

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Амурский государственный университет»

*На правах рукописи*



**Федцов Алексей Владимирович**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАЛЛАКСА СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ВИРТУАЛЬНОЙ И ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ**

09.06.01 – Информатика и вычислительная техника  
Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Научный доклад об основных результатах подготовленной научно-  
квалификационной работы (диссертации)

Благовещенск – 2023

Работа выполнена на кафедре «Информационные и управляющие системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Амурский государственный университет».

Научный руководитель: Еремин Илья Евгеньевич, доктор технических наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем, ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет», г. Благовещенск

Рецензент: Щербань Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, Начальник отдела информатики и вычислительных технологий ГАУЗ АО «Благовещенская ГКБ», г. Благовещенск

Рецензент: Самохвалова Светлана Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет», г. Благовещенск

К защите допускаю:

Научный \_\_\_\_\_ Еремин И.Е.  
Руководитель

Заведующий выпускающей \_\_\_\_\_ Бушманов А.В.  
кафедрой

Заведующий отделом \_\_\_\_\_ Сизова Е.В.  
докторантуры и аспирантуры

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Компьютерное зрение является актуальной и быстро развивающейся областью искусственного интеллекта. Оно находит применение в различных сферах, таких как автономные транспортные средства, медицина, робототехника, системы безопасности и многих других.

С развитием технологий и появлением новых алгоритмов, компьютерное зрение становится все более точным и эффективным. Например, алгоритмы глубокого обучения позволяют машинам "понимать" изображения и видео на уровне, сравнимом с человеческим. Одним из направлений развития компьютерного зрения является стереозрение. Его развитие способствует созданию автономных роботов и систем, способных воспринимать и анализировать окружающую среду аналогично тому, как это делают люди.

Стереозрение позволяет определять расстояние до объектов, их форму и размеры, а также отслеживать движение объектов в трехмерном пространстве.

Так же, важной сферой, связанной с компьютерным стереозрением, является виртуальная реальность. Использование последних достижений в этих областях позволяет решать задачи точной диагностики в медицине, отрисовки реалистичных сцен для гарнитур виртуальной реальности. Для нового оборудования требуются новые математические модели и численные методы, которые будут эффективно использовать имеющиеся ресурсы, давать более точные и быстрые результаты. Наблюдается рост рынка технологии и количества публикаций/исследований как в целом в отрасли, так и в области моего исследования.

Активно совершенствуется математический аппарат, связанный с компьютерной графикой, вычислительные методы оптимизируются под многоядерные графические ускорители с аппаратными модулями ускорения перекодирования видео, появляются более сложные программные комплексы, позволяющие решать задачи моделирования и точного отображения трехмерных сцен.

**Цель диссертационной работы** заключалась в разработке целостной совокупности математических моделей, численных методов и программных средств, описывающих процесс стереоскопического зрения человека и предоставляющие оптимизированные методы для проведения вычислений на основе модели. Сформулированный для достижения цели список задач, который был решен в ходе работы:

1. Исследовать аспекты работы зрительной системы человека для нахождения способов определения точки фокусировки и направления взгляда и в трехмерном пространстве на основе положений зрачков глаз.

2. Разработать математическую модель, описывающую процесс определения объема объектов трехмерного пространства зрительной системой человека.

3. Разработать численный метод определения направления и точки фокусировки взгляда зрительной системы в трехмерном пространстве.

4. Разработать метод передачи объемного изображения зрительной системе человека через устройства виртуальной реальности, с возможностью калибровки.

5. Разработать приложение для демонстрации результатов, оценить и сравнить результаты с аналогичными системами.

**Новизна научного исследования** заключается в развитии новых математических моделей и численных методов в областях компьютерной графики и компьютерного зрения, позволяющих оптимизировать и повысить производительность вычислений в процессе рендеринга стереоскопического изображения, а так же повысить точность распознавания положения зрачка глаза зрительной системы человека. В ходе практических тестов наработки показали более высокую скорость рендеринга, а так же точность распознавания.

Сформирован оригинальный набор оптимизированных моделей параллакса стереоскопического зрения человека, применимый для процессов стерео-рендеринга и определения направления взгляда.

Предложен оригинальный численный метод рендеринга стереоскопического изображения с оптимизацией для параллельных вычислений, а так же метод распознавания положения зрачка глаза на видеопотоке.

Разработан авторский пакет программ: подключаемая библиотека и приложения-примеры, с помощью которых была протестирована эффективность предложенных моделей и методов: скорость рендеринга VR сцены по результатам тестов оказалась на 31% быстрее стандартного рендера Unity при визуальном одинаковом качестве изображения с учетом наличия заложенных моделью настроек параметров гарнитуры, а точность измерений положения зрачка глаза сравнима с результатами дорогостоящих коммерческих аналогов.

### **Теоретическая и практическая значимость.**

Значимая теоретическая часть работы заключается в дальнейшем использовании набора оптимизированных моделей параллакса стереоскопического зрения человека, применимый для процессов стерео-рендеринга и определения направления взгляда, для развития математических моделей в отрасли компьютерного зрения. Практическая значимость заключается в использовании результатов работы в области медицинской диагностики, а так же в сокращении вычислительных затрат на рендеринг трехмерных сцен.

**Методы и средства решения научных задач.** Решения задач, поставленных в ходе работы, выполнялось с помощью методов компьютерного и математического моделирования. В качестве базовых математических моделей использовались общепринятые модели трехмерных преобразований компьютерной графики, а так же общедоступные модели трехмерного рендеринга, используемые в рендерах для гарнитур виртуальной реальности.

Численные методики для реализации алгоритмов распознавания положения зрачка глаза созданы на основе алгоритмов Каскада Хаара и методов Виолы-Джонса. В качестве среды разработки программного комплекса использовалась Visual Studio, а так же, библиотека прикладных алгоритмов компьютерного зрения OpenCV.

### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Оригинальный набор оптимизированных моделей параллакса стереоскопического зрения человека, применимый для процессов стерео-рендеринга и определения направления взгляда
2. Авторский численный метод рендеринга стереоскопического изображения с

оптимизацией для параллельных вычислений

3. Авторский численный метод распознавания положения зрачка глаза на видеопотоке
4. Специализированный пакет прикладных программ, оптимизированный для многопочных вычислений, представленный в виде подключаемых библиотек для C++ и Unity с примерами использования, демонстрирующим представленные разработки с тестами производительности и точности

**Достоверность и обоснованность результатов.** Надежность и обоснованность результатов подтверждается использованием основных принципов в физико-математических моделях, правильной постановкой задач, прозрачными аргументами, докательства утвержденных ограничений и использованием современных цифровых методов и компьютерных инструментов. Компьютерные алгоритмы и приложения были протестированы на основе сравнения результатов с аналитическими решениями о испытательных заданиях и расчетном анализе (в пограничных случаях). Было также проведено сопоставление между результатами моделей и экспериментальными данными для проверки адекватности моделирования.

**Апробация работы.** Результаты работы были презентованы и обсуждены в перечисленных ниже научных мероприятиях: Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке: сб. ст. по мат. XXXVIII междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: СибАК, 2019; Химия, физика, биология, математика. Теоретические и прикладные исследования: сб. ст. по мат. XXXVII междунар. науч.-практ. конф. – М: Интернаука, 2020.

Проведена апробация результатов работы «Приложения для проведения видеонистагмографии на основе гарнитуры с веб-камерой» с действующим врачом – неврологом на базе Национального медицинский исследовательский центр психиатрии и неврологии имени В. М. Бехтерева, г. Санкт-Петербург. Полученные результаты сравнимы с дорогостоящим сертифицированным коммерческим оборудованием.

Получен патент на исходный код компонента модуля распознавания положения зрачка глаза.

Результаты исследования представлены на всероссийском конгрессе с международным участием «Нейропсихиатрия в трандисциплинарном пространстве: от фундаментальных исследований к клинической практике», проходившей 25 - 26 мая 2023 года

### **Публикации и личный вклад автора.**

Двенадцать работ были опубликованы на основе материалов диссертации, в том числе одна статья в престижном рецензируемом издании, рекомендованном Высшей аттестационной комиссией Российской Федерации, и одна статья в издании, которое цитируется международными базами данных Web of Science и Scopus. Две статьи были опубликованы в региональных изданиях, и восемь докладов были представлены на международных, всероссийских и региональных конференциях. Программное обеспечение для ЭВМ было успешно зарегистрировано и получило свидетельство о государственной регистрации.

Все данные, представленные в диссертации, были собраны и проанализированы автором самостоятельно или в сотрудничестве с другими исследователями. Совместно с научным руководителем автор выбирал направления исследований, формулировал задачи

математического моделирования и анализировал результаты. Самостоятельно автор разрабатывал вычислительные схемы и алгоритмы, реализовывал компьютерные модели и проводил вычислительные эксперименты.

В совместной работе [1] авторский вклад заключается в численной реализации и разработке программного комплекса для проведения диагностики методом видеонистагмографии.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация включает в себя следующие разделы: введение, четыре главы, заключения и библиографический список. Общий объем диссертации составляет 164 страниц, включая:

- Основной текст - 164 стр.
- Рисунки - 23 шт.
- Литературные источники - 72 наименований

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** представлены: разъяснение актуальности выбранной темы исследования и уровень ее изученности, цели и задачи, методологические основы, ключевые тезисы, предлагаемые к защите, научная новизна и прикладная ценность работы. Подчеркнуто, что последовательность изложения материала и взаимосвязь между главами соответствуют этапам проведения комплексного вычислительного эксперимента.

**Первая глава** посвящена теоретическим основам компьютерной графики и стереозрению, математическим моделям и методам численной реализации. Приведены также приложения этих концепций. В главе представлен анализ литературных источников по данной теме, а именно трехмерный рендеринг стереоскопического изображения и процесс распознавания объектов в видеопотоке.

В разделе 1.1 описаны базовые математические модели аффинных преобразований координатных моделей, традиционно используемых в компьютерной графике.

В разделе 1.2 показаны математические модели и численные методы, используемые в современных системах виртуальной реальности и компьютерного зрения.

Так же, описаны основные проблемы в производительности и точности результатов вычислений имеющихся моделей и численных методов, потенциальные способы решения этих проблем и снятия ограничений.

В завершающем разделе первой главы, путем анализа имеющейся информации, составляется перечень вопросов, подлежащих исследованию определяются объект и предмет изучения, общая идея и главная гипотеза диссертации.

**Во второй главе** («Математические модели стереоскопического зрения») приведен ряд концептуальных постановок задач моделирования процесса стерео зрения, работы зрительной системы человека, позволяющих определять расстояние до объектов, их форму и размеры, а также отслеживать движение объектов в трехмерном пространстве. Так же, затронут вопрос доставки отрендеренного стереоизображения зрительной системе человека с учетом индивидуальных параметров зрительной системы через гарнитуры виртуальной реальности с сохранением точности восприятия расстояния и объема объектов в виртуальной сцене.

В разделе 2.1 представлена модель проекции видеокамеры глаза для гарнитуры виртуальной реальности с настройкой индивидуальных параметров.

Уточним термины, которые применяются в процессе имитации визуализации с учетом определенных критериев. Прежде всего, параметры, которые динамично изменяются в процессе рендеринга, включают текущее положение стереокамеры ( $P$ ) в пространстве и вектор вращения датчика наклона ( $R$ ).

Параметры гарнитуры включают смещение датчика её вращения относительно положения стереокамеры по осям  $x$  и  $z$  ( $dP$ ), коэффициент поправки значений вектора вращения ( $k$ ), и размер дисплея гарнитуры ( $S$ ). Исходя из этого, учитывая точки расположения камеры в пространстве, датчика вращения и экранов гарнитуры как лежащие в одной плоскости в соответствии со схемой (рис. 4), значение координаты  $y$  для этих положений будет совпадать и можно пренебречь смещением по оси  $y$  (по вертикали).

Угол поворота относительно центра стереокамеры с учетом смещения стереокамеры в пространстве  $P$  и смещения датчика вращения гарнитуры  $dP$  имеет вид:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -P_x - dP_x \\ 0 & 1 & 0 & -P_y \\ 0 & 0 & 1 & -P_z - dP_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Входные данные:  $R$  (вектор вращения датчика наклона),  $k$  (коэффициент поправки значений вектора вращения)

Для простоты, предположим, что ось  $X$  стереокамеры совпадает с осью  $X$  датчика наклона (хотя в реальной жизни это может быть не так).

Тогда угол поворота стереокамеры по оси  $X$  будет равен:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R_x k & \sin R_x k & 0 \\ 0 & -\sin R_x k & \cos R_x k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Смещение датчика вращения гарнитуры  $dP$  учитывается при вычислении угла поворота камеры левого глаза. Смещение  $e$  по оси  $z$  определяется на основе данных о межзрачковом расстоянии  $m$  и угле обзора камеры.

Преобразование вращения камеры по оси  $y$  происходит на основе данных гироскопа и магнитометра, а по оси  $z$  - на основе датчика вращения и рассчитанного смещения:

$$\begin{pmatrix} X'_l \\ Y'_l \\ Z'_l \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & m/2 + dP_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -e + dP_x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Аналогичное изменение ориентации также происходит с камерой правого глаза. При этом, камера левого глаза поворачивается вокруг оси  $X$  на величину угла  $\alpha$ :

$$\begin{pmatrix} X'_l \\ Y'_l \\ Z'_l \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X'_l \\ Y'_l \\ Z'_l \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Для камеры правого глаза также выполняется аналогичное преобразование. Затем рассчитывается расстояние до плоскости проекции. Поле зрения камеры представляет собой отношение размера экрана к расстоянию до плоскости проекции, выраженное в виде коэффициента:

$$Z_{nl} = f S.$$

Таким образом, при одинаковом значении параметра  $f$  на дисплеях с разными размерами будет отображено одинаковое количество информации. Поскольку мы преобразовали координаты относительно камеры, то  $zk = 0$ , и значение  $f$  становится константой, не зависящей от размера дисплея. Это означает, что отображение объектов на экране будет одинаково, независимо от размера экрана. Проекция камеры левого глаза:



$$\begin{pmatrix} X_l \\ Y_l \\ Z_l \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -fS_x & 0 & 0 & 0 \\ -Z_l' & & & \\ 0 & -fS_y & 0 & 0 \\ & -Z_l' & & \\ 0 & 0 & 1 & -fS_x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X_l' \\ Y_l' \\ Z_l' \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Проекция камеры правого глаза находится аналогично.

И, наконец, финальным преобразованием станет масштабирование полученной проекции под размер дисплея:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/S_x & 0 & 0 \\ 0 & 1/S_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}.$$

В результате применения указанных трансформаций с настройкой персональных параметров зрения человека и гарнитуры, получается стереоскопическое изображение трёхмерного пространства, которое точно воспринимается зрительной системой человека.

В разделе 2.2 представлена модель коррекции измерений гарнитуры для видеонистагмографии с учетом индивидуальных параметров и расположения сенсора камеры.

Для описания модели обозначения, используемые при моделировании преобразования: для камеры:  $CP$  – текущее положение камеры в пространстве,  $CR$  – вектор наклона (вращения) камеры,  $CS$  – область видимости камеры. Для глаза:  $EP$  – положение глаза,  $ER$  – вектор вращения плоскости глаза. Для целевой плоскости:  $TP$  – положение плоскости в пространстве,  $TR$  – вектор вращения целевой плоскости,  $TS$  – области видимости целевой плоскости.

Получена математическая модель, позволяющая на основе метрик гарнитуры выполнить точное перспективное преобразование:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{1}{CPx} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix};$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{CRx} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix};$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{CSx} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Модель позволяет работать с преобразованием в общем виде. Для известных параметров гарнитуры видеонистагмографии модель позволяет получить достоверно точные результаты измерений, не уступающие дорогостоящему коммерческому сертифицированному оборудованию.

В каждом случае подчеркивается необходимость использования численных методов для создания вычислительных схем и алгоритмов с учетом особенностей математических моделей.

**В третьей главе** («Вычислительные схемы и алгоритмы реализации рендеринга стереоскопического изображения») предложен набор численных методов для формирования трехмерного стереоскопического изображения, а так же для процесса распознавания положения зрачка глаза зрительной системы человека.

В разделе 3.1 разработан численный метод рендеринга для VR гарнитур.

Для реализации и отладки численного метода использован инструмент Unity Custom Render Pipeline.

Реализованы функции обработки перспективных преобразований на основе представленной модели.

Используются технологии параллельных вычислений для многоядерных процессоров и GPU.

Разработанные методы встроены в CRP на этапах отбраковки, рендеринга а так же в шейдеры для отрисовки материалов.

На одном из этапов рендеринга, отвечающем за отбраковку вершин трехмерной сцены, численный метод выглядит следующим образом: при разрешения изображения ( $Width * Height$ ), размере ближней плоскости усеченной пирамиды обзора равен ( $W * H$ ), площадь в ближней плоскости, соответствующая одному пикселю в окне, равна  $(W * H) / (Width * Height)$ . Если вершина  $P$  модель проецируется на  $P'$  в ближней плоскости, а ошибка рендеринга находится в пределах  $K$  пикселей), тогда радиус  $R$  ограничивающей сферы в вершине  $P$  можно вычислить по следующему уравнению:

$$R = \sqrt{\frac{K * W * H}{Width * Height}} * \frac{\|OP\|}{\|OP'\|}$$

Учитываем тот факт о линии обзора, что чем дальше модель находится от центральной линии зрения, тем она размытие. Пусть угол между  $OP$  и центральной линией зрения  $OO'$  равен  $\theta$ , и мы предположим, что радиус ограничивающей сферы увеличивается с ростом  $\theta$  как 2-степенная функция, уравнение для расчета радиуса  $R$  выглядит следующим образом:

$$R = \sqrt{\frac{K * W * H}{Width * Height}} * \frac{\|OP\|}{\|OP'\|} * \left(\frac{90^0}{90^0 - \theta}\right)^2$$

В данном случае ускорение вычислений достигается за счет снижения точности для отдаленных объектов сцены.

Для этапов рендеринга, не затрагиваемых моделью, используются шейдеры и численные методы, предоставляемые Unity, что позволяет оптимизировать только нужные этапы вместо полной разработки всего процесса рендеринга.

В секции 3.2 представлен алгоритм численного определения позиции зрачка человека на видеоматериале, полученном с помощью веб камеры.

Для реализации использован пакет математических функций из библиотеки компьютерного зрения OpenCV

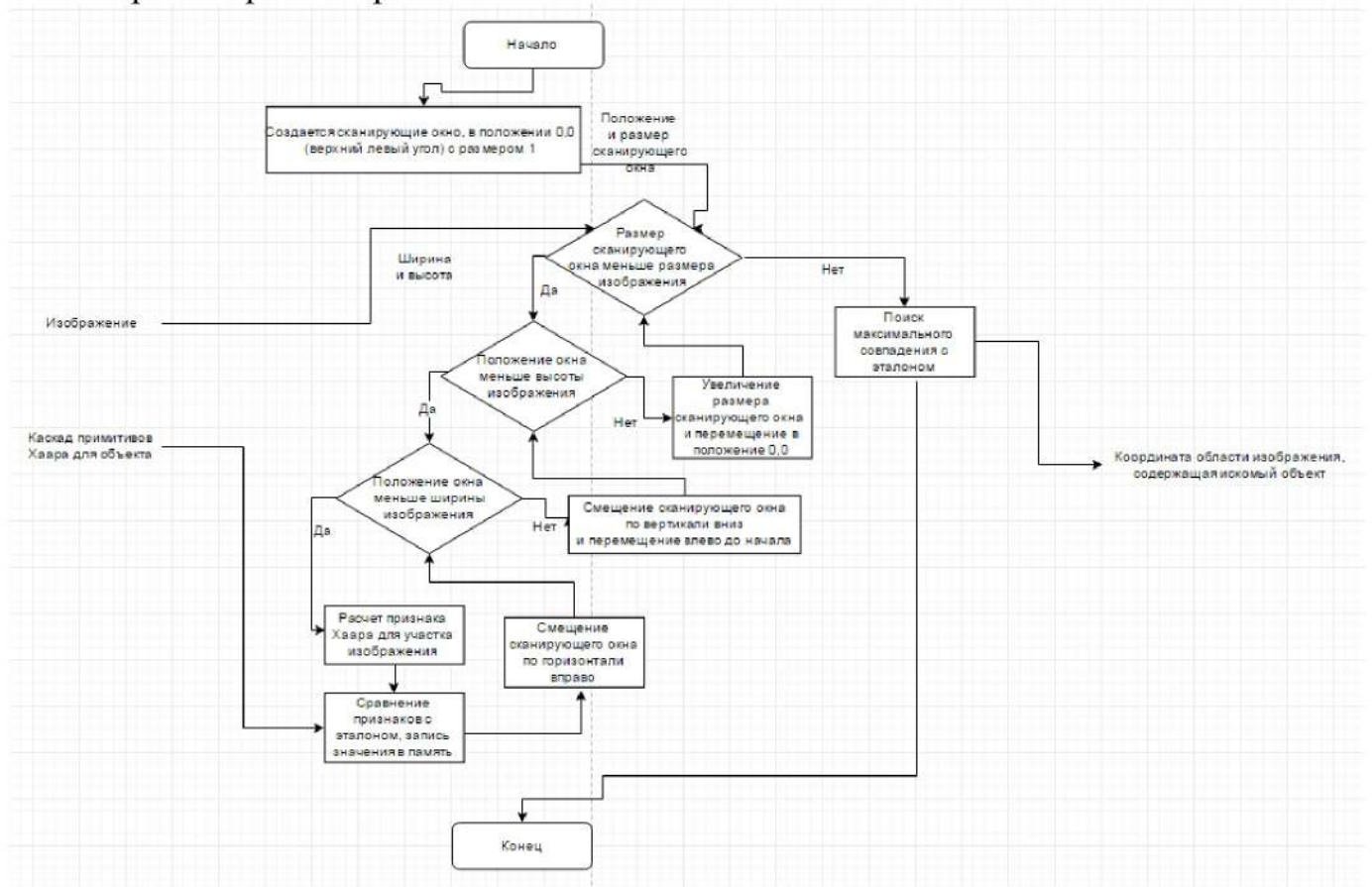


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма каскада Хаара

Обработка изображения проводится в несколько этапов: перспективное преобразование, преобразование из цветного изображения в полутоновое, эквализация, поиск объекта по методу Хаара, адаптивная бинаризация, затем находится центр масс окружности зрачка и вычисляется его смещение в градусах.

В разработанных численных методах используются технологии параллельных вычислений для многоядерных процессоров и GPU.

В четвертой главе («Комплекс программ для проведения диагностики методом видеонистагмографии и библиотека ускоренного рендеринга трёхмерных VR сцен для Unity») представлены запрограммированные результаты разработки математических моделей, численных методов, интерпретация полученных данных:

- Разработаны подключаемые библиотеки для любых приложений на C++ и для среды разработки компьютерных игр Unity
- Основная среда разработки – Visual studio
- При разработке использован пакет математических функций из библиотеки компьютерного зрения OpenCV
- Реализованы демонстрационные примеры: «Высокопроизводительный рендер 3д сцены для гарнитур VR» (Проект для Unity) и «Приложение для проведения видеонистагмографии на основе гарнитуры с веб-камерой» (C++, ОС Windows )
- Исходный код разработанных библиотек и примеров с документацией к API доступен в GitHub, ссылка на репозиторий предоставляется по запросу
- Подготовлена инструкция для использования графического интерфейса программ при проведении исследования методом видеонистагмографии.

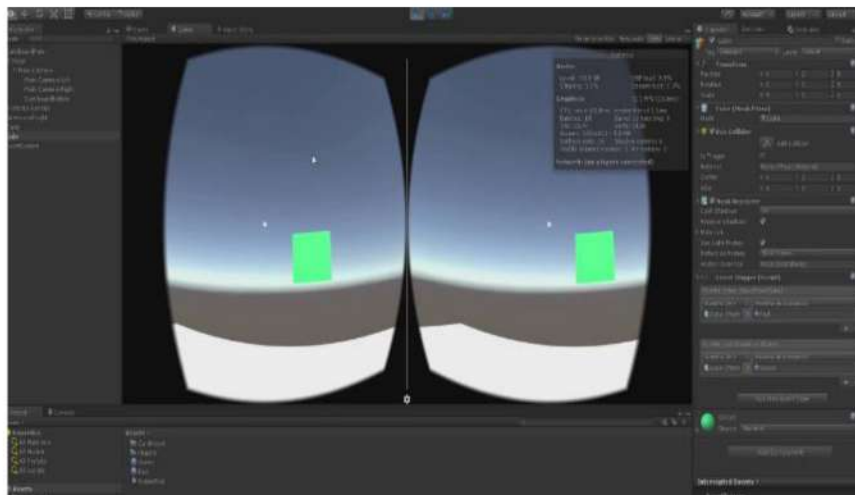


Рисунок 2 – Предпросмотр сцены в среде разработки Unity с использованием высокопроизводительного рендера 3д сцены для гарнитур VR

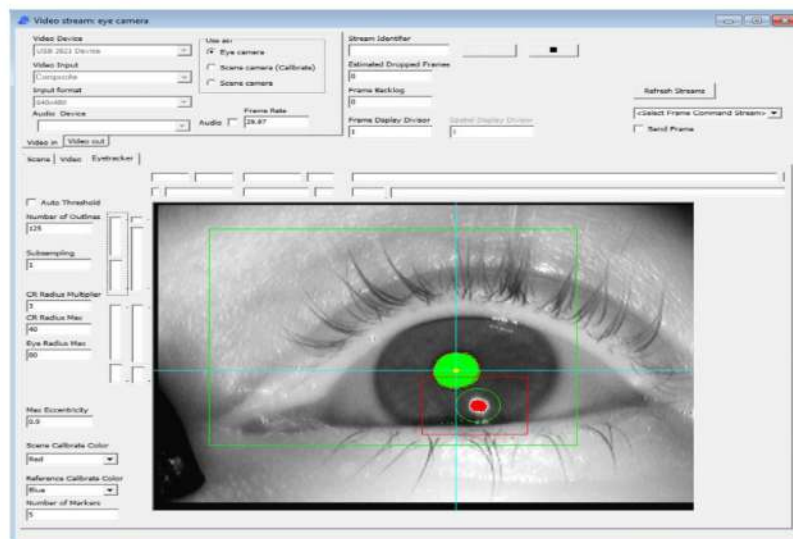


Рисунок 3 – Графический интерфейс приложения для проведения видеонистагмографии на основе гарнитуры с веб-камерой

По результатам тестов после оптимизации есть прирост производительности до 31% при визуально одинаковом качестве изображения

С помощью математической модели и численного метода удалось получить требуемую точность измерений для проведения медицинской диагностики. Исследование

проводилось на 10 здоровых добровольцах с целью получить требуемую точность измерений. Исследование включало в себя 3 основных теста: оценка саккадических движений (обвести взглядом контуры больших предметов), следящий тест (наблюдение за движением объекта на видео), позиционный тест (оценка движений глаз при повороте головы). Результаты измерений были записаны в течение 5 секунд для каждого теста и представлены в виде графиков, рисунок 4.

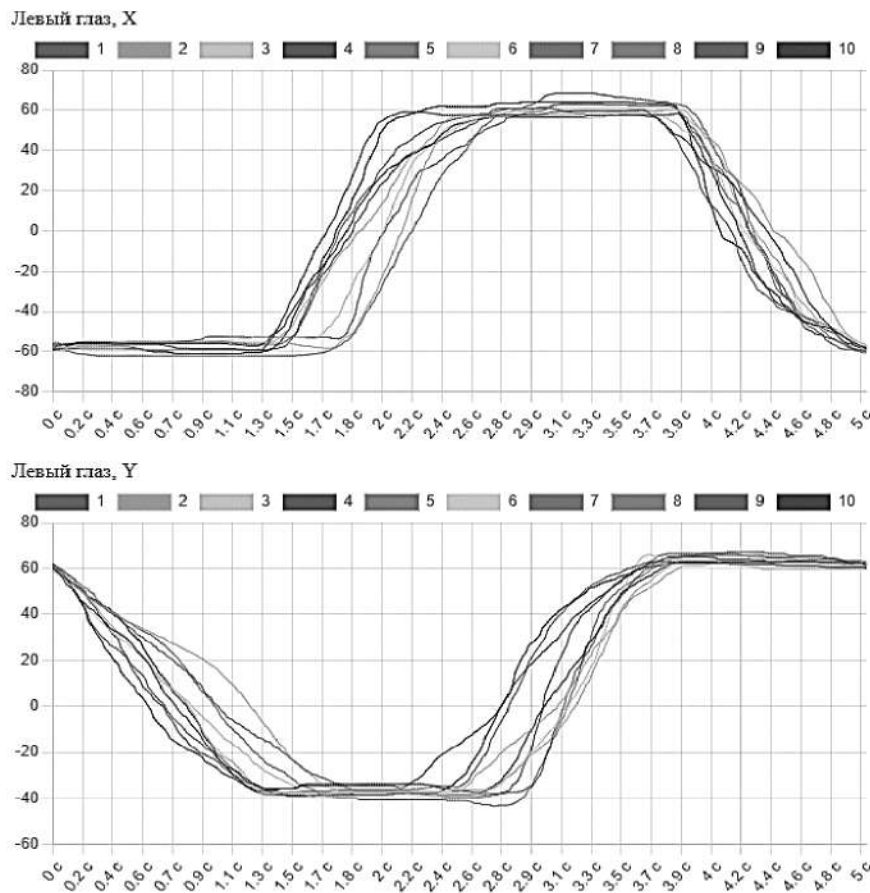


Рис. 4 График измерений положения зрачка глаза для 10 испытуемых, по оси x время эксперимента, по оси y отклонение зрачка глаза от центра до максимума в процентах

Тестирование проводилось на обычной веб-камере, результаты не уступают по точности дорогостоящему коммерческому оборудованию.

В финальной части изложены основные выводы диссертации. В рамках исследований была решена важная научная проблема создания математического, алгоритмического и программного обеспечения для имитации процесса стереоскопического зрения в контексте дополненной и виртуальной реальности. Это включает в себя процесс рендеринга стерео-изображений для гарнитур виртуальной реальности и процесс определения положения зрачка в зрительной системе человека. В диссертации представлены результаты исследований, которые составляют цельный математических моделей. Автором формализованы задачи моделирования и разработаны схемы их решения с использованием эффективных численных методов. Также разработан комплекс программ, выполнены вычисления, осуществлен анализ и интерпретация итогов моделирования.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Сформирован оригинальный набор оптимизированных моделей параллакса стереоскопического зрения человека, применимый для процессов стерео-рендеринга и определения направления взгляда;
2. Предложен оригинальный численный метод рендеринга стереоскопического изображения с оптимизацией для параллельных вычислений, а так же метод распознавания положения зрачка глаза на видеопотоке;
3. Разработан авторский пакет программ: подключаемая библиотека и приложения-примеры, с помощью которых была протестирована эффективность предложенных моделей и методов: скорость рендеринга VR сцены по результатам тестов оказалась на 31% быстрее стандартного рендера Unity при визуальном одинаковом качестве изображения с учетом наличия заложенных моделью настроек параметров гарнитуры, а точность измерений положения зрачка глаза сравнима с результатами дорогостоящих коммерческих аналогов;
4. Проведена апробация результатов работы «Приложения для проведения видеонистагмографии на основе гарнитуры с веб-камерой» с действующим врачом – неврологом на базе Национального медицинский исследовательский центр психиатрии и неврологии имени В. М. Бехтерева, г. Санкт-Петербург. Полученные результаты сравнимы с дорогостоящим сертифицированным коммерческим оборудованием.
5. Получен патент на исходный код компонента модуля распознавания положения зрачка глаза

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи Scopus

1. *Eremin I. E., Fedtsov A. V., Shova N. I., Mikhailov V. A.* Videonystagmography device using commercial web-camera // *Biomed Eng.* – 2023. – № 57. – P. 116–120.  
*Еремин И.Е., Федцов А.В., Шова Н.И., Михайлов В.А.* Устройство для видеонистагмографии с использованием коммерческой веб-камеры // *Медицинская техника.* – 2023. – № 2. – С. 29-31.

### Статьи ВАК

2. *Федцов А.В.* Моделирование передачи стереоизображения через гарнитуры дополненной реальности // *Информатика и системы управления.* – 2020. – № 3(65). – С. 51-61.

### Статьи РИНЦ

3. *Федцов А.В., Семичевская Н.П.* Разработка алгоритма нахождения положения зрачка глаза на лице человека // *Научный журнал «Студенческий».* – 2019. – № 19(63). – Ч I. – С. 78-80.
4. *Федцов А.В.* Реализация параллельного стерео-рендеринга на GPU // *Научный журнал «Интернаука».* – 2021. – № 12(188). – Ч I. – С. 24-27.
5. *Федцов А.В.* Устройство для видеонистагмографии с использованием коммерческой веб-камеры // *Студенческий: электрон. научн. журн.* – 2023. – № 31(243)– С. 83-87.

6. Федцов А.В. Устройство для видеонистагмографии с использованием коммерческой веб-камеры // Интернаука: электрон. научн. журн. – 2023. – № 36(306). – С. 93-97.

#### **Тезисы докладов**

7. Федцов А.В. Разработка программного модуля стабилизации изображения зрачка глаза на лице человека // Молодежь XXI века: шаг в будущее: мат. XVIII регион. науч.-практ. конф. – Благовещенск: БГПУ, 2017. – С. 1057-1058.
8. Федцов А.В., Семичевская Н.П. Моделирование вычислительных процессов для решения задач распознавания положения зрачка глаза человека на видеопотоке с использованием технологии параллельных вычислений // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке: сб. ст. по мат. XXXVIII междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: СибАК, 2019. – № 8(34). – С. 11-15.
9. Федцов А.В. Исследование аспектов формирования объемного изображения в устройствах дополненной реальности и их влияния на точность восприятия объема зрительной системой человека // Химия, физика, биология, математика. Теоретические и прикладные исследования: сб. ст. по мат. XXXVII междунар. науч.-практ. конф. – М: Интернаука, 2020. – № 6(26). – С. 11-15.
10. Федцов А.В. Исследование зависимости точности восприятия объема зрительной системой человека от изменения межзрачкового расстояния в устройствах дополненной реальности // Высокие технологии, наука и образование. Актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. по мат. VII всероссийской науч.-практ. конф. – Пенза: МЦНС Наука и просвещение, 2020. – С. 11-15.
11. Федцов А.В. Калибровка выводимого объемного изображения на устройства дополненной реальности на платформе Unity // Приоритетные направления развития российской науки: сб. ст. по мат. VII всероссийской науч.-практ. конф. – Саратов: ЦПМ Академия бизнеса, 2020. – С. 66-73.
12. Федцов А.В. Шова Н.П. Устройство для видеонистагмографии с использованием коммерческой веб-камеры // Всероссийский конгресс с международным участием «Нейропсихиатрия в трансдисциплинарном пространстве: от фундаментальных исследований к клинической практике», ФГБУ НМИЦ ПН им. В.М. Бехтерева – 2023