камер, в том числе решения с использованием одной RGBD-камеры и нескольких RGB-камер. Представлены результаты моделирования. Показаны плюсы и минусы предложенных методов восстановления конвергенции.

Ключевые слова

Конфликт конвергенции, визуальное восприятие, смешанная реальность, виртуальная реальность, отслеживание зрачка, реалистичный рендеринг.

Forming an Image that Corresponds to the Natural Perception of the Human Vision in Video See-Through Mixed Reality Systems

A.D. Zhdanov¹, D.D. Zhdanov¹

¹ ITMO University, Kronverksky Pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, 197101, Russia

Abstract

In this work authors investigated the vergence-accommodation conflict that may appear in mixed reality systems. There exist two main types of the mixed reality systems, one is optical see-through mixed reality systems, other one is video see-through mixed reality systems. One of significant differences between them is how the device user observes the surrounding real world. In case of the

ГрафиКон 2022: 32-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-22 сентября 2022 г., Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия

EMAIL: andrew.gtx@gmail.com (А.Д. Жданов); ddzhdanov@mail.ru (Д.Д. Жданов)

ORCID: 0000-0002-2569-1982 (А.Д. Жданов); 0000-0001-7346-8155 (Д.Д. Жданов)



© 2022 Copyright for this paper by its authors.

Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

optical see-through device, it is observed directly with natural observation conditions, however in case of the video see-through systems the real world image is observed as an image displayed on the device screen. As a result, when observing the real world the video see-through systems might be affected by the vergence-accommodation conflict.

Most of existing video see-through mixed reality systems have two fixed cameras located at the front side of the device to capture the image to be displayed for each of the user eyes. However, in this case the vergence conflict appears due to the disagreement between the fixed direction of the external cameras of the mixed reality device with the constantly changing direction of the human eyes. In the current work authors propose the special image processing methods to correct this disagreement and recover the image with correct vergence basing on the RGB images from cameras and real-world depth estimation.

Authors considered different number and placement of the front cameras including the solutions using single RGBD camera and multiple RGB cameras. The simulation results are presented. The pros and cons of proposed recovering methods are shown.

Keywords

Vergence conflict, visual perception, mixed reality, virtual reality, eye tracking, photorealistic rendering.

1. Введение

В последние годы область применения систем смешанной реальности постоянно расширяется. Индустрия устройств смешанной реальности непрерывно развивается, сохраняя лучшее и избавляясь от недостатков. Исследователи и разработчики программного обеспечения активно работают над сочетанием технологий смешанной реальности и традиционных отраслей, таких как смешанная реальность + образование, смешанная реальность + финансы, смешанная реальность + промышленность, смешанная реальность + развлечения и т. д.

Для более широкой интеграции систем смешанной реальности выпускаемое оборудование должно обеспечивать пользователям максимальный комфорт при его использовании, что требует не только применения более качественного ЖК экрана и оптической системы отображения, но и отсутствия дискомфорта зрительного восприятия, который может возникнуть при использовании устройства.

Исследования в области виртуальной и смешанной реальности ведутся на международном уровне. В России на базе Дальневосточного федерального университета создан Центр национальной технологической инициативы по нейротехнологиям и технологиям виртуальной и дополненной реальностей. Центр был создан при поддержке федерального гранта и нацелен на исследование передовых технологий и вывод их на мировой рынок.

Правительство США всегда придавало большое значение исследованиям, разработкам и применению технологий виртуальной реальности. Национальный научный фонд, Министерство обороны, НАСА, Министерство транспорта и другие ведомства развернули ряд планов исследований и разработок в области виртуальной реальности.

В Европе в рамках программы ЕС H2020 также был проведен ряд исследований в области виртуальной реальности, основные направления которых включают в себя аппаратные технологии виртуальной реальности, программные технологии виртуальной реальности, отраслевые приложения виртуальной реальности и т.д. Конкретные области применения включают военную отрасль, национальную оборону, здравоохранение, образование, архитектурный дизайн, спорт, сохранение культурного наследия и др.

В Китае после почти десяти лет развития индустрия дополненной реальности и машинного обучения становится все более зрелой, формируя пять основных отраслевых кластеров смешанной реальности, включая Цзянси, где изначально формировалась соответствующая промышленная инфраструктура. В настоящее время в Китае насчитывается более 3000 предприятий, связанных с системами виртуальной, дополненной и смешанной реальности. В настоящее время в Шанхае насчитывается более 200 предприятий, непосредственно ведущих бизнес в данной области, плюс более 300 косвенно вовлеченных предприятий. Более трети из данных компаний имеют зарегистрированный капитал в размере более 10 миллионов юаней.

Существует два принципиально различных типа систем смешанной реальности. Первый – это оптически-прозрачные системы [1, 2], второй – видео-прозрачные [3, 4]. Принципиальное различие между ними заключается в том, как пользователь наблюдает объекты реального мира. В оптически-прозрачных системах они наблюдаются непосредственно, таким образом глаза пользователя фокусируются непосредственно на реальных объектах, что исключает возможность возникновения конфликта конвергенции и аккомодации зрения. В видео-прозрачных системах изображение реального мира отображается на экране устройства одновременно с изображением виртуальных объектов. В результате, при наблюдении объектов реального мира с использованием видео-прозрачных систем смешанной реальности может возникнуть конфликт конвергенции и аккомодации зрения, вызванный тем, что глаза пользователя должны фокусироваться на ЖК дисплеях, а не на наблюдаемых объектах, что приводит к конфликту, так как расстояние конвергенции становится отличным от расстояния аккомодации. Принципиальная схема видео-прозрачной системы смешанной реальности, демонстрирующая источник возникновения конфликта конвергенции, представлена на Рисунке 1.

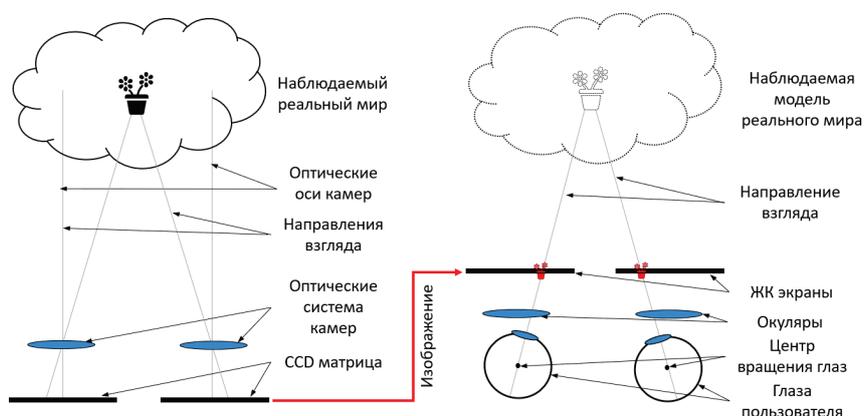


Рисунок 1 – Модель видео-прозрачной системы смешанной реальности

Таким образом, при использовании видео-прозрачной системы смешанной реальности необходимо выполнять дополнительную обработку изображений объектов реального мира для уменьшения разницы между конвергенцией внешних камер устройства и реальной конвергенцией глаз пользователя.

Целью данной работы было исследование методов коррекции изображения объектов реального мира для последующего отображения их на ЖК дисплеях видео-прозрачной системы смешанной реальности.

Актуальность данного исследования подтверждается работами различных групп ученых, изучающих визуальное восприятие систем виртуальной и смешанной реальности. Было предложено множество методов, направленных на решение проблемы конфликтов конвергенции и аккомодации зрения в системах виртуальной реальности, в том числе дисплеи светового поля и многокурсовые ретинальные дисплеи [5], массивы микролинз [6], параллаксные барьеры [7], дисплеи с точечным светом [8], мультифокальные дисплеи [9, 10], цифровая голография [11] и др. Развитие технологий компактных камер и датчиков позволяет разрабатывать новые программные методы коррекции для борьбы с конфликтом конвергенции.

2. Восстановление конвергенции

Как было сказано ранее, при наблюдении объектов реального мира с использованием видео-прозрачной системы смешанной реальности объекты реального мира «переносятся» в виртуальный мир и отображаются проецируемыми с ЖК дисплеев, аналогично с системой виртуальной реальности, что приводит к преобладанию конфликта конвергенции зрения и методов коррекции конфликта.

Неотъемлемой частью системы смешанной реальности является набор внешних датчиков устройства для сбора данных о реальном мире. Датчики систем смешанной реальности могут использоваться для получения информации о:

- положении пользователя в реальном мире;
- направлении взгляда пользователя;
- RGB изображении реального мира;
- карт глубин реального мира;
- границах объектов реального мира и свойств поверхностей;
- освещении и звуках;
- распознанных объектах.

Эта информация может быть применена при разработке алгоритмов обработки изображений для снижения дискомфорта зрительного восприятия.

Основная идея метода, предлагаемого в рамках данной статьи, заключается в обработке данных, полученных с внешних камер и датчиков глубины устройства смешанной реальности, для формирования трехмерной модели реального мира и последующего отображения этой модели на ЖК экранах, учитывая направления наблюдения пользователя и корректную конвергенцию зрения, методом, аналогичным с используемым при визуализации виртуальных объектов в системах виртуальной реальности, свободных от конфликтов конвергенции и аккомодации зрения [12]. Для применения данного подхода требуется выполнение двух условий.

Первым условием является получение информации о направлении взгляда пользователя. Для этого может использоваться система отслеживания положения зрачка в системе смешанной реальности.

Вторым условием является наличие трехмерной модели реального мира для последующей визуализации. Модель реального мира может быть построена с использованием изображений, полученных с нескольких фронтальных RGB камер с соответствующей пост-обработкой, либо же с использованием лидара или одной RGB-D камеры.

Имея эту информацию, можно создать трехмерную модель реального мира, а затем применить методы, используемые в системах виртуальной реальности, для формирования изображений для отображения на ЖК экранах для левого и правого глаз с учетом реальной конвергенции зрения.

2.1. Модель реального мира

Одним из условий применения методов коррекции конвергенции зрения при наблюдении объектов реального мира с использованием видео-прозрачной системы смешанной реальности является создание трехмерной модели реального мира. Для этого необходимо преобразовать данные о реальном мире, полученные с камер устройства и датчиков глубины, в трехмерную модель реального мира. После этого и внешние камеры устройства, и виртуальные камеры, моделирующие «виртуальные глаза» и формирующие изображение для каждого из глаз пользователя, будут находиться в едином виртуальном пространстве и наблюдать одну и ту же трёхмерную модель реального мира. Как показано на Рисунке 2, в рамках данного исследования в качестве модели реального мира используется облако точек, имеющих RGB яркость. Данная модель была выбрана по причине её быстроедействия и возможности использования эффективных алгоритмов распараллеливания при реализации методов формирования облака точек и его визуализации в виртуальных камерах.

Для создания облака точек используются данные с RGB-D камер или стереопары с опорной сеткой лидара [13]. Предварительная калибровка системы 3D-сканирования позволяет задать модель реального мира в реальных физических единицах и системе координат реального мира. Более того, если устройство смешанной реальности оснащено системой отслеживания движений, то облако точек может накапливаться во время движения пользователя для повышения качества изображения.

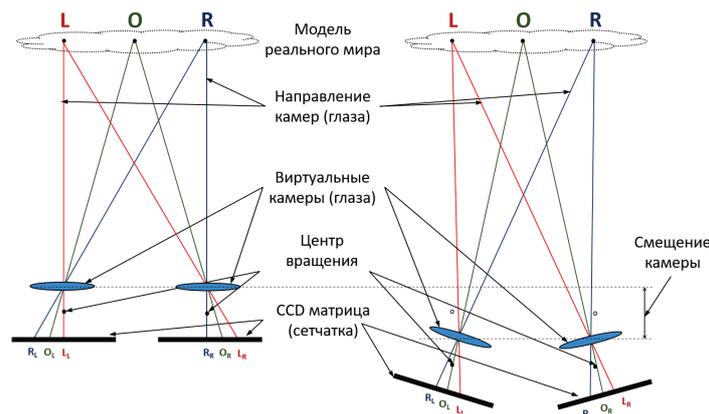


Рисунок 2 – Модель наблюдения облака точек трехмерной модели реального мира двумя фиксированными камерами (слева) и «виртуальными глазами» (справа)

2.2. Модель виртуального глаза

Следующим шагом, необходимым для формирования изображения в соответствии с направлением взгляда пользователя, является создание модели «виртуального глаза», помещенного в виртуальное представление реального мира. Модель «виртуального глаза» представляет собой виртуальную камеру, которая будет использоваться для синтеза изображения реального мира, которое затем будет отображаться на соответствующем ЖК дисплее устройства смешанной реальности.

Если направление взгляда совпадает с направлением фронтальных камер, а положение глаз совпадает с положением камер, то, очевидно, глаза будут видеть ровно то же изображение, что снимают камеры, поэтому коррекция конвергенции не потребуется, как показано на Рисунке 3 (а). Однако, сконструировать такое устройство физически невозможно. В реальном случае положение камер и глаз различно, и, кроме того, глаза находятся в постоянном движении, поэтому изображение, которое должны видеть глаза, будет отличаться от того, что снимает камера.

Рассмотрим движение глаз, именно так и должна двигаться модель «виртуального глаза». В простейшем случае глаз может быть смоделирован как простая точечная камера, вращающаяся вокруг входного зрачка в соответствии с направлением взгляда, полученным от системы отслеживания зрачка. В таком случае точки реального мира, расположенные на одной линии обзора, проецируются в одну и ту же точку изображения. Другими словами, если какая-то точка объекта реального мира перекрывается другим объектом реального мира, то данное перекрытие инвариантно к движению виртуального глаза, что показано на Рисунке 3 (б). Таким образом, для данной модели глаза коррекция конвергенции может быть реализована простым преобразованием плоского изображения, полученного с фронтальной камеры и зависящего исключительно от угла между направлениями камеры и «виртуального глаза».

Основным недостатком данной модели является то, что реальный глаз не вращается вокруг своего входного зрачка, а вращается вокруг центра глаза, поэтому модель «виртуального глаза» тоже должна вращаться вокруг его центра, как показано на рисунке 3 (в), что приводит к возможности возникновения ситуации, что части объектов реального мира, которые ранее были перекрыты другими видимыми объектами, могут стать видимыми для нового положения «виртуального глаза», тогда как информация об этих областях будет отсутствовать в построенной ранее трехмерной модели реального мира.

Также следует учитывать, что камера и глаз различаются не только направлением, т.е. углом поворота виртуальной камеры, но и не могут физически располагаться в одной и той же точке пространства, поэтому камеры устройства должны быть смещены от расположения глаз пользователя в соответствии с конструктивными особенностями устройства. Соответствующая модель «виртуального глаза» представлена на Рисунке 3 (г).

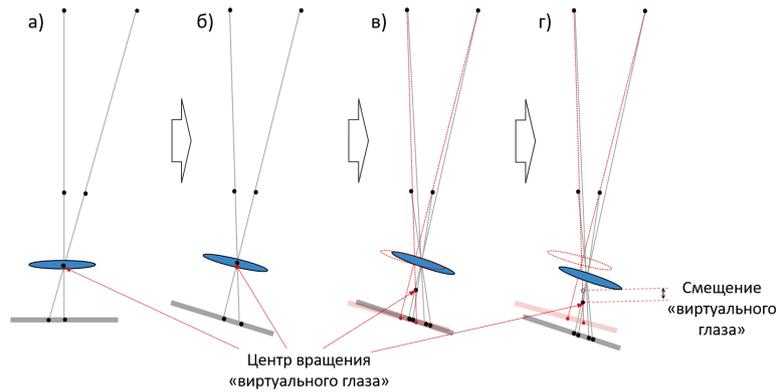


Рисунок 3 – Наблюдение четырех точек с частичным перекрытием а) фронтальными камерами, б) моделью «виртуального глаза» с поворотом вокруг входного зрачка, в) моделью «виртуального глаза» с поворотом вокруг центра глаза и г) моделью «виртуального глаза» с поворотом вокруг центра глаза и смещением от фронтальной камеры

В результате, точки реального мира, которые изначально были перекрыты при формировании модели реального мира на основе данных с фронтальной камеры, могут оказаться видимы для положения «виртуального глаза», который расположен позади камеры и ориентирован не по направлению фронтальной камеры. Этот эффект приведет к появлению «черных» точек, для которых отсутствует информация об объектах реального мира. Для решения этой проблемы могут быть использованы различные методы сбора информации об областях перекрытия, в том числе:

- использование нескольких камер для повышения детализации модели реального мира;
- использование методов интерполяции для заполнения «черных точек»;
- накопление модели реального мира при перемещениях пользователя.

В рамках нашего исследования мы использовали первые два метода и их сочетание.

2.3. Интерполяция областей частичного перекрытия

Кроме эффекта перекрытия, описанного выше, может также возникнуть эффект наложения, вызванный дискретным характером изображения реального мира и, следовательно, его модели, заданной в виде облака точек. Оба эти эффекта приводят к появлению «черных точек» на изображении с восстановленной конвергенцией, что показано на Рисунке 4.

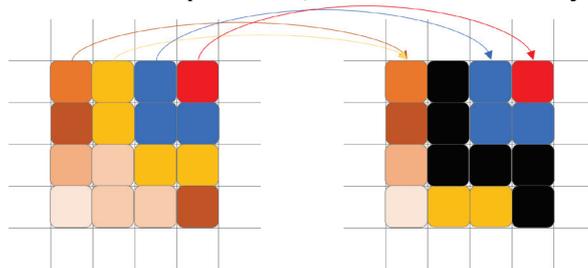


Рисунок 4 – Появление «черных точек» по причине наложения объектов

Этот эффект существенно влияет на качество восстановленного изображения, добавляя импульсный шум, который будет замечен пользователю устройства. В случае, если эти области небольшие, например, отдельные пиксели или линии, то они могут быть отфильтрованы классическим медианным фильтром. Однако в большинстве случаев области имеют ширину в несколько пикселей и медианная фильтрация становится неприменима. В данной работе для фильтрации «черных точек» предлагается использовать методику взвешенной интерполяции при обнаружении «черной точки»:

1. Найти все соседние пиксели с известной информацией о цвете и глубине;
2. Вычислить цвет пикселя как взвешенную сумму цветов пикселей с учетом карты глубин.

Данный процесс проиллюстрирован на Рисунке 5.

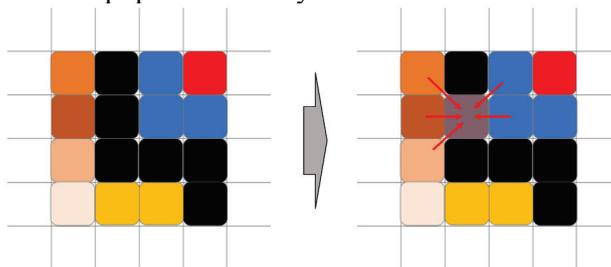


Рисунок 5 – Интерполяция «черных точек»

Таким образом, алгоритм коррекции изображения реального мира для отображения в видео-прозрачной системе смешанной реальности состоит из следующих шагов:

1. Построение трехмерной виртуальной модели реального мира в виде облака точек.
2. Создание виртуальных камер, соответствующих положению глаз пользователя в системе координат виртуальной модели реального мира.
3. Проекция облака точек виртуальной модели реального мира в виртуальные камеры.
4. Интерполяция «черных точек» на построенных изображениях.
5. Дефокусировка построенных изображений для устранения конфликта адаптации зрения.

3. Виртуальное прототипирование

Описанный в данной статье метод был протестирован на виртуальном прототипе видео-прозрачной системы смешанной реальности в виртуальном прототипе реального мира, заданном сценой Amazon Lumberyard Bistro [14]. Данная сцена была выбрана по причине того, что в ней имеется большое количество объектов с различными свойствами, расположенных на разном расстоянии от наблюдателя. Однако, поскольку эта сцена изначально не была предназначена для виртуального прототипирования и физически корректной визуализации, необходимо повысить её реалистичность. Во-первых, требуется перевести её в систему координат, заданную в реальных физических единицах измерения. Для этого было произведено масштабирование сцены исходя из предположения, что высота стола равна 0.9м. Во-вторых, требуется исправить свойства поверхности объектов, чтобы они стали более реалистичными, например, сделать бутылку стеклянной, убрать зеркальное отражение с ковра и т. д.

В рамках виртуального прототипирования были смоделированы две модели систем смешанной реальности. Первая модель была оборудована двумя фронтальными RGB камерами, расположенными на линии взгляда на расстоянии 50мм перед каждым из глаз пользователя. Вторая модель имела только одну RGB-D камеру, расположенную на расстоянии 50 мм от плоскости глаз пользователя, по центру передней части устройства. Расстояние между глазами принято равным 65мм. Пользователь с устройством смешанной реальности стоял у окна бистро и смотрел на горлышко бутылки, стоявшей на ближайшем к нему столе.

Схемы моделей систем смешанной реальности, используемых при виртуальном прототипировании, показаны на Рисунке 6.

В процессе работы с виртуальным прототипом систем смешанной реальности виртуальный пользователь устройства перемещался в направлении стола, постепенно уменьшая расстояние до наблюдаемого объекта от первоначальных 2м до 0.5м. Использование виртуального прототипа реального мира позволяет не только проводить виртуальные эксперименты, но и строить эталонные изображения для оценки качества работы исследуемых методов. Для построения эталонных изображений пользователь помещался в то же положение, но без виртуального прототипа системы смешанной реальности. Результаты работы методов коррекции оценивались качественно. Производилось сравнение полученного изображения с эталонным. Входные данные для работы метода коррекции брались с виртуальных RGB камер виртуального прототипа реального мира.

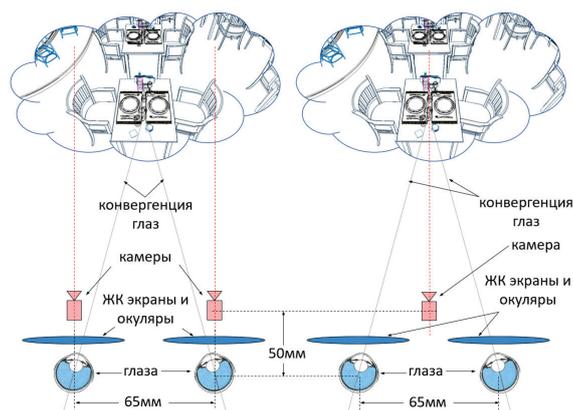


Рисунок 6 – Схема виртуального прототипа системы смешанной реальности с двумя RGB камерами (слева) и одной RGB-D камерой (справа)

На Рисунке 7 показан пример входных данных, полученных с пары внешних RGB камер виртуального прототипа, на расстоянии 2м до объекта наблюдения и ограничении поля зрения в 20° .



Рисунок 7 – Изображения, полученные с двух фронтальных RGB камер на расстоянии 2м

При использовании одной RGB-D камеры, расположенной по центру устройства, входными данными являлись RGB изображение и карта глубин. Пример входных данных при расстоянии 2м до объекта наблюдения и ограничении поля зрения до 20° показан на Рисунке 8.



Рисунок 8 – Изображение и карта глубин, полученные с одной центральной фронтальной RGB-D камеры на расстоянии 2м

Результаты виртуального прототипирования видео-прозрачной системы смешанной реальности с двумя RGB камерами и одной RGB-D камерой для расстояний наблюдения 2м, 1м и 0.5м показаны на Рисунках 9, 11 и 13 соответственно. Результаты применения метода интерполяции «черных точек» и сравнение с эталонными изображениями для тех же дистанций показаны на Рисунках 10, 12 и 14. Результаты сгруппированы по расстоянию наблюдения, по одной странице на одну дистанцию. Для анализа качества изображений угол зрения ограничен до центральных 10° .

Результаты виртуального прототипирования показали, что в большинстве случаев одной RGB-D камеры недостаточно для полной коррекции изображения, тогда как использование двух камер позволяет получить хороший результат с незначительным количеством «черных точек», которые становятся практически неразличимы после применения метода интерполяции.

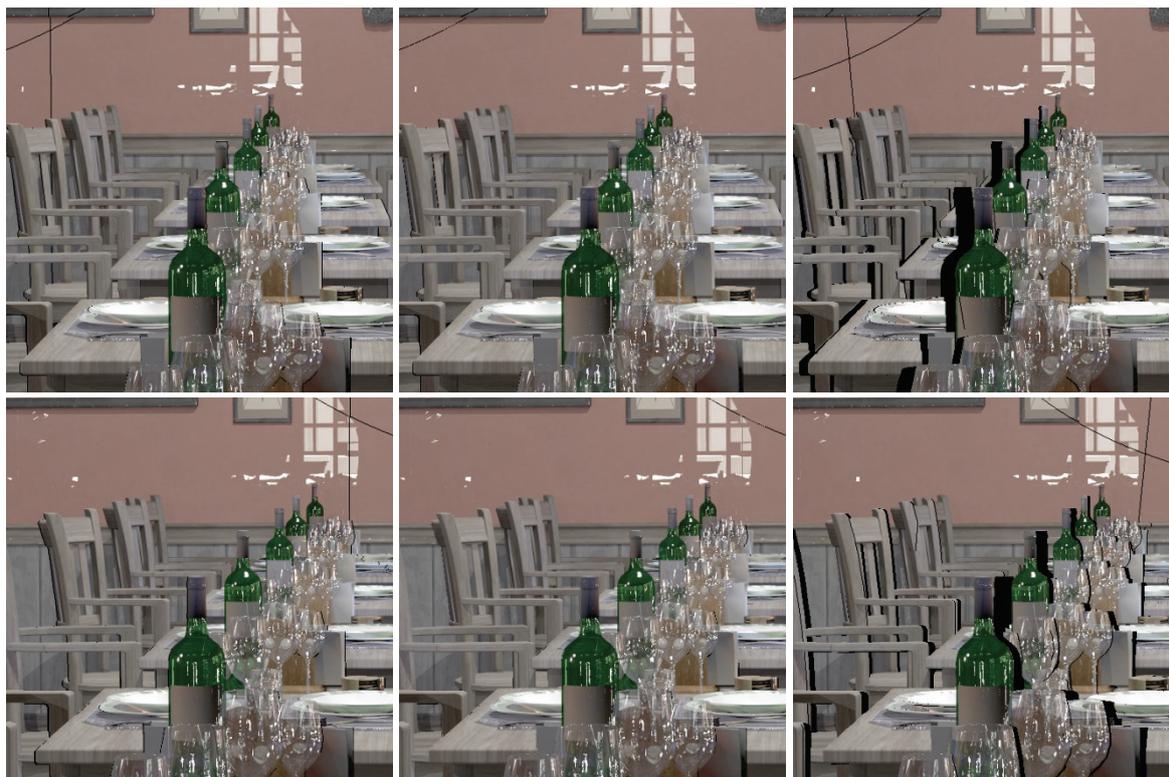


Рисунок 9 – Сравнение результатов, полученных с использованием двух RGB-D камер при использовании данных от соответствующей глазу камеры (левая колонка), от обеих камер (средняя колонка) и одной центральной RGB-D камерой (правая колонка) для левого (верхний ряд) и правого глаза (нижний ряд) при расстоянии наблюдения 2м без интерполяции

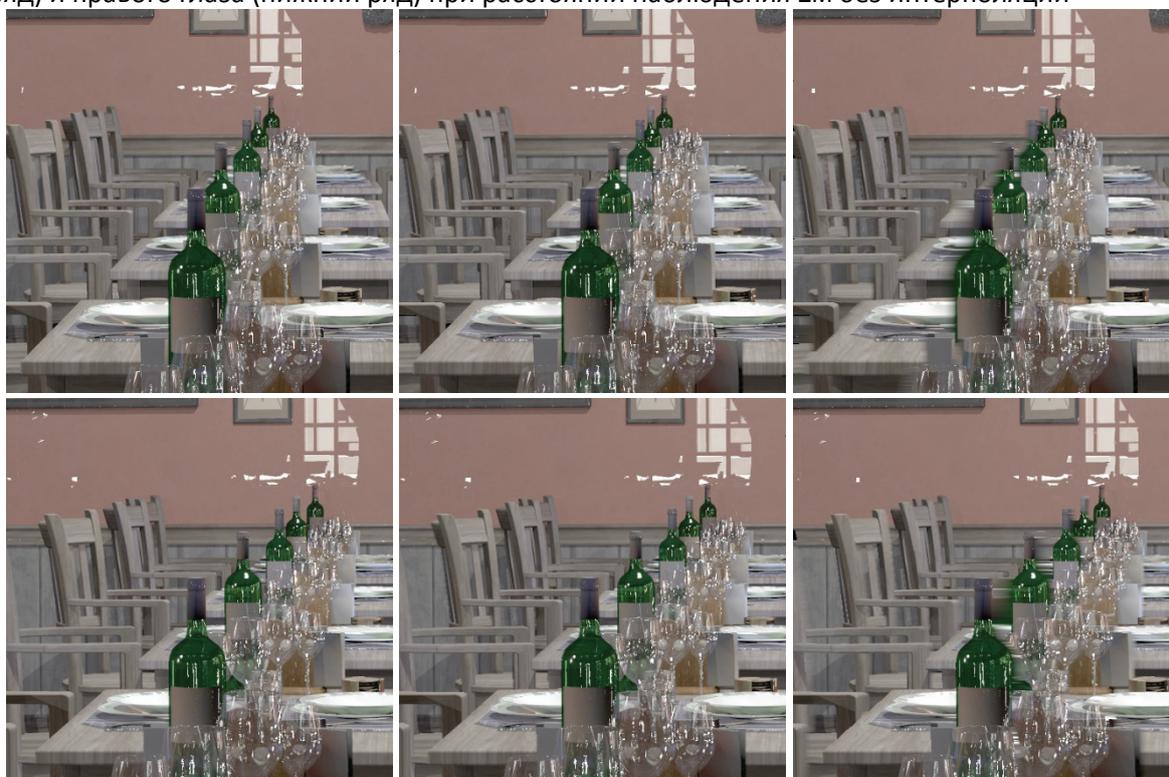


Рисунок 10 – Сравнение эталонных результатов (левая колонка) с результатами, полученными после интерполяции для системы с двумя камерами (средняя колонка) и одной центральной RGB-D камерой (правая колонка) для левого (верхний ряд) и правого глаза (нижний ряд) при расстоянии наблюдения 2м

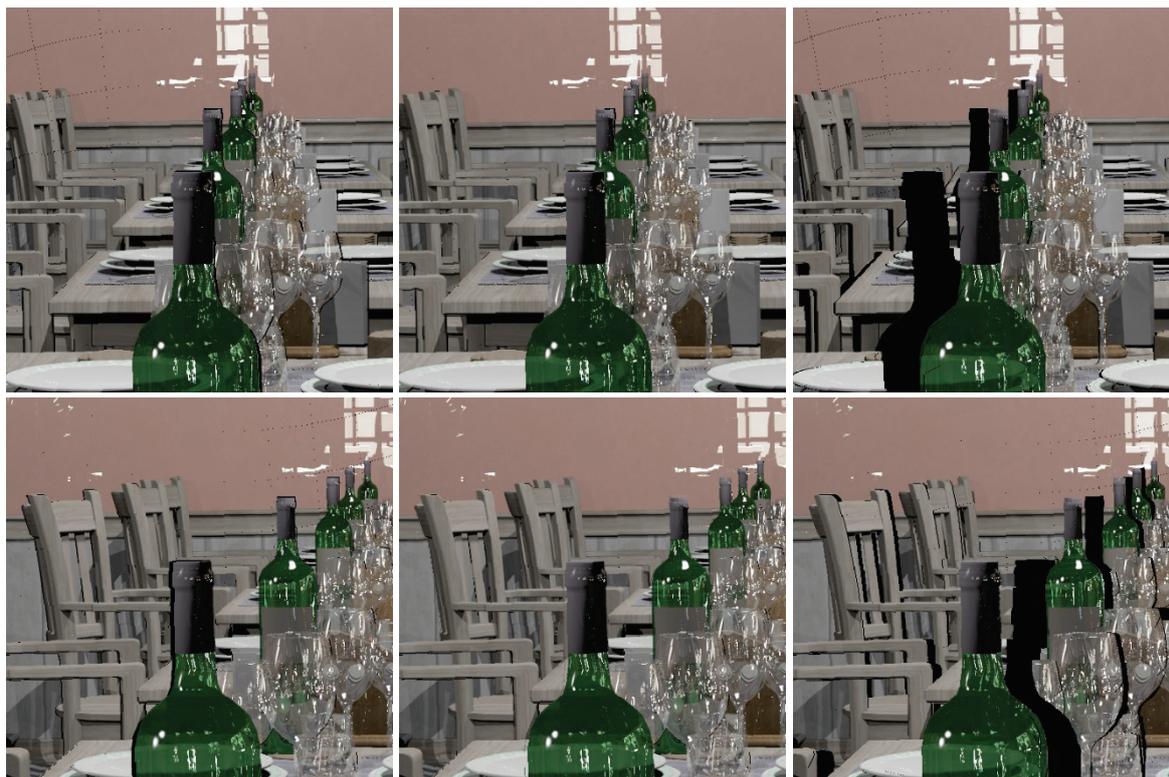


Рисунок 11 – Сравнение результатов, полученных с использованием двух RGB-D камер при использовании данных от соответствующей глазу камеры (левая колонка), от обеих камер (средняя колонка) и одной центральной RGB-D камеры (правая колонка) для левого (верхний ряд) и правого глаза (нижний ряд) при расстоянии наблюдения 1м без интерполяции

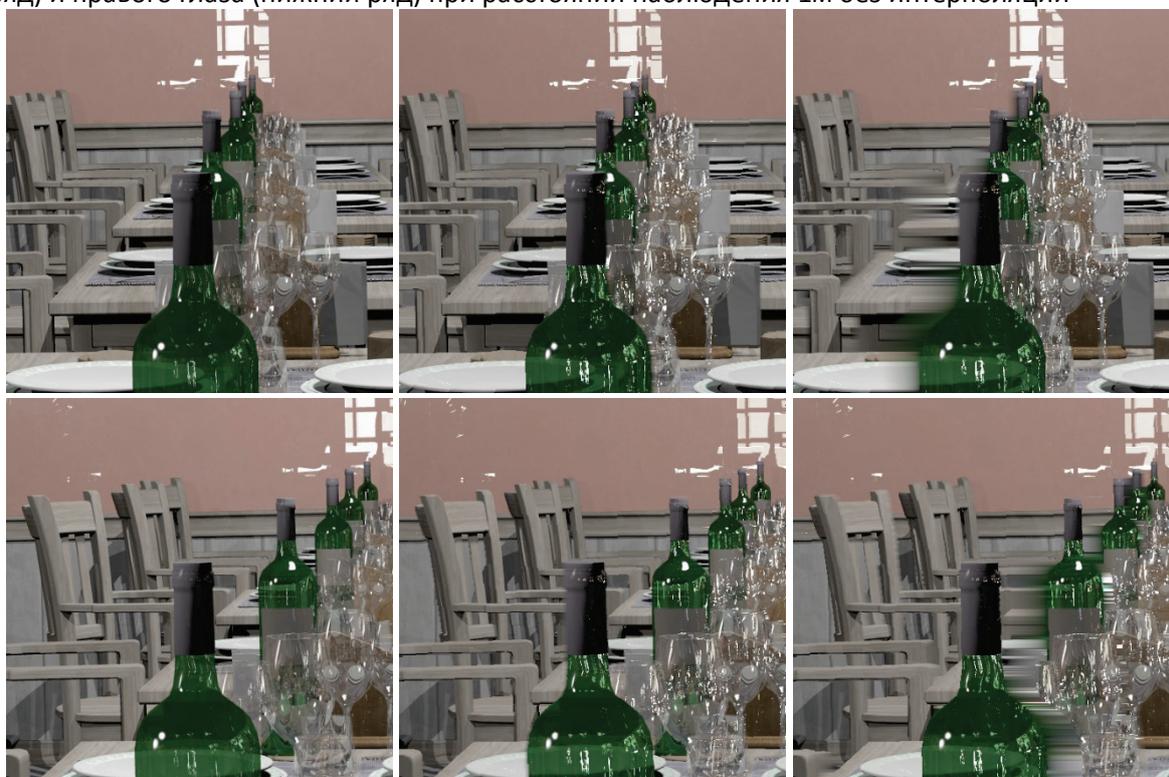


Рисунок 12 – Сравнение эталонных результатов (левая колонка) с результатами, полученными после интерполяции для системы с двумя камерами (средняя колонка) и одной центральной RGB-D камерой (правая колонка) для левого (верхний ряд) и правого глаза (нижний ряд) при расстоянии наблюдения 1м

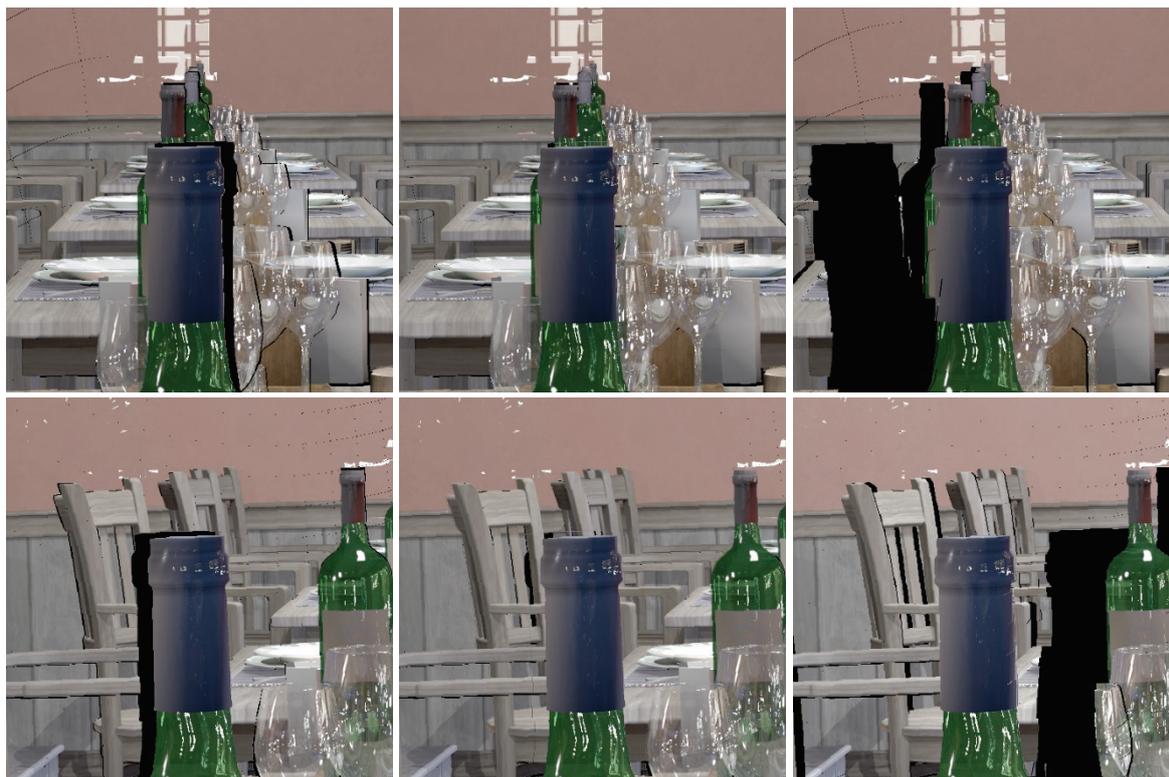


Рисунок 13 – Сравнение результатов, полученных с использованием двух RGB-D камер при использовании данных от соответствующей глазу камеры (левая колонка), от обеих камер (средняя колонка) и одной центральной RGB-D камеры (правая колонка) для левого (верхний ряд) и правого глаза (нижний ряд) при расстоянии наблюдения 0.5м без интерполяции

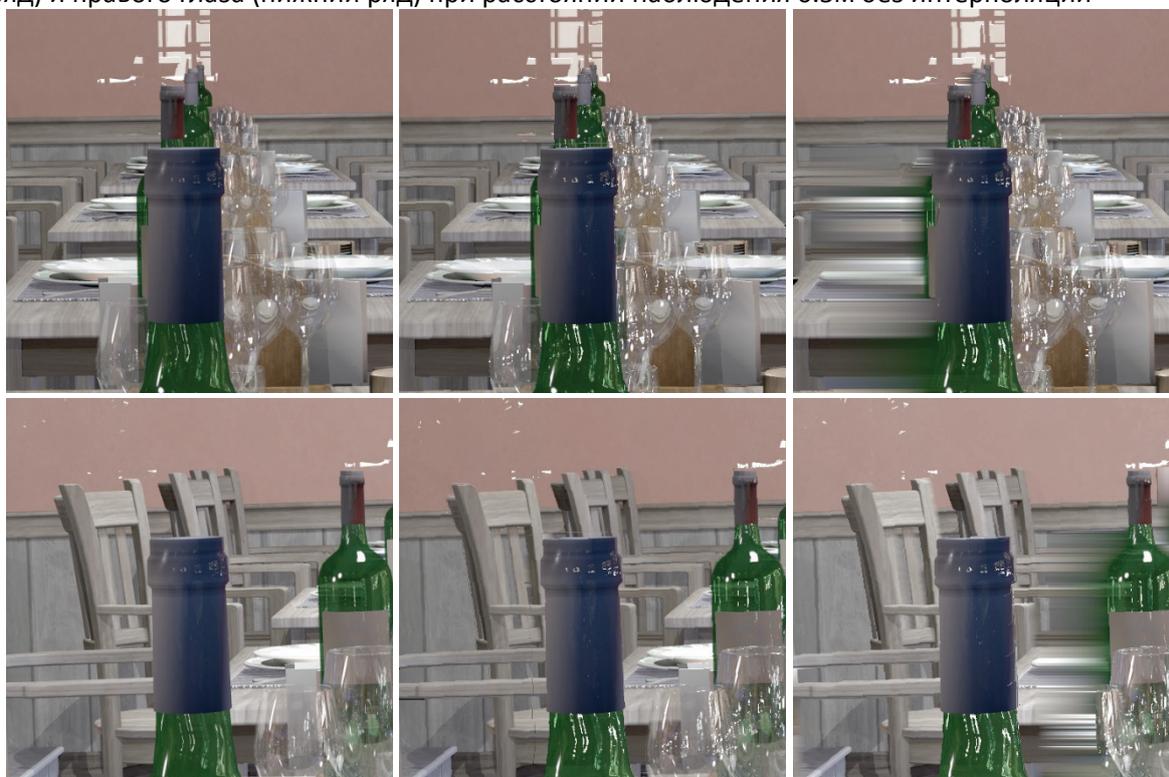


Рисунок 14 – Сравнение эталонных результатов (левая колонка) с результатами, полученными после интерполяции для системы с двумя камерами (средняя колонка) и одной центральной RGB-D камерой (правая колонка) для левого (верхний ряд) и правого глаза (нижний ряд) при расстоянии наблюдения 0.5м

Одиночная RGB-D камера может использоваться только в том случае, если используется более сложный метод построения трехмерной модели реального мира, например, накопление промежуточных данных между кадрами, снятыми при разных положениях пользователя в пространстве. В случае, если система смешанной реальности оснащена более чем одной камерой, то полученное облако точек имеет большую плотность и позволяет корректно восстанавливать изображение для различной конвергенции глаз пользователя и для объектов, находящихся на различном расстоянии от пользователя.

4. Заключение

В результате проведенного исследования была подтверждена возможность восстановления корректных изображений объектов реального мира, соответствующих правильной конвергенции глаз пользователя видео-прозрачной системы смешанной реальности, используя изображения, полученные с фиксированных внешних камер устройства. Артефакты восстановленных изображений сосредоточены в основном на границах объектов. При этом в случае, если устройство смешанной реальности оснащено несколькими внешними камерами, то восстановленное изображение практически не имеет видимых артефактов. Таким образом, предложенные методы обработки изображений позволяют получить четкое изображение, близкое к эталонному. Для получения максимального качества восстановленного изображения фронтальные камеры устройства должны быть расположены на оси наблюдения и как можно ближе к положению глаз пользователя.

5. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 22-11-00145.

6. Список источников

- [1] Microsoft HoloLens | Mixed Reality Technology for Business [Электронный ресурс] / Microsoft Corporation. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/hololens> (дата обращения 18.08.2022).
- [2] Enterprise augmented reality (AR) platform designed for business | Magic Leap [Электронный ресурс] / Magic Leap Inc. URL: <https://www.magicleap.com> (дата обращения 18.08.2022).
- [3] HP Windows Mixed Reality Headset | HP® New Zealand Leap [Электронный ресурс] / Hewlett-Packard Company. URL: <https://www.hp.com/nz-en/campaigns/mixedrealityheadset/overview.html> (дата обращения 18.08.2022).
- [4] Microsoft Virtual Reality – Experiences and Devices [Электронный ресурс] / Microsoft Corporation. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/mixed-reality/windows-mixed-reality> (дата обращения 18.08.2022).
- [5] Analysis of a head-mounted display-type multifocus display system using a laser scanning method / D.W. Kim [и др.] // *Optical Engineering*. 2011. Т. 50. №. 3. С. 034006.
- [6] Lanman D., Luebke D. Near-eye light field displays // *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. 2013. Т. 32. №. 6. С. 1-10.
- [7] Content-adaptive parallax barriers: optimizing dual-layer 3D displays using low-rank light field factorization / D. Lanman [и др.] // *ACM SIGGRAPH Asia 2010 papers*. 2010. С. 1-10.
- [8] Pinlight displays: wide field of view augmented reality eyeglasses using defocused point light sources / A. Maimone [и др.] // *ACM SIGGRAPH 2014 emerging technologies*. 2014. С. 1-1.
- [9] A stereo display prototype with multiple focal distances / K. Akeley, S.J. Watt, A.R. Girshick, M.S. Banks // *ACM transactions on graphics (TOG)*. 2004. Т. 23. №. 3. С. 804-813.
- [10] High-speed switchable lens enables the development of a volumetric stereoscopic display / G.D. Love [и др.] // *Optics express*. 2009. Т. 17. №. 18. С. 15716-15725.

- [11] Maimone A., Georgiou A., Kollin J. S. Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality // *ACM Transactions on Graphics (Tog)*. 2017. Т. 36. №. 4. С. 1-16.
- [12] An application of the virtual prototyping approach to design of VR, AR, and MR devices free from the vergence-accommodation conflict / I.S. Potemin [и др.] // *Computational Optics II*. SPIE, 2018. Т. 10694. С. 19-27.
- [13] Stereo matching using convolution neural network and LIDAR support point grid / S. Bykovskii [и др.] // *Optoelectronic Imaging and Multimedia Technology VI*, 2019. Т. 11187. С. 339-345.
- [14] Amazon Lumberyard Bistro, Open Research Content Archive (ORCA) [Электронный ресурс] // Amazon Lumberyard. URL: <https://developer.nvidia.com/orca/amazon-lumberyard-bistro> (дата обращения 18.08.2022).