

Использование методов виртуального прототипирования при разработке устройств виртуальной реальности, не подверженных проблеме конфликта вергенции и аккомодации зрения

А.Д. Жданов¹, Д.Д. Жданов¹, Н.Н. Богданов¹, И.С. Потемин¹, В.А. Галактионов², И.Л. Лившиц¹
andrew.gtx@gmail.com|ddzhdanov@mail.ru|nnbogdanov@corp.ifmo.ru|ipotemin@yandex.ru|vlgal@ginkeldysh.ru|ecent
er-optical0@yandex.ru

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, Москва, Россия.

Одной из основных проблем при проектировании систем виртуальной (VR), дополненной (AR) и смешанной (MR) реальностей является оценка зрительного восприятия результата, в частности дискомфорт, вызванный несоответствием вергенции и аккомодации зрения пользователя данного устройства. Для оценки дискомфорта зрительного восприятия стандартные оптические характеристики, такие как аберрации, функция контраста и другие, не применимы. С другой стороны, дискомфорт может быть оценен на реальном прототипе, однако его изготовление может оказаться трудоемким. Авторы данной работы разработали методы виртуального прототипирования визуальных оптических систем, которые могут быть использованы при проектировании AR, VR и MR устройств для анализа дискомфорта, в том числе вызванного рассогласованием вергенции и аккомодации зрения.

Ключевые слова: виртуальное прототипирование, конфликт вергенции и аккомодации, виртуальная реальность, дополненная реальность, смешанная реальность, отслеживание зрачка, оптическое проектирование, обработка изображений.

A virtual prototyping approach in designing the vergence-accommodation conflict-free VR devices

A.D. Zhdanov¹, D.D. Zhdanov¹, N.N. Bogdanov¹, I.S. Potemin¹, V.A. Galaktionov², I.L. Livshic¹
andrew.gtx@gmail.com|ddzhdanov@mail.ru|nnbogdanov@corp.ifmo.ru|ipotemin@yandex.ru|vlgal@ginkeldysh.ru|ecent
er-optical0@yandex.ru

¹ITMO University, St. Petersburg, Russia

² Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia.

One of the main problems in the design of AR, VR and MR devices is an estimation of the visual perception of the design result by its end user, and in particular the discomfort caused by disagreement between the vergence and accommodation of the user eyes. Base optical characteristics like aberrations, contrast functions, etc. are not applicable for estimation of this discomfort. On the other hand, the discomfort can be estimated with the real prototype of such device, however creating the real prototype might be costly. Authors propose the virtual prototyping method for visual optical systems, that can be used as an element of design of AR, VR and MR devices to estimate the visual perception discomfort including the vergence-accommodation conflict at each design step.

Keywords: virtual prototyping, vergence-accommodation conflict, virtual reality, augmented reality, mixed reality, eye tracking, optical design, image processing.

1. Введение

Устройства виртуальной, дополненной и смешанной реальностей нашли широкое применение в различных областях человеческой жизни. Например, они используются в виде нашиваемых индикаторов и очков виртуальной, дополненной и смешанной реальностей, в виде индикаторов на лобовом стекле в автомобильной и авиа-индустрии, в системах тренажеров. При создании тренажеров они используются для создания интуитивно-понятных интерфейсов взаимодействия виртуального и реального миров.

Высококачественная оптика, реализм изображения виртуального мира и высокое разрешение ЖК экранов являются только необходимым условием для предоставления естественного восприятия виртуального мира. Достаточным условием естественного восприятия виртуального изображения является согласованность вергенции и аккомодации зрения наблюдателя. Данная проблема особенно остро встает в стереоскопических системах видео 360 [4, 7]. При съемке видео 360 каждая часть изображения снимается парой со-направленных камер, расположенных друг относительно друга на среднем межцентровом

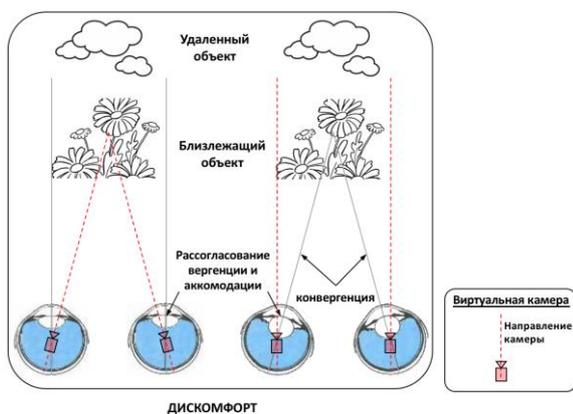
расстоянии глаз человека. Данная схема соответствует наблюдению бесконечно удаленного объекта. При просмотре такого видео, пользователь может комфортно наблюдать объекты, расположенные на удаленном расстоянии, однако при попытке рассмотреть объекты вблизи, изображение начинает двоиться, так как ожидаемой дистанцией наблюдения является бесконечность. Данная проблема не может быть решена в рамках видео 360 и единственным решением на настоящий момент является рекомендация избегать съемки близких объектов.

В системах виртуальной реальности данная проблема может быть частично решена за счет отслеживания положения зрачка пользователя. Когда направление взгляда изменяется, необходимо создать новые изображения для левого и правого глаза, соответствующие новому направлению взгляда. Однако правильная ориентация виртуальных камер, соответствующих левому и правому глазам, не является достаточным условием для естественного восприятия виртуального мира. Необходимо также соответствие аккомодации вергенции зрения [2, 3, 6], поскольку при конвергенции человеческих глаз на объекте происходит фокусировка (аккомодация) на этом объекте. В результате наблюдаемый объект виден четко, а объекты, которые находятся ближе или дальше, размыто. Эффект

размытия зависит от расстояния от плоскости фокусировки зрения до объекта и от размера зрачка.

Чаще всего для синтеза изображения в системах виртуальной реальности используется идеальная камера с бесконечно малым зрачком, что дает полностью четкую картинку. Если система виртуальной реальности позволяет отследить положения зрачка, то она может синтезировать четкое изображение для объектов в плоскости фокусировки и размытое для удаленных от нее.

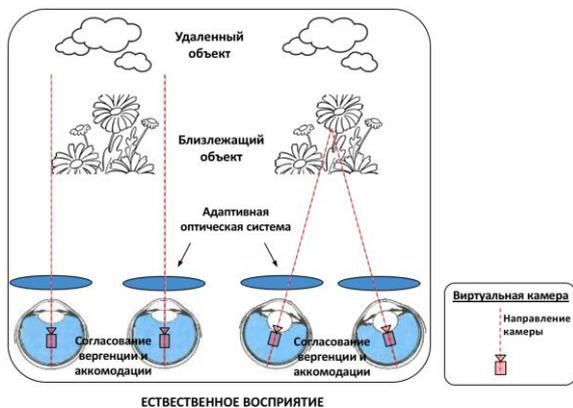
С другой стороны, для того, чтобы пользователь мог корректно сфокусировать зрение на объектах виртуальной сцены, необходимо произвести диоптрическую коррекцию проекционной оптики системы виртуальной реальности, то есть согласовать ее с реальной аккомодацией глаза. В таком случае объекты, на которые он смотрит, будут видны четко. Однако и остальные объекты будут видны четко, что приведет к дискомфорту. Рисунок 1 иллюстрирует данный эффект.



- Конвергенция глаз соответствует ожидаемому положению объекта
- Аккомодация глаз соответствует расстоянию до стереопары изображений

Рис. 1. Эффект конфликта вергенции и аккомодации зрения.

С другой стороны, отсутствие диоптрической коррекции приведет к размытию всего изображения целиком, что также вызовет дискомфорт. Таким образом, задача проектирования системы виртуальной, дополненной или смешанной реальности требует одновременно синтеза естественно размытого изображения (в соответствии с аккомодацией глаз) с диоптрической коррекцией проекционной оптической системы. На рисунке 2 показано условие формирования естественного восприятия виртуального мира без конфликта вергенции и аккомодации зрения.



- Оптическая система адаптируется к ожидаемому расстоянию до объекта в реальном времени

Рис. 2. Учет вергенции и аккомодации зрения при синтезе изображений для левого и правого глаз.

В настоящее время существует несколько методов для решения проблемы соответствия аккомодации и вергенции [3, 5]. В основном они базируются или на синтезе правильно-размытого изображения с изменяемым фокусным расстоянием оптической системы, или на преобразовании плоского изображения ЖК экрана в псевдотрехмерное, соответствующее глубинам сцены.

В случае использования адаптивной панкратической системы, система синтеза изображения должна моделировать эффект дефокусировки, вызванный естественной аккомодацией зрения. Данный эффект является aberrацией первого порядка и может легко моделироваться современными системами компьютерной графики. Однако для естественного восприятия дефокусированного изображения панкратическая система должна фокусироваться на плоскости в виртуальной сцене или, другими словами, адаптироваться к данным, полученным от системы отслеживания положения зрачков пользователя. Таким образом изменение направления взгляда пользователя будет приводить к синтезу правильно дефокусированного изображения совместно с адаптацией фокусного расстояния, что в сумме приведет к естественному восприятию изображения. К сожалению, задача проектирования адаптивной панкратической системы технически сложна и на настоящий момент еще не решена.

2. Построение изображения

Изображение, отображаемое на ЖК экранах системы виртуальной реальности, должно быть согласовано, во-первых, с оптической системой проецирования изображения на зрачок глаза и, во-вторых, с условиями наблюдения, то есть вергенцией и аккомодацией зрения, то есть того, на что смотрит пользователь. Естественно, что оптическая система проецирования изображения не может быть безабберационной по причине наложенных на нее жестких ограничений, таких как широкий угол зрения и малый физический размер. К счастью, размер зрачка глаза существенно меньше, чем область формирования изображения оптической системы, и, следовательно, aberrации будут ограничены главным образом дисторсией изображения. Современные системы синтеза изображений могут учитывать дисторсию, и, соответственно, строить изображение с обратной дисторсией, делая данный эффект невидимым пользователю. Остается проблема несоответствия между вергенцией и аккомодацией зрения. Современные системы виртуальной реальности отслеживают положение зрачков и могут определить направление взгляда пользователя. На основе этой информации можно вычислить точку сцены, на которую направлен взгляд. В случае систем виртуальной реальности можно также точно определить объект, на который именно направлен взгляд.

С помощью современных систем синтеза изображений можно построить изображения для левого и правого глаз, используя направления взгляда при задании камер. Однако остается проблема аккомодации. Когда глаз фокусируется на каком-либо объекте, то другие объекты, находящиеся вне плоскости фокусировки, размываются. Данный эффект корректной фокусировки (и дефокусировки) может быть достигнут двумя методами.

Первый – это преобразование плоского изображения, отображенного на ЖК экране в псевдотрехмерное: в зависимости от расстояний до объектов, соответствующих точкам экрана, пространственный модулятор света может задать фазовое запаздывание отдельных пикселей ЖК матрицы, тем самым преобразуя 2-мерное изображение в 2.5-мерное [5]. От системы синтеза изображений данный

подход требует только вычисления карты глубин, что не является технической проблемой.

Другой метод – это синтез 2-мерного изображения с дефокусировкой, соответствующей естественному восприятию глаза. В данном случае дефокусировка будет основной среди всех возможных аберраций глаза. В случае дефокусировки, функцией рассеивания точки будет цилиндр, чей радиус зависит от фокусного расстояния оптической системы, размера зрачка и смещения от плоскости фокусировки. Учитывая, что фокусное расстояние и размер зрачка постоянны для всей сцены, в результате радиус зависит только от смещения от объекта до плоскости фокусировки. Таким образом, синтезировав картинку «идеальной» точечной камеры с картой глубин, достаточно отфильтровать ее данной цилиндрической функцией.

Использование этого метода должно базироваться на физической корректности вычислений. Во-первых, требуется сформировать карту расстояний до объектов, а не до первых видимых объектов. Например, если какой-либо объект виден отраженным в зеркале, дефокусировка должна быть применена к этому объекту, а не к зеркалу. Во-вторых, может возникнуть проблема неестественного размытия общей границы объектов, находящихся на разном расстоянии от наблюдателя: поскольку при синтезе изображений используется «идеальная» камера с бесконечно малым размером зрачка, то размытие границы может выглядеть неестественным образом.

Целью исследования был анализ и оценка возможного несоответствия между аккомодацией и вергенцией зрения в системах виртуальной, дополненной и смешанной реальностей. По этой причине для синтеза изображений были использованы методы синтеза физически корректных изображений, отличные от тех, которые используются в системах виртуальной реальности. Эти методы основаны на физически точном расчете переноса светового излучения, использованные в программном продукте Lumicert [8]. Они позволяют синтезировать как реалистичные изображения сцены, видимые левым и правым глазами, так и то, что пользователь увидит при использовании различных устройств виртуальной, дополненной или смешанной реальности [1]. Сравнивая полученные изображения, можно оценить возможный дискомфорт визуального восприятия.

3. Модель конфликта вергенции и аккомодации зрения

Целью данной работы была разработка быстрого и точного метода прототипирования различных подходов, нацеленных на избавление от эффекта конфликта вергенции и аккомодации зрения. На настоящий момент существует три основных подхода к отображению объектов виртуального мира, это виртуальная (VR), дополненная (AR) и смешанная (MR) реальности. Каждый из этих подходов имеет свои особенности, которые должны быть учтены при решении задач снижения дискомфорта восприятия пользователем виртуального мира. В случае виртуальной реальности, весь видимый пользователем мир виртуален, и он видит только объекты, созданные системой отображения. Следовательно, если система снабжена устройством отслеживания положения глаз, то можно синтезировать изображение, корректно учитывающее все эффекты, в том числе и то, как решается проблема конфликта вергенции и аккомодации зрения оптической системой. В случае смешанной реальности проблема становится сложнее, так как в ней существует два мира: реальный и виртуальный. Система синтеза изображений имеет полную информацию о виртуальном мире, но при этом только частичную о реальном, что, в свою очередь, не

позволяет вычислить точку конвергенции в реальном мире по причине возможного отсутствия информации о ней. Это может привести к дополнительному дискомфорту восприятия. Системы дополненной реальности являются частным случаем систем смешанной реальности. Более того, в большинстве случаев они не являются стереоскопическими и, следовательно, не подвержены эффекту конфликта вергенции и аккомодации зрения.

Учитывая проблемы и сложность прототипирования систем виртуальной, дополненной и смешанной реальностей, авторы предлагают специально разработанную для данной цели систему виртуального прототипирования. Система состоит из шести основных компонент, а именно:

- виртуальный прототип глаза (как изображение формируется на сетчатке глаза);
 - виртуальный прототип оптической системы, проецирующей изображение с ЖК экрана на зрачок глаза;
 - виртуальный прототип реального мира (актуально только для систем дополненной и смешанной реальности), соответствующий изображению наблюдаемого реального мира, формируемому на сетчатке глаза;
 - виртуальный прототип оптической системы между пользователем и реальным миром (актуально только для систем дополненной и смешанной реальности, например, очки);
 - виртуальный прототип виртуального мира, соответствующий изображению виртуального мира, формируемого на сетчатке пользователя, если бы он наблюдал его как реальный;
 - виртуальный прототип системы синтеза изображений, отображаемых на ЖК экране.
- В результате решаемая задача сводится к:
- созданию виртуального устройства виртуальной, дополненной или смешанной реальности, состоящего из перечисленных выше компонент;
 - созданию реального (ожидаемого) изображения сцены (реального или виртуального мира), формируемого на сетчатке глаза (данное изображение не будет иметь конфликта вергенции и аккомодации зрения);
 - построению изображения, отображаемого на ЖК экранах системы виртуальной, дополненной или смешанной реальности при тех же условиях наблюдения и проецированию их через оптическую систему на сетчатку глаза;
 - сравнению полученных изображений (первое будет свободно от конфликта вергенции и аккомодации зрения, тогда как второе будет тем, что пользователь реально увидит через проектируемую систему).

В данной статье приведены результаты виртуального прототипирования системы виртуальной реальности как подверженной конфликту вергенции и аккомодации зрения, так и избавленной от нее. Был проанализирован источник возникновения конфликта и предложен метод его исключения за счет использования проекционной системы с переменным фокусным расстоянием. Таким образом, изображения для левого и правого глаз строятся в соответствии с конвергенцией глаз пользователя и фокусное расстояние оптической системы адаптируется к той же конвергенции, полностью исключая конфликт.

4. Результаты моделирования

Для анализа возможного дискомфорта использования системы ВР по причине несоответствия вергенции и аккомодации зрения была создана простая сцена виртуального мира, представленная на рисунке 3. Сцена построена таким образом, что пользователь видит серию находящихся на полу объектов, расположенных на различном расстоянии от него и попадающих в угол зрения

в 10°. Расстояние до ближайшего объекта 0.5 метра, а до дальнего 32 метра. В результате возможное несоответствие между вергенцией и аккомодацией будет велико, что может вызвать существенный дискомфорт у наблюдателя.

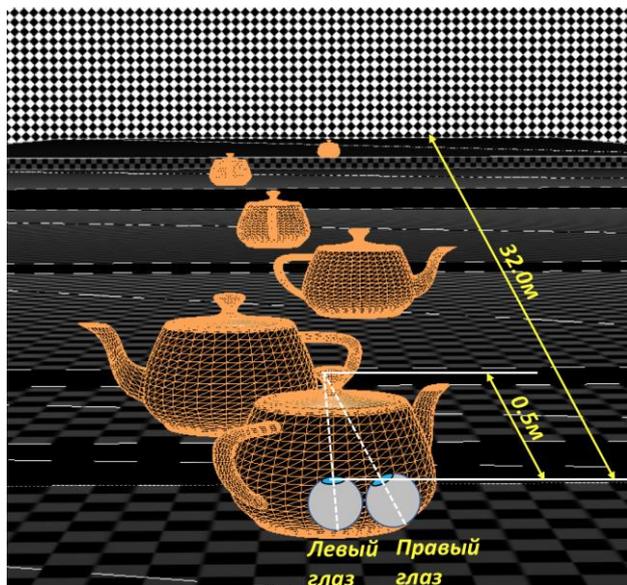


Рис. 3. Сцена виртуального мира.

Было использовано две модели наблюдения сцены. Первая – это модель зрения человека. Изображение, видимое каждым глазом по отдельности, синтезировалось с учетом вергенции и аккомодации глаза. Для построения изображения, формируемого на сетчатке глаза, была использована система фотореалистичной визуализации [7, 8].

Во второй модели строилось изображение, видимое каждым глазом по отдельности, но через систему виртуальной реальности, отображающую ту же самую сцену. На рисунке 4 представлены две модели устройств виртуальной реальности (схема для одного глаза), рассмотренные в рамках данного исследования:

- Первая модель представляет собой идеальную линзу, строящую безаберрационное изображение. Данная модель использовалась как эталон при проектировании более сложных систем. В описываемой модели ЖК матрица и линза смещаются в зависимости от точки наблюдения, тем самым изменяя расстояния фокусировки.
- Вторая модель представляет собой специально спроектированный окуляр системы виртуальной реальности. Он предоставляет высокое качество изображения в угле зрения в 10° и может также считаться безаберрационным.

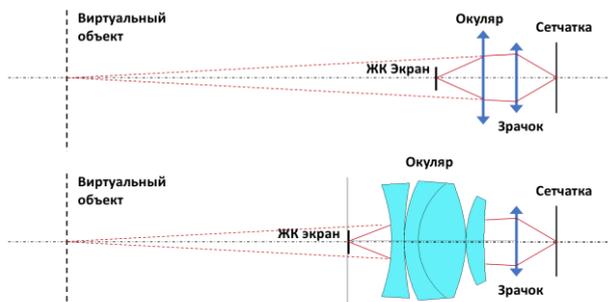


Рис. 4. Модели систем виртуальной реальности.

На рисунке 5 представлены результаты синтеза видимого изображения для его левого и правого глаза при

условии естественного наблюдения пользователем данной сцены. В верхней части показано изображение, смоделированное для поля зрения 40°, а в нижней – центральная область поля зрения 10°. Глаза при этом аккомодировались и конвергировались на расстояние в 565мм. Хорошо видно, что в точке фокусировки картинка четкая, тогда как вне фокуса она размыта.

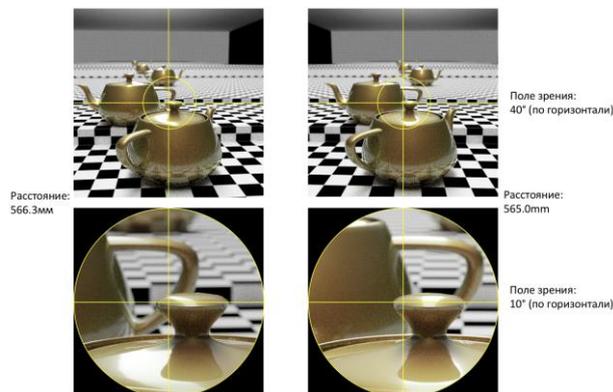


Рис. 5. Реальное наблюдение виртуальной сцены.

На рисунке 6 представлены результаты синтеза изображения сцены, наблюдаемого через систему виртуальной реальности, отслеживающей положение зрачка и, соответственно, строящей изображения для левого глаза с учетом конвергенции зрения. На данных изображениях хорошо прослеживается возникновение эффекта рассогласования вергенции и аккомодации глаз. В обоих представленных на рисунке случаях система рендеринга создает изображение с помощью модели камеры-обскуры. Также в обоих случаях положение ЖК-дисплея, размещенного в фокусе окуляра, не изменяется. В первом случае глаза наблюдателя аккомодировались к бесконечности. В результате все объекты в фокусе, что очевидно приводит к рассогласованию вергенции - аккомодации. Во втором случае глаза наблюдателя аккомодировались к конечному расстоянию наблюдения, равному 565мм, что приводит к расфокусировке изображения по причине неподвижности ЖК-дисплея. Таким образом, в обоих приведенных случаях мы наблюдаем рассогласование вергенции - аккомодации.

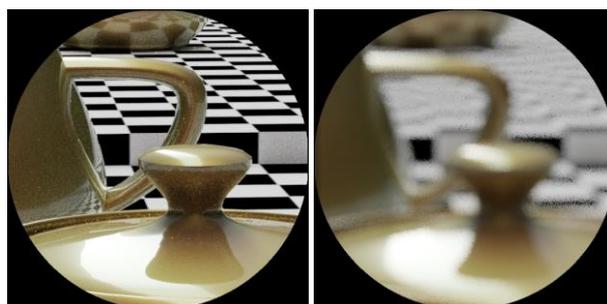


Рис. 6. Моделирование изображений виртуальной сцены наблюдаемой левым глазом через оптическую систему виртуальной реальности. ЖК экран расположен в фокусе окуляра. Слева: глаз сфокусирован на бесконечность. Справа: глаз сфокусирован на конечное расстояние 565мм.

Для исключения рассогласования вергенции и аккомодации требуется строить изображения для естественного значения аккомодации (в данном случае 565мм) одновременно с изменением параметров оптической системы формирования изображения (фокусного

расстояния оптической системы и расстояния до ЖК экрана). На рисунке 7 представлен результат синтеза изображения сцены, наблюдаемый в системе виртуальной реальности при условии, что изображение, сформированное на ЖК экране, фокусное расстояние оптической системы и расстояние до ЖК экрана выставлены для соблюдения условий естественного восприятия. Видно, что эффект конфликта вергенции и аккомодации зрения отсутствует.

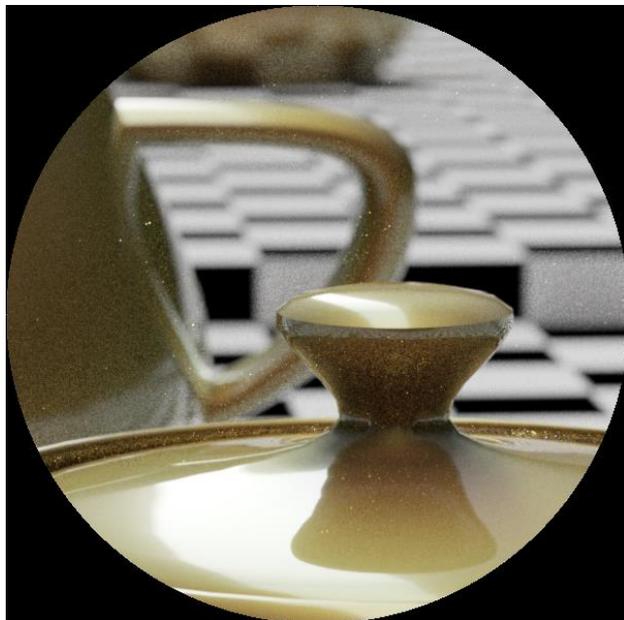


Рис. 7. Наблюдение виртуальной сцены левым глазом через систему виртуальной реальности. Фокусное расстояние оптической системы и расстояние до ЖК экрана скорректированы. Глаз сфокусирован на расстоянии в 565мм.

5. Заключение

В работе был представлен метод использования виртуального прототипирования для проектирования систем виртуальной, дополненной и смешанной реальности. Данный метод позволяет как выявить и оценить конфликт вергенции и аккомодации, так и разработать устройство, не подверженное рассматриваемому эффекту. Был представлен пример схемы устройства, не подверженного эффекту конфликта вергенции и аккомодации зрения. Дальнейшие исследования будут направлены на методы количественного анализа присутствия конфликта вергенции и аккомодации в виртуальной, дополненной и смешанной реальности.

6. Благодарности

Данная работа была частично профинансирована грантами РФФИ № 16-01-00552 и 18-08-01484.

7. Литература

- [1] Жданов Д.Д., Галактионов В.А., Волобой А.Г., Жданов А.Д., Гарбуль А.А., Потемин И.С., Соколов В.Г., “Методы фотореалистичной визуализации изображений, формируемых оптическими системами дополненной реальности”, Программирование, 2018, №4.
- [2] Konrad R., Cooper E.A., Wetzstein G., “Novel Optical Configurations for Virtual Reality: Evaluating User Preference and Performance with Focus-tunable and Monovision Near-eye Displays” ACM CHI, 2016.

- [3] Kramida G., “Resolving the Vergence-Accommodation Conflict in Head-Mounted Displays” IEEE TVCG 22, 7, pp. 1912–1931, 2016.
- [4] LaValle S.M., “VIRTUAL REALITY” University of Illinois, Cambridge University Press, 2017.
- [5] Matsuda N., Fix A., Lanman D., “Focal Surface Displays” ACM Trans. Graph. 36, 4, Article 86, July 2017.
- [6] Peli E., “Optometric and perceptual issues with head-mounted displays. In Visual Instrumentation” Optical Design and Principles, P. Mouroulis (Ed.). McGraw-Hill, pp. 205-275, 1999.
- [7] Wetzstein G., “A personalized VR/AR system that adapts to the user is crucial to deliver the best possible experience” The BRIDGE, Vol. 46, No. 4, Winter 2016.
- [8] “Lumicept – Hybrid Light Simulation Software,” Integra Inc., 2018, <<http://www.integra.jp/en/products/lumicept>>.

Об авторах

Жданов Дмитрий Дмитриевич, к.ф.-м.н., заведующий кафедрой технологий визуализации Университета ИТМО. Его e-mail ddzhdanov@mail.ru.

Потемин Игорь Станиславович, к.т.н., доцент кафедры технологий визуализации Университета ИТМО. Его e-mail ipotemin@yandex.ru.

Богданов Николай Николаевич, аспирант кафедры технологий визуализации Университета ИТМО. Его e-mail nbogdanov@corp.ifmo.ru.

Жданов Андрей Дмитриевич, аспирант кафедры технологий визуализации Университета ИТМО. Его e-mail adzhdanov@corp.ifmo.ru.

Галактионов Владимир Александрович, профессор, доктор физ.-мат. наук, заведующий отделом компьютерной графики и вычислительной оптики ИПМ им. М.В.Келдыша РАН. Его e-mail vlgal@ginkeldysh.ru.

Лившиц Ирина Леонидовна, старший научный сотрудник, к.т.н., Заведующий научно-технической лабораторией автоматизированного проектирования оптико-информационных и энергосберегающих систем Университета ИТМО. Ее e-mail ecenter-optica10@yandex.ru.