

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

УДК 004.42:621.378.8

На правах рукописи

ШАФАР
Никита Александрович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ЛАЗЕРНО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СЛЕЖЕНИЯ РЕАЛЬНОГО
ВРЕМЕНИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание степени
магистра техники и технологий

по специальности 1-39 81 01 – Компьютерные технологии
проектирования электронных систем

Минск 2019

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: **ХОРОШКО Виталий Викторович**
заведующий кафедрой ПИКС, кандидат технических наук, доцент

Рецензент: **НАПРАСНИКОВ Владимир Владимирович**
кандидат технических наук, доцент кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» БНТУ

Защита диссертации состоится «28» июня 2019 г. года в 9⁰⁰ часов на заседании Государственной экзаменационной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, Минск, ул. П.Бровки, 6, копр. 1, ауд. 408, тел. 293-20-80, e-mail: kafpiks@bsuir.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

ВВЕДЕНИЕ

Данный момент времени характеризуется быстрым ростом производительности компьютеров. Это позволяет использовать компьютеры для совершения быстрых логико-операционных действий и оптимизировать так называемую операционную деятельность человека. Тем не менее, больших успехов в компьютерном оперировании на уровне образов до сих пор достичь не удалось. Но компьютеры могут помочь в этом человеку. Существенно повысить эффективность визуального анализа данных могут системы виртуальной реальности (VR), называемые также системами виртуального окружения (VO). Задача таких систем – погрузить исследователя в искусственный мир анализируемой модели и предоставить естественный интуитивный интерфейс для взаимодействия с её элементами. Это становится особенно актуальным сейчас, при быстром росте производимой человеком информации.

В настоящее время в мире существует более пятисот крупномасштабных установок виртуальной реальности, которые используются в самых различных областях науки и техники для решения задач как фундаментальных научных дисциплин, так и в узко специализированных прикладных направлениях. Разработку технологий виртуального окружения в силу высокой стоимости компонент до последнего времени могли себе позволить только крупные институты, богатые университеты или лаборатории ведущих мировых компаний. Прогресс в создании доступных компьютеров, графических ускорителей и обычных офисных проекторов позволяет разрабатывать доступные установки VO.

Естественный интуитивный интерфейс является важной частью любой системы виртуальной реальности. Для создания ощущения полного погружения в виртуальную реальность важной компонентой является система слежения (называемая также системой трекинга) за положением и действиями пользователя в пространстве установки VO. Для создания систем слежения используются различные технологии: существуют механические, электромагнитные, ультразвуковые, оптические и другие системы. Преимуществом оптических систем является удобство в использовании, так как в таких системах отсутствуют длинные провода, часто мешающие работе. Стоимость существующих систем слежения довольно велика, так как большинство таких систем разрабатывалось для сложных и дорогостоящих установок VO. Появление доступных систем виртуальной реальности требует разработки также и доступных систем слежения, которые удовлетворили бы требованиям пользователей таких установок.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Существующие сегодня оптические системы слежения (ОСС) привязаны к конкретному оборудованию и не позволяют пользователям модернизировать программную платформу. Кроме того, системы слежения на основе двух камер, широко применяемые сегодня, обладают рядом недостатков. Так, например, точность в таких системах ухудшается с увеличением расстояния до камер, а в случае отсутствия прямой видимости между приемником и источником отслеживание перемещения становится невозможным.

В диссертации предлагается математическое и программное обеспечение, позволяющее разрабатывать расширяемые оптические системы слежения реального времени на основе анализа зрительных данных от нескольких камер. Созданные программные средства обеспечивают быструю разработку ОСС на основе доступного оборудования с учётом требований и ограничений конкретных установок и приложений ВО за счёт повторного использования её компонент.

Степень разработанности проблемы

В современных исследованиях, представленных в научно-технической литературе, приведены результаты, характеризующие актуальность математического и программного обеспечения систем слежения. *A. Stocco, M. Leotta, F. Ricco* в своих работах исследовали алгоритмы для обработки и автоматической генерации объектных классов при создании лазерно-оптических систем слежения реального времени.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является исследование математического и программного обеспечения лазерно-оптических систем слежения реального времени.

Поставленная цель работы определяет **следующие основные задачи**:

1. Исследование архитектуры программных модулей «Трекинг» для создания программных комплексов слежения реального времени.

2. Исследование и разработка математических и программных средств для реконструкции положений объектов в пространстве на основе анализа изображений и модели проективного преобразования с учётом требований реального времени.

3. Апробация разработанных математических и программных средств, реализовав программный комплекс ОСС «Трекинг», интегрированный с аппаратным и программным обеспечением установок виртуального окружения.

Область исследования

Содержание диссертации соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) ОСВО 1-39 81 01-2012 специальности 1-39 81 01 «Компьютерные технологии проектирования электронных систем».

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу работы легли исследования ученых в таких областях, как искусственный интеллект, математический анализ, компьютерное зрение и разработка программного обеспечения.

Информационная база исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, предоставляемой разработчиками библиотек, технических нормативно-правовых актов, сведений из ресурсов Интернет, а также материалов научных изданий, конференций и семинаров.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в разработке структуры алгоритмов реконструкции положения объектов в пространстве на основе анализа изображений, включающая комбинированный алгоритм поиска центров образов маркеров на основе анализа параллельных хорд и яркостей точек образов, алгоритм реконструкции, учитывающий её локальную точность и устойчивость, зависящую от конфигурации камер, и управляющий алгоритм, оптимизирующий точность и скорость обработки данных на основе результатов предварительного анализа.

Теоретическая значимость работы заключается в детальном анализе существующих математических и программных методов обеспечения систем слежения реального с учетом их особенностей.

Практическая значимость диссертации состоит в улучшении качества работы оптической системы, работающей на основе структурной подсветки, при восстановлении поверхностей объектов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Выбор и обоснование унифицированной архитектуры ОСС «Трекинг» для создания оптических систем слежения реального времени.

2. Структура алгоритмов реконструкции положений объектов в пространстве на основе анализа изображений, включающая комбинированный алгоритм поиска центров образов маркеров на основе анализа параллельных хорд и яркостей точек образов, алгоритм реконструкции, учитывающий её локальную точность и устойчивость, зависящую от конфигурации камер, и

управляющий алгоритм, позволяющий оптимизировать точность и скорость обработки данных на основе результатов предварительного анализа.

3. Программный комплекс «Трекинг», созданный на основе разработанной архитектуры и алгоритмов, интегрированный с несколькими установками виртуального окружения и интерактивными устройствами.

Апробация и внедрение результатов исследования

Результаты работы по теме диссертации были представлены на 54-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, Республика Беларусь, 2018 г.), 55-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, Республика Беларусь, 2019 г.), публиковались в международном научном журнале «Научные горизонты» (г. Белгород, Российская федерация, 2018-2019 г.).

Публикации

Изложенные в диссертационной работе основные положения и выводы опубликованы в 8 печатных работах. В их числе 4 статьи в сборниках материалов научных конференций и 4 тезиса докладов на научных конференциях.

Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 34 страницы.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе представлены установки ВО, принципы их работы, программное обеспечение для создания и выполнения приложений ВО; дано определение систем слежения, приведена классификация таких систем и сформулированы требования к их работе; представлена предлагаемая автором архитектура программных модулей ОСС «Трекинг».

Во второй главе рассматриваются математические модели и алгоритмы, на основе которых работают модули ОСС «Трекинг», а именно алгоритмы поиска образов маркеров на изображении, алгоритмы поиска соответствующих точек, алгоритмы трехмерной реконструкции координат маркеров, алгоритмы расчёта положения и ориентации объектов в пространстве и управляющие алгоритмы.

В третьей главе описывается процесс интеграции разработанных программных модулей с оборудованием и программным обеспечением установок ВО; приводятся результаты анализа работы системы; описывается использование разработанных модулей в задаче трёхмерной реконструкции поверхностей объектов.

В приложении представлены публикации автора, акт внедрения, справка на антиплагиат и графический материал, иллюстрирующий основные результаты диссертационной работы.

Общий объем диссертации составляет 112 страниц. Из них 54 страницы основного текста, 22 иллюстрации на 8 страницах, 5 листингов кода на 3 страницах, библиографический список из 64 наименований на 5 страницах, список собственных публикаций соискателя из 8 наименований на 1 странице, 4 приложения на 34 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы работы, определяются её цели и задачи, раскрывается практическая значимость.

В **общей характеристике работы** показана актуальность проводимых исследований, степень разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи диссертации, обозначена область исследований, научная (теоретическая и практическая) значимость исследований, а также апробация работы.

В **первой главе** представлены существующие технологии получения стереоэффекта и крупномасштабные системы ВО, в том числе система типа *VEonPC*, и система типа *CAVE*.

Описана одна из программных сред разработки и выполнения приложений ВО – Аванго, обеспечивающая разработчиков приложений специальными функциональными возможностями и концепцией обобществлённого графа сцены, доступного всем процессам, образующим распределённое приложение.

Опыт работы с различными системами слежения и установками ВО позволяет разработать унифицированную архитектуру ОСС «Трекинг». Данная архитектура предназначена для определения положений объектов в пространстве на основе анализа конфигураций опорных точек (маркеров), принадлежащих отслеживаемым объектам, видимых на видеоизображениях, в режиме реального времени. Требование реального времени является мягким и заключается в том, чтобы частота предоставления данных была не ниже 25 Герц, так как в противном случае нарушится эффект присутствия в установке ВО. Архитектура ОСС «Трекинг» определяет основные шаблоны программных модулей, их выполняемые функции и взаимосвязь между ними

Во **второй главе** рассматриваются математические модели и алгоритмы, на основе которых работают модули ОСС «Трекинг», а именно алгоритмы поиска образов маркеров на изображении, алгоритмы поиска соответствующих точек, алгоритмы трехмерной реконструкции координат маркеров, алгоритмы

расчёта положения и ориентации объектов в пространстве и управляющие алгоритмы.

Наиболее часто используемыми маркерами в системах слежения являются отражающие маркеры и светодиоды. В зависимости от формы маркеров, их образами на изображениях могут быть круги или, в общем случае, эллипсы.

Существующие алгоритмы обнаружения эллипсов на изображениях, основанные на высокоуровневой обработке изображений (например, вычисление параметров эллипса на основе анализа его граничных точек) требуют очень большого количества вычислений и не подходят для режима реального времени. Алгоритмы оценки параметров эллипса с помощью анализа точек, принадлежащих его границам, требуют применения итеративных методов, что приводит к тому, что необходимое количество операций с плавающей точкой составляет несколько тысяч. В работе предлагается улучшенный комбинированный алгоритм, основанный на анализе длин параллельных хорд образов маркеров и яркостей точек, принадлежащих образам.

Данный алгоритм использует тот факт, что линия, проходящая через середины параллельных хорд эллипса, проходит также через его центр и является его диаметром. После того, как найдены две параллельные хорды, может быть определена линия, проходящая через их середины, которая и будет являться его диаметром. Более точный алгоритм основан на выделении хорд, принадлежащих эллипсу на основе анализа изменений их длин и центров, аппроксимации квадратов длин хорд эллипса квадратичным многочленом, вычислении параметров многочлена с помощью метода наименьших квадратов и последующем вычислении параметров эллипса. В случае если образ маркера не является эллипсом, центр образа маркера можно вычислить на основе анализа яркостей всех его точек. К преимуществам алгоритма относится высокая скорость выполнения (требуется несколько десятков операций с плавающей точкой), возможность определения взаимно перекрываемых или не полностью видимых эллипсов, возможность быстрой оценки параметров эллипса по нескольким хордам.

К преимуществам алгоритма относится высокая скорость выполнения (требуется несколько десятков операций с плавающей точкой), возможность определения взаимно перекрываемых или не полностью видимых эллипсов, возможность быстрой оценки параметров эллипса по нескольким хордам. Схема работы алгоритма поиска образов маркеров показана на рисунке 1.

Управляющий алгоритм ОСС «Трекинг» работает в режимах настройки и слежения. В режиме слежения в течение первых нескольких секунд производится инициализация, во время которой вычисляется уровень шума на изображениях, определяются начальные положения отслеживаемых объектов на основе полного анализа изображений со всех камер и точной реконструкции.

Кроме того, оцениваются устойчивость и скорости движения объектов и их образов, в результате чего определяются наиболее вероятные области появления образов маркеров па следующем кадре. В дальнейшем поиск производится, прежде всего, в наиболее вероятных областях появления образов, которые обновляются для каждого кадра в зависимости от скорости движения маркеров.

В зависимости от требований пользователей и условий работы, информация о локальной точности реконструкции может быть использована для оптимизации точности или времени выполнения цикла реконструкции. Схема работы алгоритма реконструкции показана на рисунке 2.

В третьей главе описывается процесс интеграции разработанных программных модулей с оборудованием и программным обеспечением установок ВО; приводятся результаты анализа работы системы; описывается использование разработанных модулей в задаче трёхмерной реконструкции поверхностей объектов.



Рисунок 1 – Схема работы алгоритма поиска образа маркеров

Для передачи реконструируемых положений устройств приложениям виртуального окружения были созданы программные модули на основе архитектуры клиент-сервер. Серверная часть была интегрирована с программными модулями ОСС «Трекинг», а клиентская часть и работала как один из модулей программного комплекса ВО.

Наиболее важными параметрами, характеризующими систему слежения, являются точность, скорость реакции системы и рабочая область. Для определения точности было измерено среднеквадратичное отклонение реконструированного расстояния между двумя жестко закрепленными диодами. Точность

реконструкции, измеренная на расстоянии 150 см, не превышала 2 мм. Рабочее расстояние между пользователем и камерами составляло от 50 до 300 см. Частота обновления системы определялась частотой обновления фреймграббера и составляла около 25 Гц.

Запаздывание системы показывает, насколько быстро система слежения реагирует на действия пользователя. Общее запаздывание системы складывается из следующих задержек: задержка регистрации сигнала от излучателей камерами, задержка при передаче изображений фреймграббером программному обеспечению, задержка при обработке изображений и реконструкции позиции и ориентации, задержка данных при передаче их по сети пользовательскому приложению. Для измерения полной задержки автором использовался специально разработанный алгоритм. Триггер со светодиодом соединялся с одним из входов осциллографа. С другим входом осциллографа соединялся последовательный порт компьютера, на котором работал модуль ПК «Трекинг», принимающий данные и который генерировал сигнал при получении реконструированных данных. По разнице между импульсами определялась общая задержка системы, составившая около 60 мс.

Система слежения реконструирует в пространстве положение объектов с помощью триангуляции. В этом смысле к системам слежения близки системы реконструкции формы объектов, называемые 3D сканеры. Модули программного комплекса «Трекинг» были использованы для улучшения качества работы одного из таких устройств, работающих на основе структурной подсветки. Последовательность действий в работе устройства включает калибровку, фотографирование объекта со структурной подсветкой и без неё, реконструкцию поверхности на основе анализа образа спроецированной структуры, наложение текстуры и объединение различных участков объекта.

При обработке результатов, полученных от 3D сканера, была замечена систематическая ошибка реконструкции, связанная с тем, что программное обеспечение сканера не принимало во внимание оптических искажений. Для решения этой проблемы была проведена альтернативная реконструкция с помощью модулей ПК «Трекинг». Для этого по калибровочным изображениям были вычислены радиальные искажения камеры, калибровочные матрицы камеры и проектора и применены модули компенсации искажений и реконструкции ПК «Трекинг».

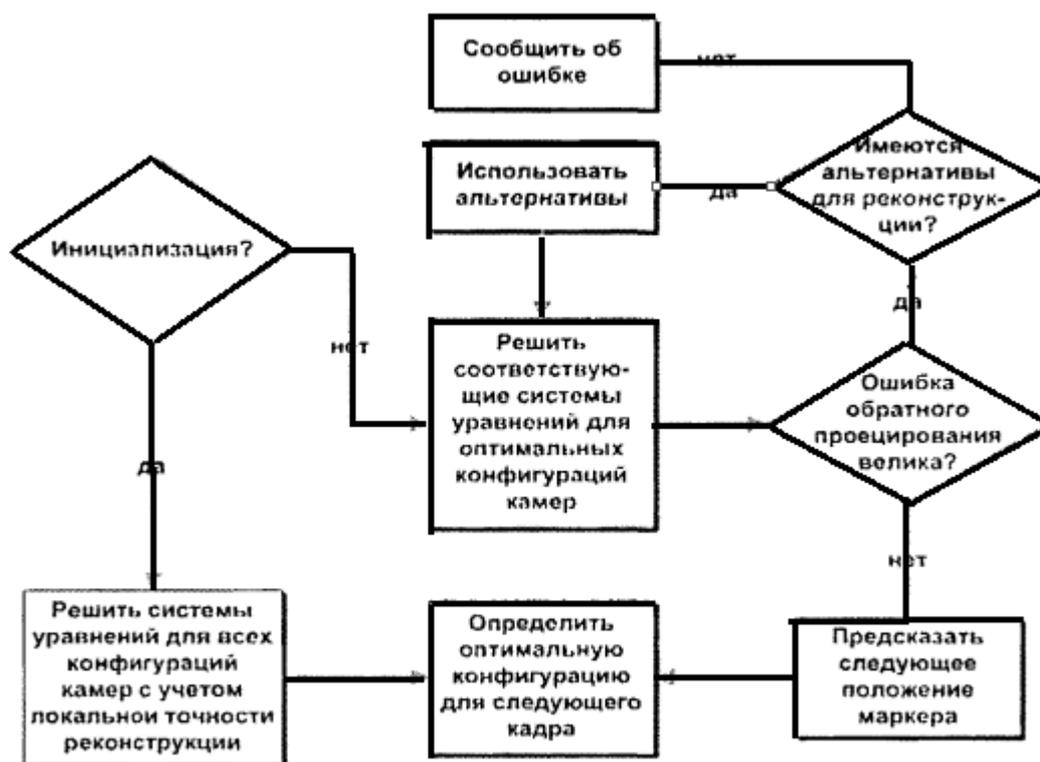


Рисунок 2 – Схема работы алгоритма реконструкции в режиме оптимизации времени вычислений

Кроме того, были измерены производительность и точность работы системы для разных режимов оптимизации. Было показано, что оптимизация точности позволяет ускорить процесс определения реконструированных положений устройств в 2.5 раза без потери точности, а оптимизация времени выполнения – в 6.6 раз, однако с увеличением ошибки реконструкции в 1.4 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Предложена унифицированная архитектура «Трекинг» для создания расширяемых оптических систем слежения реального времени для приложений виртуального окружения.

2. Разработана и исследована структура алгоритмов реконструкции положений объектов в пространстве на основе анализа изображений, включающая комбинированный алгоритм поиска центров образов маркеров на основе анализа параллельных хорд и яркостей точек образов, алгоритм реконструкции, учитывающий её локальную точность и устойчивость, зависящую от конфигурации камер, и управляющий алгоритм, оптимизирующий точность и скорость обработки данных на основе результатов предварительного анализа.

3. На основе разработанной архитектуры и алгоритмов создан программный комплекс «Трекинг», интегрированный с несколькими установками виртуального окружения и интерактивными устройствами.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в лекционный курс «Основы автоматизации проектирования технических изделий».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в рецензируемых журналах

1. Шафар, Н.А. Обучение программированию через разработку динамических игр / Н.А. Шафар // Научные горизонты. – 2019. – №4(20). – С.281 – 284.

2. Шафар, Н.А. Разработка и анализ алгоритмов загрузки файлов на сервер в среде NODE.JS / Н.А. Шафар // Научные горизонты. – 2019. – №3(19). – С.109 – 115.

3. Шафар, Н.А. Особенности платформы MOODLE как виртуальной среды обучения / Н.А. Шафар // Научные горизонты. – 2018. – №9(13). – С.79 – 84.

4. Шафар, Н.А. Использование СОМ-объектных моделей при формировании программных комплексов моделирования технологических процессов / Н.А. Шафар // Научные горизонты. – 2019. – №9(20). – С.199 – 207.

Тезисы конференций

5. Житко, А.П. Образовательная информационная среда подготовки ИТ-специалистов / А.П. Житко, Н.А. Шафар // Компьютерное проектирование и технология производства электронных систем: сборник тезисов 54 научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 23–27 апреля 2018 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники – Минск, 2018. – С. 29.

6. Житко, А.П. Выбор языков программирования для реализации программного средства обучения ИТ-специалистов / А.П. Житко, Н.А. Шафар, А.В. Мищенко // Компьютерное проектирование и технология производства электронных систем: сборник тезисов 54 научной конференции аспирантов,

магистрантов и студентов, Минск, 23–27 апреля 2018 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; отв. ред. Раднёнок А. Л. – Минск, 2018. – С. 67 – 68.

7. Шафар, Н.А. Программная среда разработки приложений виртуального окружения Аванго / Н.А. Шафар, А.П. Житко // Компьютерное проектирование и технология производства электронных систем: сборник тезисов 55 научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22–26 апреля 2019 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники – Минск, 2019 – Принято в печать.

8. Шафар, Н.А. Структура систем виртуального окружения / Н.А. Шафар, А.П. Житко // Компьютерное проектирование и технология производства электронных систем: сборник тезисов 55 научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22–26 апреля 2019 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники – Минск, 2019 – Принято в печать.

РЭЗІЮМЭ
Шафар Мікіта Аляксандравіч
Матэматычнае і праграмнае забеспячэнне лазерна-аптычных
сістэм сачэння рэальнага часу

Ключавыя словы: віртуальнае асяроддзе, сістэмы сачэння, праграмны комплекс Трэкінг, Аванго.

Мэта работы: даследаванне і распрацоўка матэматычнага і праграмнага забеспячэння лазерна-аптычных сістэм сачэння для тэхналогіі віртуальнага асяроддзя.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: праведзены агляд існуючых сістэм сачэння рэальнага часу. Выраблены аналіз існуючага праграмнага забеспячэння для сістэм сачэння. Прапанавана ўніфікаваная архітэктара пашыраецца аптычных сістэм сачэння для устаноў віртуальнага асяроддзя. Прапанаваная структура алгарытмаў рэканструкцыі становішчы аб'ектаў у прасторы па аснове аналізу малюнкаў, якая ўключае камбінаваны алгарытм пошуку цэнтраў вобразаў маркераў на аснове аналізу паралельных хорд і яркасцяў кропак вобразаў, алгарытм рэканструкцыі, які ўлічвае яе лакальную дакладнасць і ўстойлівасць, якая залежыць ад канфігурацыі камер, і кіраўнічы алгарытм, які аптымізуе дакладнасць і хуткасць апрацоўкі дадзеных на аснове вынікаў папярэдняга аналізу

Ступень выкарыстання: вынікі інтэграваны ў навучальны працэс на кафедры праектавання інфармацыйна-камп'ютэрных сістэм установы адукацыі «Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі» у лекцыйны курс «Асновы аўтаматызацыі праектавання тэхнічных вырабаў».

Вобласць ўжывання: віртуальная рэальнасць, штучны інтэлект.

РЕЗЮМЕ

Шафар Никита Александрович

Математическое и программное обеспечение лазерно-оптических систем слежения реального времени

Ключевые слова: виртуальное окружение, системы слежения, программный комплекс Трекинг, Аванго.

Цель работы: исследование и разработка математического и программного обеспечения лазерно-оптических систем слежения для технологии виртуального окружения.

Полученные результаты и их новизна: проведён обзор существующих систем слежения реального времени. Произведен анализ существующего программного обеспечения для систем слежения. Предложена унифицированная архитектура расширяемых оптических систем слежения для установок виртуального окружения. Предложена структура алгоритмов реконструкции положения объектов в пространстве на основе анализа изображений, включающая комбинированный алгоритм поиска центров образов маркеров на основе анализа параллельных хорд и яркостей точек образов, алгоритм реконструкции, учитывающий её локальную точность и устойчивость, зависящую от конфигурации камер, и управляющий алгоритм, оптимизирующий точность и скорость обработки данных на основе результатов предварительного анализа.

Степень использования: результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в лекционный курс «Основы автоматизации проектирования технических изделий».

Область применения: виртуальная реальность, искусственный интеллект.

SUMMARY

Shafar Nikita Aleksandrovich

Mathematical and software of laser and optical real-time tracking systems

Keywords: virtual environment, tracking systems, software package Tracking, Avango.

The object of study: research and development of mathematical and software laser-optical tracking systems for virtual environment technology.

The results and novelty: a review of existing real-time tracking systems. The analysis of existing software for tracking systems. A unified architecture of expandable optical tracking systems for virtual environment installations is proposed. The structure of the algorithms for reconstruction of the position of objects in space on the basis of image analysis is proposed, including a combined algorithm for searching image centers of markers based on the analysis of parallel chords and brightness of image points, a reconstruction algorithm that takes into account its local accuracy and stability, depending on the configuration of the cameras, and a control algorithm that optimizes the accuracy and speed of data processing based on the results of preliminary analysis.

Degree of use: the results were introduced into the educational process at the department of designing information-computer systems of the educational institution «Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics» in the lecture course «Fundamentals of Computer-Aided Design of Technical Products».

Sphere of application: virtual reality, artificial intelligence.