

На правах рукописи



Зубов Андрей Александрович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ В ЗАДАЧАХ БИОМЕХАНИКИ**

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА 2019

Работа выполнена на кафедре информационно-измерительных систем Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК)

Научный руководитель: **Елкин Евгений Александрович**, кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Шандаров Станислав Михайлович**, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра «Электронные приборы» ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», заведующий кафедрой

Мейтин Валерий Аркадьевич, кандидат технических наук, АО «НПК «СПП», ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: акционерное общество «Научно-исследовательский институт точных приборов» (АО «НИИ ТП»)

Защита состоится «12» декабря 2019 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.143.03 при Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, Москва, Гороховский переулок, д. 4, Зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии и на сайте

http://www.miigaik.ru/nauka/dissertacionny_sovet/dissertatsii/

Автореферат разослан « _____ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Вшивкова Ольга Владимировна

Общая характеристика работы

Актуальность. Спорт является важнейшей составляющей современной культуры. Достижения в этой сфере, в некотором роде, являются индикаторами степени развития стран. Для достижения преимущества стали широко использоваться технические средства. Развитие науки и техники позволило увеличить эффективность существующих тренировочных методов. Высокая конкуренция в мире спорта, обострившаяся в последние годы ясно указывает на необходимость разработки и внедрения новых технических средств, с помощью которых можно было бы повысить результативность тренировок. Контроль правильности движений спортсменов является ключевой задачей в этой области.

Один из путей для решения этой задачи состоит в создании систем измерения параметров движения человека (часто применяется термин «захват движения»). Результатом любого измерения параметров или захвата движения является построение трехмерной цифровой модели движения. Основой для построения такой модели является информация о местоположении определенного количества точек, принадлежащих объекту измерения в определенные промежутки времени. Цифровая модель конкретного движения спортсмена может в дальнейшем использоваться в спортивной практике для создания спортивных обучающих программ для анализа и сравнения с образцовым движением.

Существуют обучающие программы, осуществляющие сравнение реальных движений спортсменов с идеальными. Таким образом, появляется возможность существенно повлиять на технику спортсмена.

Резюмируя вышесказанное, можно отметить, что существует потребность в измерительных системах, позволяющих определять положение объекта и его частей в пространстве в режиме реального времени. Проблема заключается в том, что системы захвата движения обладают небольшим радиусом действия.

Актуальность темы диссертации обусловлена потребностью создания системы, дающей возможность проводить такие измерения. При этом она должна обладать следующими особенностями:

- 1) Измерения должны производиться в режиме реального времени.
- 2) Спортсмены могут передвигаться и активно взаимодействовать с окружающей средой, поэтому такие системы должны позволять измерение движущихся объектов без размещения на них датчиков.
- 3) Радиус действия систем должен быть в пределах от 1,5 до 15 метров.
- 4) Кроме соответствия техническим требованиям такие системы должны удовлетворять медицинским и санитарным требованиям по безопасности работы, обладать высокими эргономическими характеристиками и небольшой стоимостью.

Существующие системы захвата движения разделяются на безмаркерные и маркерные.

Маркерные системы подразумевают использование датчиков. Данные с датчиков поступают в компьютер, где строится 3D- модель движений. В безмаркерных системах такие датчики не нужны. Для получения информации о движении используются свойства самого объекта.

На основе этой модели в режиме реального времени или позднее создаётся анимация виртуального персонажа. Существующие системы измерения параметров движения (захвата движения) различаются по принципам отслеживания движений. Кроме оптико-электронных систем (активных или пассивных) существуют магнитные, механические и гироскопические системы и акустические системы. Оптико-электронные системы могут быть маркерными и безмаркерными, остальные – только маркерными

Понятно, что маркерные системы не удовлетворяют поставленным условиям из-за необходимости размещать маркеры на теле спортсменов

Безмаркерные системы не требуют размещения датчиков на объекте. Захват движения производится устройствами, использующими излучение в оптическом диапазоне. Разные оптико-электронные безмаркерные системы имеют присущие им недостатки. Общей тенденцией является то, что те из них, которые позволяют работать с движущимися объектами, имеют маленький радиус действия. Подробно недостатки различных систем будут рассмотрены ниже.

Исходя из вышеизложенного, представляется актуальной разработка безмаркерной оптико-электронной системы, сочетающей возможность работы с динамическими объектами. При этом радиус действия такой системы должен позволять ее применение в соревновательных условиях. Важно, чтобы ее остальные параметры были не хуже, чем у существующих сегодня аналогов. К таким параметрам нужно отнести также и стоимость.

Во время процесса захвата движения осуществляется трехмерная реконструкция сцены и объекта. Под трехмерной реконструкцией понимают процесс получения цифрового представления трехмерной сцены реального мира – объемного изображения. Задача состоит в восстановлении данных в третьем измерении из двумерных данных. Поскольку камера представляет собой устройство, осуществляющее преобразование трехмерной сцены в двумерное изображение, при переходе неизбежно теряется информация об углах, действительных размерах и т.д. Восстановление этой информации, которая включает в себя расстояние до точек объекта, еще называют 3D-сканированием. Эта задача возникает при работе устройств и систем для измерения параметров или захвата движения.].

Степень разработанности темы. Проблемам оптико-электронных систем со структурированной подсветкой посвящены исследования и публикации ряда авторов (В.И. Гужов, Khoshelham K., Elberink S. O., Geng J., Lanman D., Crispell D., Taubin G). В этих источниках рассмотрены общие вопросы применения таких систем, их недостатки. В частности обсуждается дальность действия подобных систем (на примере Кинекта). Практически нигде не говорится о возможных путях увеличения дальности действия, то есть данный вопрос нуждается в дальнейшей проработке. Следует предложить способ увеличения дальности, предложить возможное конструкционное решение, показать возможность его применения путем определения разрешающей способности системы в пределах новой дальности действия и анализа погрешности.

Область исследования. Диссертационная работа выполнена в соответствии с пунктом 2 – «Разработка, совершенствование и исследование

характеристик приборов, систем и комплексов с использованием электромагнитного излучения оптического диапазона волн» паспорта специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.

Объектом исследования являются теория, методы и принципы построения оптико-электронных систем для измерения параметров движения человека.

Предметом исследования являются оптико-электронные системы со структурированной подсветкой для измерения параметров движения человека (захвата движения), принципы их построения, связь между точностными и основными конструктивными характеристиками, а также погрешности измерения расстояния и их зависимость от дальности до объекта.

Целью диссертационной работы являются разработка и исследование оптико-электронной системы измерения параметров движения в задачах биомеханики, обладающей увеличенным радиусом действия по сравнению с существующими аналогами. Для достижения цели диссертации были поставлены и решены следующие **задачи**:

1) Предложить способ и систему, его реализующую, для разрешения противоречия между возможностями существующих оптико-электронных систем измерения параметров движения и требуемыми условиями работы.

2) Разработать модель предлагаемой системы и ее составляющих.

3) Поставить эксперимент, позволяющий оценить погрешность измерения расстояния до точек объекта, и проанализировать полученные данные на предмет соответствия современным аналогам.

Методы исследования. Основным методом исследования являлся эксперимент, включающий компьютерную обработку результатов.

В качестве математического аппарата для расчетов использовались:

1) Математическая модель системы автоматического регулирования масштаба виртуального шаблона в виде дифференциальных уравнений в переменных вход-выход.

2) Для проведения численных расчетов, построения графиков и компьютерного моделирования были использованы программные пакеты Mathcad, Matlab

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1) Разработана оптико-электронная система измерения параметров движения в задачах биомеханики с увеличенной дальностью действия, основанная на применении виртуального шаблона с автоматически изменяемым масштабом.

2) Разработан способ увеличения дальности действия систем, использующих структурированную подсветку.

3) Создана компьютерно-имитационная модель, реализующая разработанную оптико-электронную систему.

4) Поставлен эксперимент, заключающийся в имитации предложенной оптико-электронной системы, позволивший оценить погрешности измерения расстояния до точек объекта и доказавший соответствие этого параметра современным аналогам.

Научная новизна результатов диссертационного исследования:

1) Разработана оптико-электронная система, превосходящая современные аналоги по дальности действия

2) Впервые применен виртуальный шаблон структурированной подсветки, имеющий способность автомасштабирования.

3) Разработан способ увеличения дальности действия оптико-электронных систем, использующих структурированную подсветку, основанный на масштабировании виртуального шаблона в зависимости от размера структур его изображения в плоскости приемника излучения.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке и исследовании оптико-электронной системы измерения параметров движения с увеличенным радиусом действия, включающей в себя виртуальный шаблон структурированной подсветки оригинальной конфигурации. Способ увеличения радиуса действия основан на оригинальном алгоритме изменения масштаба

изображения виртуального шаблона. Полученные закономерности и разработанные модели вносят существенный вклад в теорию оптико-электронных систем измерения параметров движения.

Практическая значимость работы. Полученные в работе результаты расширяют область практического применения оптико-электронных систем измерения параметров движения, основанных на использовании структурированной подсветки. Увеличение дальности действия до 15 метров открывает возможности для построения 3D-моделей движений в соревновательных условиях в реальном масштабе времени. Возможно применение таких систем в исследованиях краш-тестов автомобилей, 3D-реконструкциях мест аварии при расследовании дорожно-транспортных происшествий, в игровых контроллерах и в сфере безопасности.

Личный вклад автора. Лично автором создана математическая модель рассматриваемого устройства; выполнены все расчеты, оценка быстродействия и погрешности измерения расстояния до точек объекта для конкретных условий работы; поставлен эксперимент, имитирующий разрабатываемую систему.

Апробация работы. Основные результаты исследования были доложены на международной конференции Сибоптика 2017 и научно-технической конференции студентов и молодых ученых МИИГАиК в 2017 и 2019 году, на Международной научно-технической конференции «Пространственные данные – основа стратегического планирования, управления и развития», посвященной 240-летию МИИГАиК.

Публикации. Автором опубликованы три статьи в рецензируемых изданиях, 2 из них – в изданиях, рекомендованных ВАК.

Основное содержание работы

Во **введении** определены основные направления исследований, обоснованы важность и актуальность темы диссертационной работы, определены объект и предмет исследований, цель и задачи диссертации, показаны новизна, научная и практическая значимость диссертационных исследований, дан краткий обзор существующих обучающих спортивных программ.

В главе 1 было отмечено, что безмаркерные методы измерения параметров движения человека (захвата движения) основываются на различных технологиях 3D-сканирования, которые подразумевают измерение расстояния до точек динамического объекта с течением времени. Сделан аналитический обзор современных методов и технологий, применяемых в современных оптико-электронных системах измерения параметров движения (или захвата движения), дана их классификация, рассмотрены основные принципы их работы. Приведены примеры схем с описанием принципа работы, отмечены их достоинства и недостатки. Наиболее подробно были рассмотрены активные (времяпролетная технология, структурированная подсветка) и пассивные методы (стереоскопический), которые позволяют их использование с динамическими объектами. Было установлено, что все применяемые методы имеют низкую дальность действия, поэтому для выбора упор был сделан на другие критерии. Рассматривалась применимость методов при разных типах освещения, быстрдействие, сложность программного обеспечения. Для применения в предлагаемой оптико-электронной системе был выбран метод структурированной подсветки, как наиболее полно отвечающий условиям работы в спортивных залах.

Для выбранного метода 3D-сканирования были проанализированы существующие типы структурированной подсветки и способы кодирования для обнаружения соответствующих точек на проецируемых шаблонах и их изображениях. По условиям работы с динамическими объектами был выбран способ пространственного кодирования.

Таким образом, для предлагаемой оптико-электронной системы измерения параметров движения в задачах биомеханики была выбрана технология структурированной подсветки с пространственным кодированием проецируемого шаблона.

Далее определены основные желаемые характеристики рассматриваемой системы на основе анализа современных систем, приведенных в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики современных аналогичных устройств

Устройство	Год выпуска	Цена в \$	Шаблон	Радиус действия мм
Kinect v1	2010	100	Точки	400-4500
AsusXtionPro/LIVE	2011	170	Точки	800-3500
PrimeSenseCarminе	2013	130	Точки	350-1400
IntelRealSense F200	2015	100	Полосы	200-1200
OrbbecAstra	2015	150	Точки	600-6000
IntelRealSense SR300	2016	130	Полосы	200-1200
OrbbecPersee	2016	200	Точки	400-8000

Выводы по главе 1. Применение обучающих программ в спорте должно охватывать все ситуации, в том числе соревновательные. В условиях соревнований иногда невозможно вплотную приблизиться к спортсменам. Это означает, что системы для захвата движения должны иметь сравнительно большой радиус действия. Ни одна из существующих систем, подходящих для работы в спорте, не имеет дальность более 8 метров.

Во **второй главе** приводится построение математической модели автоматического управления изменением масштаба виртуального шаблона в оптико-электронной системе измерения параметров движения в задачах биомеханики со структурированной подсветкой. Функциональная схема оптико-электронной системы измерения параметров движения показана на рисунке 1.



Рисунок 1. Функциональная схема опико-электронной системы измерения параметров движения

Система состоит из передающего блока 1, компьютера 2, приемного блока 3. Передающий блок состоит из оптической системы автофокусировки и проектора. Система автофокусировки в передающем блоке строит резкое изображение виртуального шаблона на динамическом объекте. Приемный блок состоит из приемной оптической системы, оптической системы автофокусировки и приемника излучения. Его функцией является регистрация изображения динамического объекта с искаженным изображением виртуального шаблона. Система автофокусировки строит резкое изображение виртуального шаблона, искаженного динамическим объектом на приемнике излучения. Шаблон в цифровом виде записывается в память компьютера, управляющего проектором. Результатом работы устройства является трехмерная модель объекта.

Такая система является системой автоматического регулирования с обратной связью, следящего типа.

Логика работы системы, реализующей исследуемый метод увеличения дальности действия структурированной подсветки, описана через систему передаточных функций компонентов. Компоненты системы и обозначения их передаточных функций показаны на рисунках 2, 3, 4.

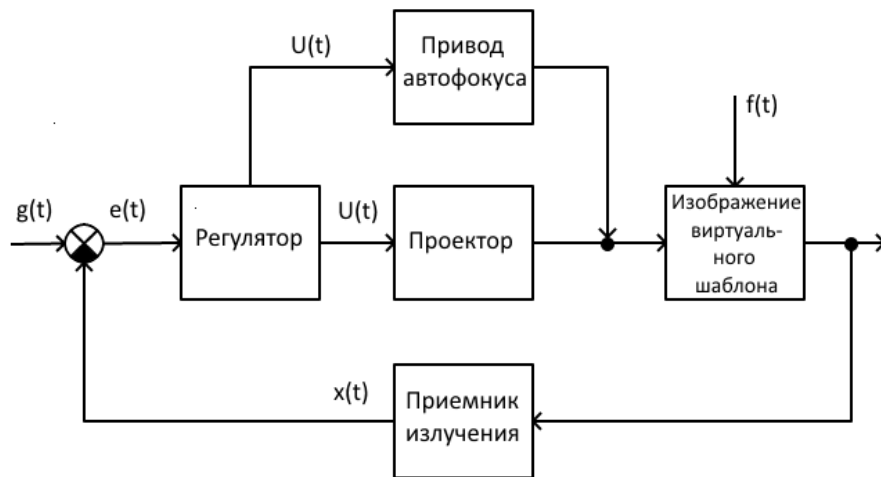


Рисунок 2. Модель системы автоматического регулирования масштаба виртуального шаблона

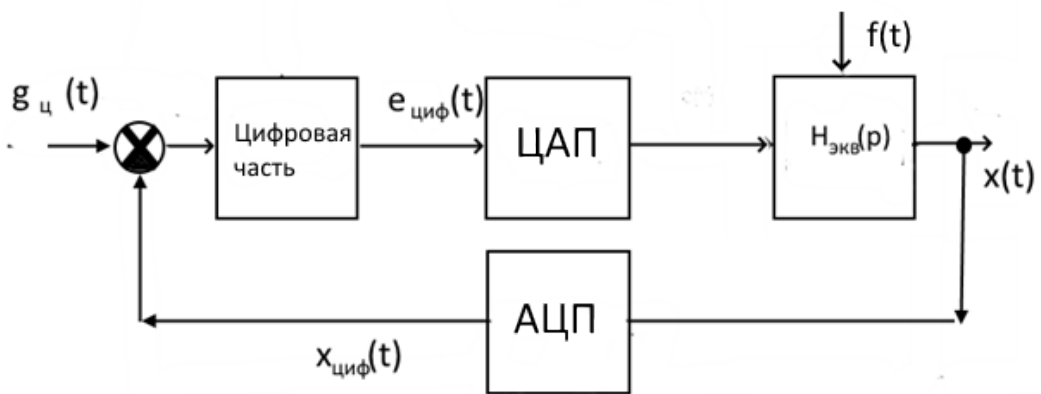


Рисунок 3. Обобщенная модель цифровой системы автоматического регулирования масштаба виртуального шаблона

Далее система разделена на цифровую и аналоговую части, которые рассмотрены отдельно. На рисунке 4 показана аналоговая часть. Это условное разделение системы необходимо для исследования системы автоматического регулирования масштаба виртуального шаблона с целью построения ее компьютерной модели.

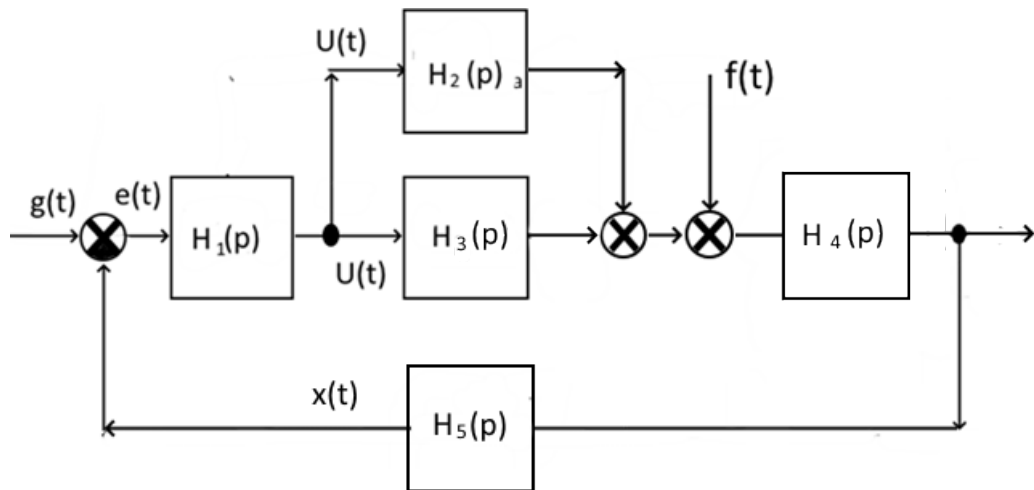


Рисунок 4. Аналоговая часть системы автоматического регулирования изменения масштаба виртуального шаблона

Передаточная функция замкнутой системы по задающему воздействию:

$$\begin{aligned}
 H_g(p) &= \frac{X(p)}{G(p)} = \frac{H_1(p)H_{23}(p)H_4(p)}{1 + H_1(p)H_{23}(p)H_4(p)H_5(p)} \\
 &= \frac{\left(k + \frac{1}{T_{\text{инт}}p} + T_{\text{диф}}p\right) \left(\frac{k_{\text{дв}}}{p(1+pT_{\text{дв}})} + k_{\text{и}}\right) k_{\text{об}}}{1 + \left(k + \frac{1}{T_{\text{инт}}p} + T_{\text{диф}}p\right) \left(\frac{k_{\text{дв}}}{p(1+pT_{\text{дв}})} + k_{\text{и}}\right) k_{\text{об}} k_{\text{д}}}
 \end{aligned}$$

Были также рассчитаны передаточные функции системы по рассогласованию и по возмущающему воздействию.

В результате по математической модели была создана программа-симуляция в среде *Matlab*, позволяющая конструировать предлагаемую систему автоматического регулирования масштабирования виртуального шаблона в оптико-электронной системе измерения параметров движения. Данная симуляция позволяет, учитывая исходные данные, изменяя конструктивные параметры и устанавливая соотношения между ними, добиваться требуемых параметров проектируемой системы. Среди таких параметров могут быть точность, быстродействие и т. д. Примеры работы этой программы с конкретными параметрами можно видеть на рисунке 5.

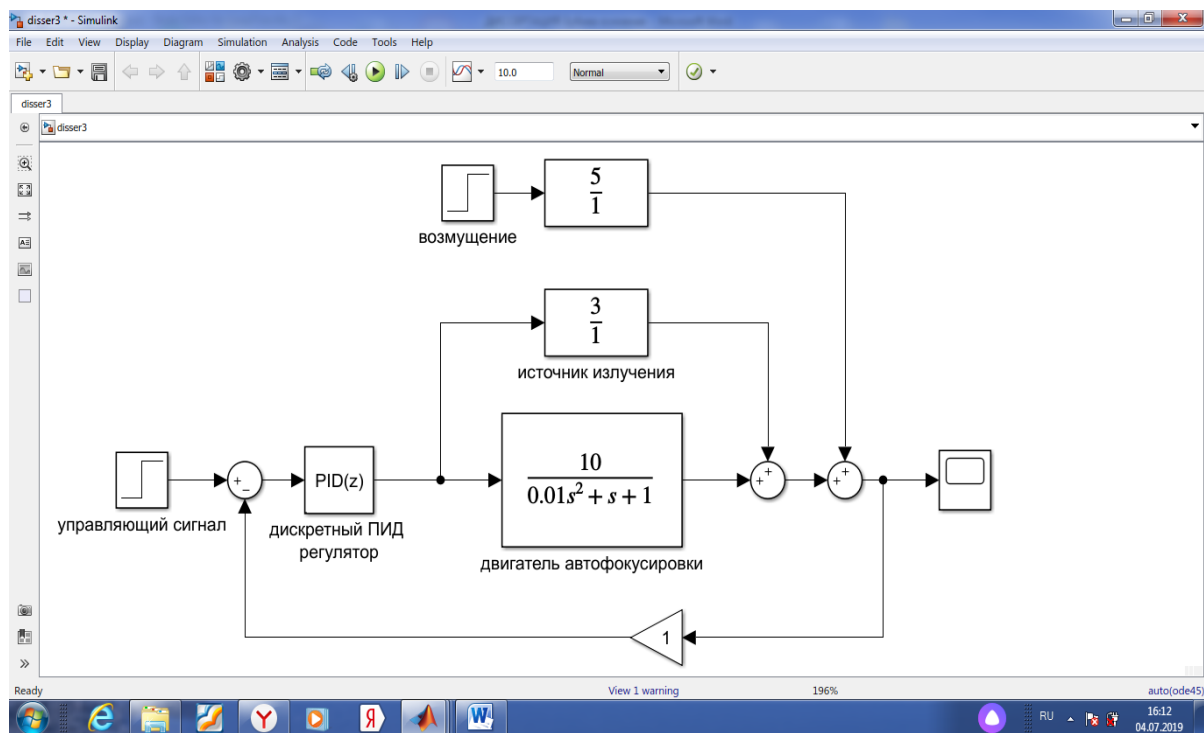


Рисунок 5. Реализация программы-симуляции системы автоматического регулирования масштаба виртуального шаблона

На рисунке 6 показано время реакции системы на помеху в виде единичного ступенчатого сигнала при входном сигнале такой же формы. График построен созданной программой.

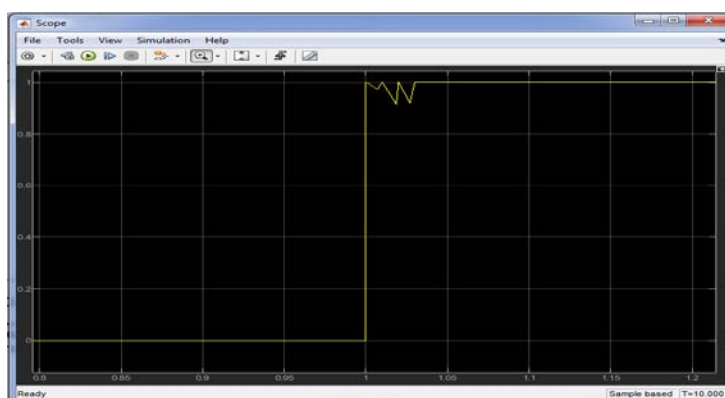


Рисунок 6. Оценка быстродействия системы

Выводы к главе 2. Была создана математическая и компьютерная модель системы автоматического регулирования масштаба виртуального шаблона, позволяющая оценить параметры системы при различных входных данных.

В третьей главе описываются принцип действия алгоритма изменения масштаба виртуального шаблона. Алгоритм показан на рисунке 7. Алгоритм обеспечивает изменение масштаба изображения виртуального шаблона на объекте в зависимости от размера структур изображения шаблона в плоскости приемника излучения

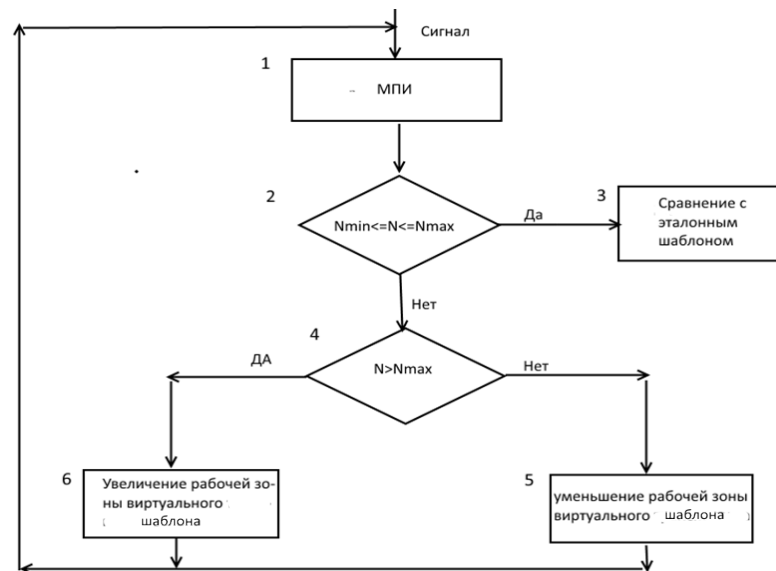


Рисунок 7. Алгоритм изменения масштаба виртуального шаблона

Алгоритм работает следующим образом. На приемнике излучения - 1 регистрируется искаженное изображение шаблона и объекта и передается сигнал на вход вычислительного блока -2, который определяет пиксели, на которых сигнал превысил пороговую величину, определяет размеры структуры изображения шаблона на приемнике излучения и сравнивает его с допустимым интервалом. Если размеры сигнала находятся в допустимом интервале -3, то сигнал, полученный на приемник излучения-1,сравнивается с шаблоном в памяти компьютера-3,результаты подаются на выходное устройство, предназначенное для визуализации результатов работы всей системы.

При несовпадении сигнала с допустимым рабочим интервалом – 4 подается команда-сигнал произвести уменьшение рабочей зоны изображения виртуального шаблона -5 или команда-сигнал - произвести увеличение рабочей зоны виртуального шаблона - 6 в зависимости от значения N (размер структуры

изображения шаблона выраженный количеством пикселей входящих в эту структуру)

Далее обосновывается выбор типа проектора, источника излучения, приемника излучения, оптических систем. Формулируются требования к оптико-электронной систем измерения параметров движения в задачах биомеханики. Проводится габаритный и энергетический расчет оптической системы предлагаемого устройства.

Требования к оптико-электронной системе измерения параметров движения:

- рабочая длина волны $\lambda=830\text{нм}$;
- источник излучения – диодный лазер;
- вид проектора – DLP проектор;
- дальность действия от 1,5 до 15 метров;
- допустимая относительная погрешность измерения расстояния не более 1%;
- частота кадров – 30 в секунду
- угловая разрешающая способность не менее $0,2^{\circ}$
- площадь покрытия изображения шаблона- $2,5 \text{ м}^2$
- диаметр кружка рассеяния в плоскости приемника излучения- 0.03 мм.

Принципиальная оптическая схема предлагаемой оптико-электронной системы показана на рисунке 8.

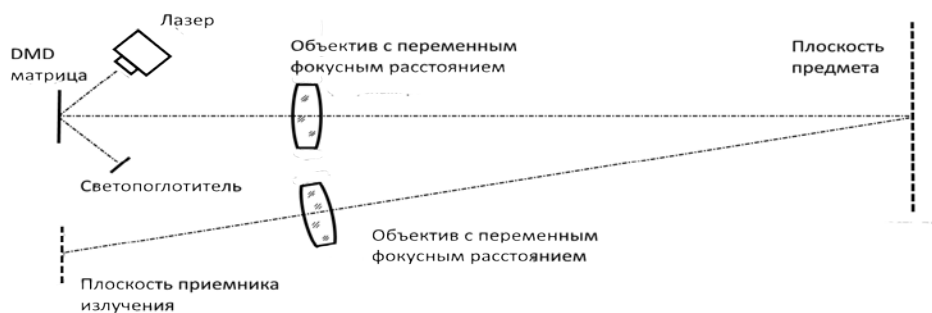


Рисунок 8. Принципиальная оптическая схема оптико-электронной системы измерения параметров движения в задачах биомеханики.

Выводы к главе 3. Проведенные габаритный, энергетический расчеты и оценка разрешающей способности показывают возможность создания системы с требуемыми параметрами.

В главе 4 приведены результаты практической реализации и экспериментальной проверки работоспособности предлагаемой оптико-электронной системы измерения параметров движения в задачах биомеханики.

В эксперименте исследовались проекционный и приемный каналы системы. В качестве проекционного канала использовался проектор с подключенным компьютером. С помощью компьютера осуществлялось масштабирование шаблона. Шаблон находился только в памяти компьютера. Различное расстояние до объекта имитировалось перемещением проектора и объекта. Имитация проводилась в видимой части спектрального диапазона. Главная причина – отсутствие соответствующего оборудования. Это является допустимым в данном случае, главной задачей было оценить работоспособность системы и ее погрешность в принципе. От используемого рабочего спектрального диапазона зависит соотношение сигнал\ шум на приемнике излучения. Работа приемного канала системы моделировалась с помощью компьютера. Диспаратет (см 1.2) определялся вручную по сведенным с помощью программы Matlab снимкам. Расстояние рассчитывалось по формулам. Исходным объектом для моделирования приемной оптической системы служило изображение шаблона на объекте, полученное при моделировании проекционной системы.

Задачи, выполненные в процессе эксперимента.

1) Обоснованы исходные данные и упрощения, необходимые для эксперимента.

2) Получен материал для обработки и анализа. Выбранный шаблон спроецирован на объект с различных расстояний. Проведена съемка. Измерены расстояния до точки объекта альтернативным методом.

3) Обработаны полученные снимков, оценена работоспособности системы, и погрешность измерения расстояния то точки объекта.

4) Полученные результаты сравнены с существующим образцом аналогичного устройства.

5) Сделаны выводы о приемлемости модели.

. В эксперименте использовался шаблон, изображенный на рисунке 9.

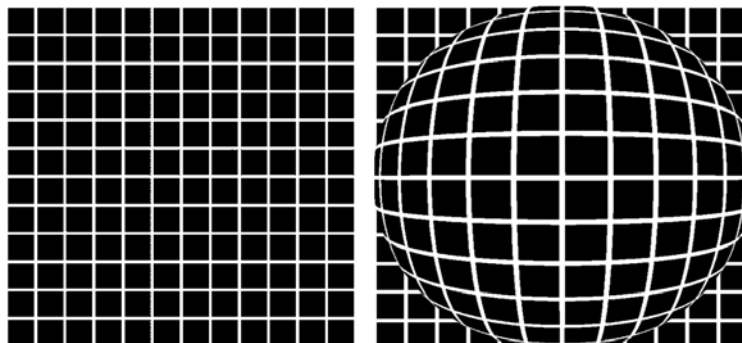


Рисунок 9. Вид экспериментального шаблона структурированной подсветки

а – эталонный шаблон, б – изображение шаблона, искаженное объектом

Выбранный шаблон проецировался с помощью проектора объект. Съемка велась фотоаппаратами с объективами переменного фокусного расстояния. Снимки делались с разного расстояния, как с точки проецирования, так и под углом. База (расстояние между осью проецирования и осью съемки составляла 0,3м). Масштаб проецируемого виртуального шаблона изменялся с помощью компьютера. Масштабирование изображения шаблона на объекте проводилось изменением фокусного расстояния объективов фотоаппарата. Вид проекций для расстояния 2 м показан на рисунке 10. Расстояние до объекта менялось в пределах от 1,5 м до 15 метров, расстояние измерялось лазерным дальномером.

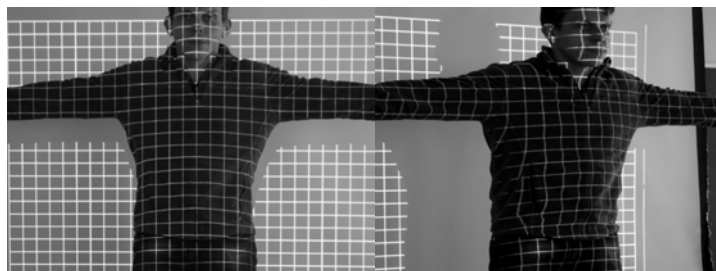


Рисунок 10. Проекция экспериментального шаблона структурированной подсветки на объект

Полученные снимки использовались для моделирования работы оптической системы приемного канала и определения расстояния до точек объекта с помощью компьютера.

С помощью модели приемной оптической системы как пространственного фильтра (рисунок 11) была получено предполагаемое изображение в плоскости приемника излучения (рисунок 12).

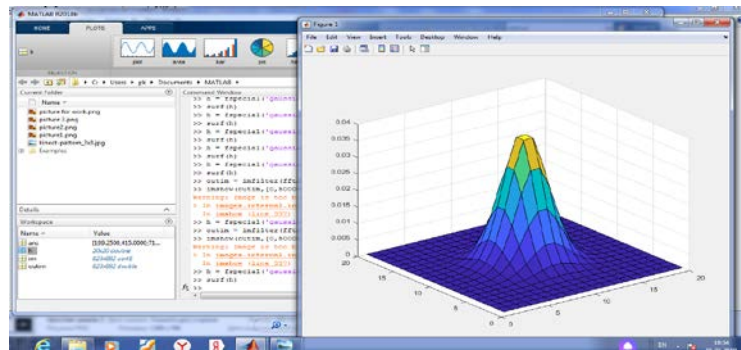


Рисунок 11. Модель приемной оптической системы как пространственного фильтра

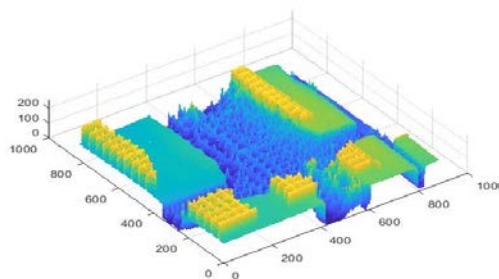


Рисунок 12. Восстановленное изображение на приемнике излучения

По восстановленному изображению было проанализировано распределение освещенности в плоскости приемника излучения и возможные источники помех при работе в видимой части спектра. Программными методами пары изображений ректифицировались, находились соответствующие точки, и определялось рассогласование между ними. (Рисунок 13) Этот процесс был проделан для разных расстояний с разным масштабом.

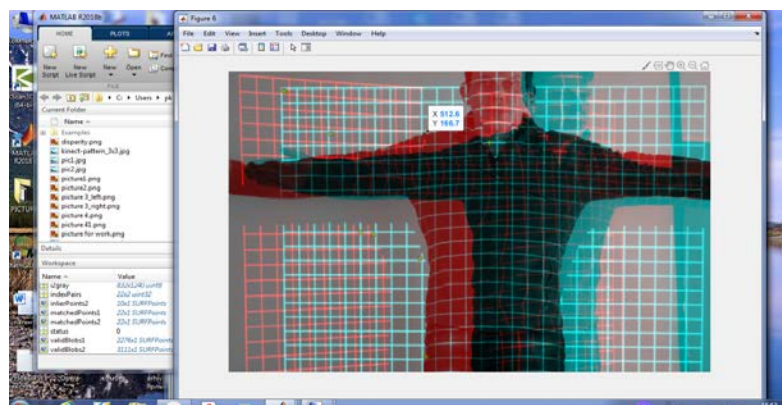


Рисунок 13. Нахождение рассогласования (диспаритета) между соответствующими точками

В итоге была вычислена абсолютная погрешность измерения расстояния. Зависимость абсолютной погрешности от расстояния показана на рисунке 14.

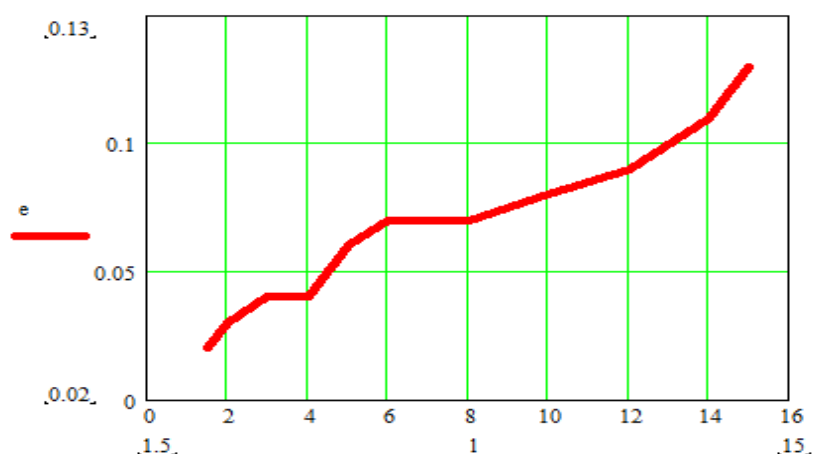


Рисунок 14. Зависимость абсолютной погрешности от расстояния до объекта

Для сравнения была определена экспериментальная оценка дальности действия одного из современных аналогов системы.

В качестве аналога выступала система *Kinect XBOX 360*. Эксперимент проводился при помощи программы *KSAN 3D*. Съемка происходила при разных условиях освещенности и на разных расстояниях. Оценивалась только максимальная дальность действия.

В результате не удалось получить никаких данных при дальности до объекта больше чем 2,5 метра. Освещенность сцены искусственным светом практически никак на результаты не влияла. (Рисунок 15)

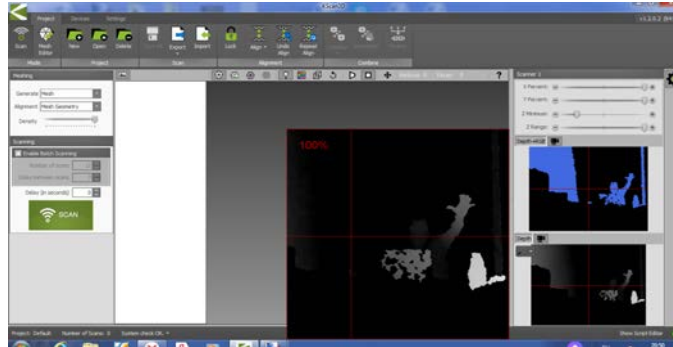


Рисунок 15. Карта глубины (расстояния до точек объекта) при дальности 2,20 м

Симуляция работы рассматриваемой системы проходила в видимой части спектра электромагнитного излучения. *Kinect XBOX 360* работает в ближней инфракрасной области спектра.

Предложенная оптико-электронная система измерения параметров движения может стать альтернативой существующим устройствам, основанным на использовании структурированной подсветки.

Выводы по главе 4.

1) Эксперимент выявил работоспособность рассматриваемой оптико-электронной системы при дальности до объекта до 15 метров.

2) Погрешность измерения расстояния в эксперименте на небольших расстояниях (2метра) уступала передовым аналогам (ORBEC PERSEE), находясь на уровне аналогичных устройств среднего звена (KINECT). Увеличение расстояния до объекта до 15 не приводило к значительному падению точности измерения расстояния, в отличие от аналогов.

3) Была подтверждена необходимость работы в инфракрасной части спектра

Заключение

Существует потребность в оптико-электронных системах измерения параметров движения в задачах биомеханики. Данная потребность вызвана необходимостью построения 3D-моделей спортсменов в соревновательных условиях в контексте создания спортивных обучающих программ.

Основным **итогом** выполненного исследования является разработанная автором оптико-электронная система, которая позволяет решать задачу построения 3D-моделей на расстоянии до 15 метров. Известные аналоги решают такую задачу на расстояниях до 6-8 метров. При этом погрешность измерения расстояния до точек объекта на расстоянии 15 метров не превышает таковую на расстоянии 5 метров у существующих аналогов.

Основные результаты работы

1) Проведен анализ современных систем и методов измерения параметров движения, определены их недостатки и неустранимые ограничения. Доказана актуальность.

2) Разработана оптико-электронная система измерения параметров движения в задачах биомеханики с увеличенным радиусом действия.

3) Разработан способ увеличения дальности, который основан на изменении масштаба виртуального шаблона.

4) Разработана модель оптико-электронной системы измерения параметров движения, использующей структурированную подсветку.

5) Результаты экспериментального исследования модели рассматриваемой системы и обработка результатов эксперимента на компьютере подтвердили реализуемость поставленных требований.

6) Произведена оценка погрешности измерения предлагаемой системой расстояния до точек объекта.

6) Сформулированы **рекомендации**, облегчающие оптимальный выбор компонентов оптико-электронной системы измерения параметров движения.

Суть рекомендаций заключается в том, что:

- желательно использовать источник излучения в ближней инфракрасной области спектра и узкополосного фильтра для повышения соотношения сигнал-шум;

- следует выбирать объективы с переменным фокусным расстоянием с ультразвуковым мотором фокусировки (см. приложение Б) или применять компоненты Альвареса.

Полученные результаты открывают новые **перспективы** в использовании оптико-электронных систем измерения параметров движения. Кроме построения 3D-моделей спортсменов в условиях соревнований, увеличение дальности действия таких систем открывает больше возможностей для их применения в исследованиях краш-тестов автомобилей и 3D-реконструкции мест аварии при расследовании дорожно-транспортных происшествий.

Изначально системы со структурированной подсветкой широко применялись при производстве игровых контроллеров. Увеличение радиуса действия таких устройств может придать дополнительный импульс их применению в игровой индустрии.

В связи с неослабевающей террористической угрозой особенную актуальность приобретает использование таких систем в сфере безопасности, где они могут применяться для распознавания лиц, жестов и движений.

Список опубликованных работ по теме диссертации

В рецензируемых научных изданиях ВАК при Минобрнауки России:

1. Зубов А. А., Елкин Е.А., Майоров А. А. Проблемы разработки оптико-электронных систем измерения параметров движения для создания спортивных обучающих программ // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. – №3 – С. 120-124.

2. Зубов А. А., Елкин Е.А., Майоров А. А. Моделирование оптико-электронной системы измерения параметров движения в задачах биомеханики с виртуальным шаблоном структурированной подсветки. // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2019. – №3 – С. 349-353.

В прочих научных изданиях:

3. Зубов А. А., Елкин Е.А., Майоров А. А. Проблемы использования оптико-электронных систем измерения параметров движения для создания спортивных обучающих программ // СибОптика-2017. Материалы международной научной конференции. Т. 2 – Новосибирск. СГУГиТ. - 2017. - С. 3-8.