

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

*На правах рукописи*

---

*Подпись аспиранта*

Варлашин Виктор Витальевич

---

*ФИО аспиранта*

АЛГОРИТМЫ И МЕТОДЫ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОКАМЕРНЫХ СИСТЕМ  
КРУГОВОГО ОБЗОРА В КОНТУРЕ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

---

*наименование темы научно-квалификационной работы (заглавными буквами)*

05.02.05 Роботы, мехатроника и робототехнические системы

---

*отрасль науки (шифр и наименование научной специальности)*

15.06.01\_03 Роботы, мехатроника и робототехнические системы

---

*наименование направленности (шифр и наименование направления)*

Академическая степень **Исследователь. Преподаватель-исследователь**

## НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Научный руководитель: д.т.н., профессор ВШАиР, Лопота Александр Витальевич  
*ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью*

Санкт Петербург, 2022

Научный доклад выполнен в высшей школе автоматизации и робототехники Института машиностроения, материалов и транспорта федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: д.т.н., профессор ВШАиР, Лопота Александр Витальевич  
*ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью*

Рецензент: к.т.н., доцент ВШАиР, Бахшиев Александр Валерьевич  
*ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

В настоящее время расширяется спектр задач, решаемых телеуправляемыми и автономными мобильными роботами (МР). МР являются одним из направлений робототехники, которое активно применяется в промышленности, транспортном и военном деле, используется при выполнении аварийно-спасательных работ. Системы управления (СУ) МР усложняются как структурно, так и функционально. Увеличение сложности СУ МР связано, прежде всего, с усложнением решаемых ими задач, а также применяемой в составе МР аппаратуры.

Решение задачи навигации МР опирается во многом на системы технического зрения (СТЗ). СТЗ в составе МР используются для решения, в частности, задач получения и обработки визуальной информации о рабочей среде МР, передачи информации системе управления и оператору на пульт дистанционного управления (ПДУ). При дистанционном управлении (ДУ) МР в сложной недетерминированной среде оператор МР сталкивается с трудностями, возникающими в следствие недостаточной информативности получаемого изображения сцены. В робототехнических системах, способных работать в автономном режиме, требования к глубине обработки визуальной информации существенно возрастает, так как она должна быть включена в контур автономного управления. В настоящее время МР используют комбинацию дистанционного и автономного контуров управления, поэтому разработка алгоритмов и методов для СТЗ, применение которой будет эффективно как в телеуправляемых, так и автономных МР является актуальной.

Одним из перспективных направлений исследований являются использование систем технического зрения кругового обзора. Такие системы являются эффективным средством получения оперативной информации об окружающей робота среде, могут использоваться как средство измерения для принятия решений в задачах навигации благодаря способности оценивать расстояние до объектов окружающей среды и формировать трехмерный образ сцены при визуализации информации на ПДУ оператора. Разработкой подобных систем занимаются как крупнейшие зарубежные (Стэндфордский университет (США), Оксфордский университет (Великобритания)), так и российские (ЦНИИ РТК, НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИПМ им. Келдыша) академические учреждения, так и крупные компании в области автомобилестроения, применяющие системы кругового обзора (СКрО) в

составе систем помощи водителю (англ. ADAS), где СКрО решают схожие задачи.

### **Степень разработанности темы**

В последнее время направление СКрО активно развивается. Большая часть исследований, посвященных развитию СКрО, осуществляется отдельными исследователями и выполняются вне крупномасштабных проектов. В РФ можно выделить НИОКТР «Разработка системы интеллектуального управления и навигации мобильного робототехнического комплекса на основе применения технологий дополненной и виртуальной реальности», который посвящён созданию новых технологий управления МР, предназначенными для решения задач в различных отраслях. НИОКТР посвящен разработке системы супервизорного управления МР, обеспечивающей расширение информационного взаимодействия оператора с МР и окружающей его средой за счет размещения в поле восприятия оператора в режиме реального времени виртуального образа, совмещаемого с видеоизображениями, поступающими с камер МР.

В последнее время опубликован ряд работ, посвященных применению технологий искусственного интеллекта (ИИ), в том числе искусственных нейронных сетей (ИНС) для решения задачи стереосопоставления изображений, полученных с использованием систем кругового обзора, из которых можно выделить SweepNet (авторы Changhee Won, Jongbin Ryu and Jongwoo Lim) – проект, посвященный созданию ИНС для решения задачи стереосопоставления изображений, получаемых СКрО с камерами со сверхширокоугольными объективами. Недостатком этого направления является необходимость применения в составе бортовой системы управления (БСУ) МР или ПДУ производительных вычислителей, что приводит к увеличению энергопотребления и уменьшению времени автономной работы МР и ПДУ.

### **Цель и задачи исследования**

Основной целью диссертационной работы является разработка новых алгоритмов обработки изображений, получаемых с многокамерной СКрО МР со сверхширокоугольными объективами, для последующего применения их в составе контура управления МР, замыкаемого как на оператора МР, так и на БСУ, а также разработка специальных программных средств для моделирования подобного рода систем. Для достижения указанной цели в работе сформулированы и решены следующие задачи:

1 Анализ СКрО на основе камер со сверхширокоугольными объективами, используемых в робототехнике и в автомобилестроении (в системах помощи водителю).

2 Разработка и исследование способов представления информации, получаемой с камер СКрО на основе камер со сверхширокоугольными объективами для повышения эффективности информационного взаимодействия оператора с МР в режиме телеуправления на основе методов виртуальной и дополненной реальности.

3 Разработка и исследование критериев выбора поверхности для проецирования изображений с камер СКрО в режиме дополненной реальности.

4 Разработка и исследование способов построения карты глубины и облака точек, соответствующих объектам рабочего пространства, по изображениям стереопар, образованных камерами СКрО на основе камер со сверхширокоугольными объективами и формирования трехмерного образа окружающего МР пространства.

5 Разработка специальных программных средств компьютерного моделирования СКрО для проведения параметрических исследований имитационных моделей с целью повышения эффективности применения СКрО.

### **Научная новизна**

1 Разработан новый математически обоснованный критерий оценки качества воспроизведения окружающего пространства, основанный на сопоставлении точек, полученных с камер СКрО модели, с точками, полученными в результате проецирования изображений с камер при формировании изображения на ПДУ в режиме дополненной реальности.

2 Разработан новый алгоритм обработки кадров пары ортогонально ориентированных камер со сверхширокоугольными объективами из состава СКрО для получения пары ректифицированных изображений с возможностью последующей обработки и построения карты глубины и облака точек в областях пересечения полей зрения камер.

3 Разработаны имитационные компьютерные модели СКрО, учитывающие конструктивные особенности МР, способ размещения камер на борту МР, а также их внутренние характеристики.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии теории компьютерного зрения в части разработки новых моделей, методов и

критериев с целью расширения возможностей применения СКрО в составе СУ МР.

Практическая значимость исследования состоит в возможности применения его результатов для разработки СТЗ в составе СУ МР, работающих в автономном режиме и в режиме телеуправления. Предложенные в исследовании модели и методы позволят повысить качество информационного взаимодействия оператора с МР и обеспечить возможность, автономной навигации вновь разрабатываемых МР.

Разработанный критерий оценки качества воспроизведения окружающего пространства позволяет сравнивать различные варианты проекционных моделей, применяемых при формировании изображения в режиме дополненной реальности на ПДУ оператора, а также выполнять оптимизацию параметров проекционных моделей. Предложенный метод в общем случае не зависит от выбора точек для сопоставления, а разработанная виртуальная компьютерная модель позволяет использовать параметры, полученные при калибровке камер СКрО для формирования цифрового двойника МР, используемого в дальнейшем для решения задачи оптимизации параметров проецирования и выбора наилучшей формы поверхности в зависимости от конструктивных особенностей МР.

Разработанный алгоритм обработки кадров для получения ректифицированных изображений основан на использовании аппроксимационных моделей камер, описывающих систему «матрица-объектив» как единое целое. Используемый в работе подход в общем случае не зависит от применяемой аппроксимационной модели, что позволяет говорить о его универсальности. Используемый в работе подход с применением табличных преобразований (англ. LUT, Look-up table) соответствия пиксельных координат выходного изображения входному позволяет свести задачу стереосопоставления к классической, для которой применимы широко распространенные подходы, основанные на триангуляции и эпиполярной геометрии, что позволяет снизить требования к бортовому вычислителю автономного МР.

### **Методология и методы исследования**

При исследовании качества воспроизведения сцены для определения наилучших значений параметров моделей используются методы однокритериальной и многокритериальной оптимизации. При обработке результатов экспериментов используются статистические методы обработки экспериментальных данных. Для программной реализации компьютерных моделей использованы методы структурного и объектно-ориентированного

анализа и программирования. Предложенные решения апробированы с помощью виртуальных компьютерных экспериментов на имитационных моделях конкретных СТЗ, в частности, СКрО с камерами со сверхширокоугольными объективами.

### **Степень достоверности и апробация работы**

Проверка достоверности научных положений, изложенных в работе, результатов диссертации и основных выводов осуществляется за счет анализа состояния исследований в данной области, согласования теоретических выводов с результатами экспериментальной проверки предложенных методов и критериев с использованием верифицируемых имитационных моделей, а также апробацией основных теоретических положений диссертации в печатных трудах, докладах на международных научных специализированных конференциях и апробацией в проектах конкретных систем технического зрения различного назначения.

Разработанные компьютерные модели и критерии были успешно применены в создании новых систем управления роботами (диссертационное исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90094 «Исследование методов оценки расстояний до объектов окружающей среды с использованием системы кругового обзора мобильных роботов»), Результаты исследования внедрялись в рамках выполнения НИОКТР АААА-А17-117060110052-8 «Разработка системы интеллектуального управления и навигации мобильного робототехнического комплекса на основе применения технологий дополненной и виртуальной реальности». Результаты исследований использовались при подготовке учебного курса «Техническое зрение» СПбПУ. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались в 2018 – 2022 годах на Международной научной конференции по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения»-2019 (г. Курск), 29-ой Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника и конверсионные тенденции», 33-ей Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» (г. Санкт-Петербург).

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 6 печатных работ, включая 3 публикаций в научных журналах, рекомендованных ВАК («Мехатроника, автоматизация, управление», «Робототехника и техническая кибернетика»), 1 публикация в издании, индексируемом в WoS/Scopus.

### **Личный вклад автора**

Основные научные положения, математические и имитационные модели, критерии, практические решения, результаты тестирования и теоретические выводы сформулированы и выполнены автором самостоятельно.

### **Представление научного доклада: основные положения**

1 Разработана имитационная параметризованная виртуальная модель СКрО.

2 Разработано ПО отображения окружающего МР пространства в режиме дополненной реальности.

3 Разработан математически обоснованный критерий выбора формы поверхности для проецирования изображений с камер СКрО в режиме дополненной реальности.

4 Разработан алгоритм поиска оптимальных параметров формы поверхности для проецирования.

5 Разработан алгоритм ректификации изображений с камер со сверхширокоугольными объективами в областях наибольших искажений.

6 Разработан метод построения карты глубины по изображениям стереопары со сверхширокоугольными объективами.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, приводится степень ее разработанности. Выполняется постановка цели и задач исследования, осуществляется выбор предмета, объекта и методов исследования. Формулируются положения, выносимые на защиту диссертационного исследования.

**В первой главе** рассматривается современное состояние средств и методов СТЗ, в том числе применяемые в составе СКрО.

Проанализированы и классифицированы современные средства СТЗ, применяемые в составе МР, а также в составе систем помощи водителю. Обзор показал, что в составе СТЗ применяются такие устройства как камеры (видимого и инфракрасного спектров, в том числе и термальные), стереокамеры, ультразвуковые и лазерные дальномеры (в том числе и сканирующие), радары и лидары, времяпролетные камеры и камеры со структурированной подсветкой. Выполнен обзор методов СТЗ, применяемых для обработки данных, поступающих от средств СТЗ.

Методы применения СТЗ в транспортных средствах (ТС) и МР в большей степени опираются на возможности камер, работающих в видимом спектре электромагнитного излучения. Современные цифровые камеры, используемые в составе МР и ТС, обладают характеристиками, которые позволяют им решать задачи обнаружения, классификации, сегментации, измерения расстояний. Кроме того, СТЗ на базе камер могут использоваться для организации телеоператорного контура управления. Расположение камер в составе СТЗ ТС и МР имеет особенности, связанные с тем, что чаще всего объект управления (ОУ) не попадает в область видимости камер, что не позволяет получать оперативную информацию о взаимном расположении ОУ и объектов окружающей среды ТС или рабочего пространства МР.

Одним из актуальных направлений в СТЗ МР являются СКрО на основе камер со сверхширокоугольными объективами. Применение таких систем позволяет решать одновременно несколько задач, например, построение вида «от третьего лица» в режиме дополненной реальности путем введения в поле зрения оператора дополнительных данных о среде функционирования МР, оперативной обстановке, техническом состоянии МР, а также определении расстояний до объектов рабочего пространства.

Делаются выводы о необходимости разработки алгоритмов и методов для СКрО с камерами со сверхширокоугольными объективами, применение которой будет эффективно как в телеуправляемых, так и автономных МР.

**Во второй главе** рассматривается задача моделирования СКрО. Выполнен аналитический обзор существующих подходов к моделированию оптических камер и СКрО в частности. По результатам обзора выделены четыре основных подхода:

- с использованием САД-пакетов;
- с использованием симуляторов роботов;
- с использованием симуляторов ТС;
- с использованием ПО разработки компьютерных игр.

Моделирование в САД-пакетах является наименее распространенным и в дальнейшем данный подход не рассматривается. Перспективными являются симуляторы роботов (рассмотрены 10 симуляторов) и симуляторы ТС (рассмотрены 11 симуляторов). Анализ возможностей симуляторов показал, что наибольшими возможностями обладают симуляторы ТС, в основе которых лежит программное обеспечение (ПО) для разработки компьютерных игр.

С учетом направления диссертационного исследования, по результатам обзора делается вывод о том, что для имитационного моделирования СКрО с камерами со сверхширокоугольными объективами подходит ПО для

разработки компьютерных игр, например, Unity и Unreal Engine. Для дальнейших исследований выбран ПО Unity с интегрированной кроссплатформенной средой разработки.

Имитационная модель системы кругового обзора состоит из следующих элементов:

- СКрО с камерами со сверхширокоугольными объективами;
- виртуальная модель МР, учитывающая его геометрические особенности;
- модель рабочего пространства МР;

В качестве моделей робота используются геометрическая модель МРК «Капитан» ЦНИИ РТК и МР «Turtlebot 3» ф. Turtlebot.

Имитационная модель является параметризованной, с возможностью изменения таких параметров как:

- положение камеры СКрО в пространстве относительно корпуса МР;
- ориентация камер СКрО в пространстве с использованием углов Эйлера;
- выбор формата матрицы и разрешения выходного изображения камер СКрО в пикселах;
- выбор математической модели камеры (типа проекции) с возможностью моделирования сверхширокоугольных объективов;
- внесение искажений в выходные изображения (смещение центра проецирования относительно центра выходного изображения, дисторсия изображения);

Математическая модель камеры, используемая в составе имитационной модели может соответствовать одной из идеальных моделей сверхширокоугольных камер (стереографическая, эквидистантная, азимутальная и ортографическая), так и модели, учитывающие искажения, вносимые оптической системой, в виде полиномов. Ими являются модель Канналы и Брандта, модель Мея, модель Скарамуццы и модель двух сфер.

Делаются выводы о достаточности возможностей ПО для разработки игр для имитационного моделирования СКрО с камерами со сверхширокоугольными объективами.

**В третьей главе** рассматривается применение СКрО в контуре телеоператорного управления МР. Рассмотрены способы отображения информации на ПДУ оператора. Основными режимами являются построение панорамы кругового обзора, вида сверху и вида «от третьего лица»

Обзор существующих исследований в области применения технологий дополненной реальности для повышения адекватности восприятия

оператором окружающей среды показал, что основным способом отображения полученной с помощью СКрО информации является построение вида «от третьего лица» (англ. third-person view), получаемого путем совмещения виртуальной модели МР с изображениями с камер СКрО, объединяемых в панорамное изображение, которое в дальнейшем проецируется на внутреннюю часть поверхности типа «чаша» (англ. bowl).

Основным элементом является панорама кругового обзора, получаемая путем объединения изображений с камер СКрО. Для получения изображения в режиме вида «от третьего лица» предлагается проецировать полученную панораму на поверхность, описываемую уравнениям

$$\begin{cases} z = 0, & 0 < r < R, 0 \leq \varphi \leq 2\pi \\ z = \sin\left(\frac{(r - R) \cdot \pi}{2}\right), & R < r \leq 2R, 0 \leq \varphi \leq 2\pi \end{cases}$$

где  $R$  – радиус скругления поверхности.

С использованием пакета Blender и UV-преобразования разработана развертка для наложения вида сверху, полученного с помощью панорамы кругового обзора, на внутреннюю часть поверхности (рисунок 1).

Получение вида сверху осуществляется с использованием перехода от декартовых координат к цилиндрическим:

$$\begin{aligned} x &= \rho \cdot \cos(\varphi) \\ y &= \rho \cdot \sin(\varphi), \end{aligned}$$

где  $\rho$  и  $\varphi$  – пиксельные координаты исходного изображения,  $x$  и  $y$  – пиксельные координаты выходного изображения.

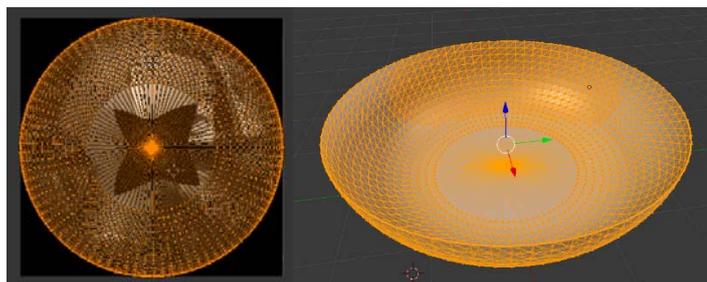


Рисунок 1 – Построение развертки с использованием пакета Blender

Для визуализации различных режимов отображения информации на экране разработано программное обеспечение (ПО) с использованием движка Unity. Алгоритмы работы с изображениями разработаны с использованием библиотеки алгоритмов компьютерного зрения OpenCV.

Делаются выводы об эффективности применения ПО для разработки компьютерных игр в задаче визуализации информации, поступающей со

СКрО на ПДУ оператора. Применение методов дополненной реальности позволяет получить более детальную информацию о расположении МР в рабочем пространстве.

**В четвертой главе** выполняется разработка и исследование критериев выбора поверхности для проецирования изображений.

На современном этапе развития технологии построения вида «от третьего лица» нет математически обоснованного критерия оценки качества воспроизведения сцены для выбора формы поверхности для проецирования изображений с камер СКрО, а также критерия выбора значений параметров проецирования.

На примере предложенной в третьей главе формы поверхности для проецирования исследуется возможность применения критерия типа среднеквадратическая ошибка модели (англ. Mean Square Error, MSE).

Рассчитывается MSE положения точек, соответствующих одним и тем же объектам на полученном изображении в режиме дополненной реальности, и реальной позиции объектов, полученных с использованием «эталонного» изображения. Под «эталонным» изображением понимается изображение, получаемое с использованием виртуальной модели при помощи камеры, расположенной над роботом.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2)}{n},$$

где  $(\hat{x}_i, \hat{y}_i)$  , – координата  $i$ -ой точки на эталонном изображении,  $(x_i, y_i)$  – координата  $i$ -ой точки на синтезированном изображении,  $n$  – количество сопоставляемых точек.

На рисунке 2 представлен пример точек, которые можно использовать для расчета MSE.

Для повышения точности и надежности исследования используются реперные метки типа ArUco-маркеры, относящиеся к фидуциальным маркерам, позволяющим сохранять работоспособность при возникновении окклюзий, а наличие словаря с известными маркерами позволяет в дальнейшем безошибочно сопоставлять точки маркеров на изображениях.

Используя предложенный критерий сравниваются различные формы поверхности для проецирования. Недостатком прямого сравнения различных форм поверхностей является отсутствие лучшего набора параметров, описывающего каждую форму. Используя значение среднеквадратичной ошибки в качестве целевой функции, можно решать задачу поиска оптимальных параметров:

$$f(\vec{x}) \rightarrow \min_{\vec{x} \in X},$$

где  $\vec{x}$  – вектор оптимизируемых параметров для каждой формы.

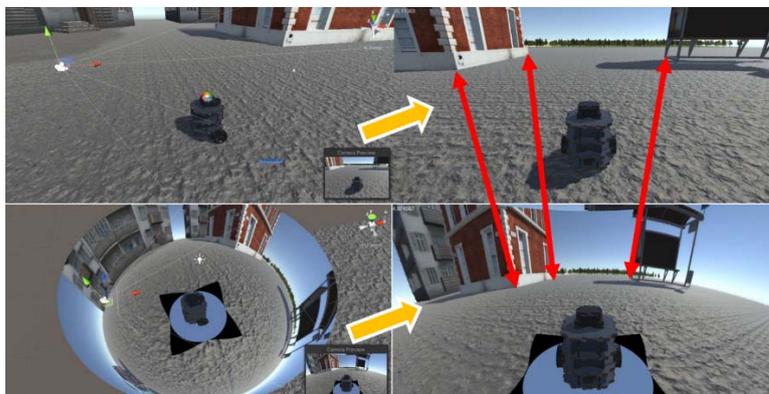


Рисунок 2 – «Эталонная» камера (сверху слева) и изображение с нее (сверху справа) и камера модели дополненной реальности (снизу слева) и изображение с нее (снизу справа). Двусторонними стрелками обозначены точки, которые могут быть использованы при оценке качества проецирования изображений

Задача поиска оптимального значения параметра используемой модели решается на примере предложенной формы методом перебора (равномерного поиска) с учетом ограничений, накладываемых на изменяемые параметры.

Для выполнения аналогичной адаптации в реальных системах предложено использовать цифровой двойник МР и его СКрО. Полученные в результате калибровки СКрО параметры используются в качестве параметров имитационной модели совместно с САД-моделью МР.

Делаются выводы об эффективности предложенного критерия для решения задачи определения оптимальных параметров формы поверхности для проецирования изображений при работе СКрО в режиме дополненной реальности. Предложенный способ с построением цифрового двойника для калибровки реальных СКрО в составе МР.

**В пятой главе** рассматривается применение СКрО в контуре автономного управления МР. В частности, рассматривается задача оценки расстояний до объектов рабочего пространства МР с использованием методов стереозрения.

Обзор различных вариантов СКрО, обеспечивающих стереозрение, позволяет классифицировать их по группам в зависимости от особенностей конструкции, из которых выделены следующие как представляющие наибольший интерес в рамках исследования:

- катадиоптрические системы с плоскими и параболическими

зеркалами;

– многокамерные системы с различными вариантами расположения камер в пространстве.

Катадиоптрические системы являются сложными в изготовлении, а также менее надежными за счет применения зеркал, поэтому более перспективным является применение многокамерных систем.

Многокамерные системы, в свою очередь, можно классифицировать по количеству камер в составе СКрО, их пространственному расположению, а также применяемым в составе камер объективам. Исследование показало, что актуальными являются исследования в области систем стереозрения со сверхширокоугольными объективами. Рассматриваются стереопары с различными вариантами расположения оптических осей камер:

- однонаправленные параллельные;
- противоположно направленные коллинеарные;
- ортогонально ориентированные пересекающиеся.

С типовых вариантов расположения камер СКрО на борту МР и в составе ТС, для дальнейших исследований выбран третий вариант расположения оптических осей камер СКрО. На рисунке 3 представлена схема стереопары, образованной камерами со сверхширокоугольными объективами и пример изображений, захватываемых с них. Применение методов стереозрения для поиска точек, соответствующих одним и тем же объектам на изображениях с такой стереопары, является затруднительным ввиду того, что точки не лежат на одной прямой (изображения не ректифицированы), а искажения, вносимые объективами, не позволяют применять существующие алгоритмы.

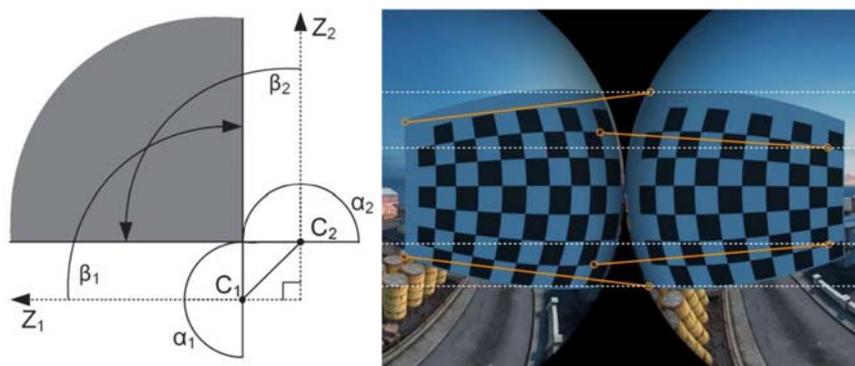


Рисунок 3 – Схема стереопары, образованной камерами со сверхширокоугольными объективами (слева) и изображения объекта, полученные со стереопары (справа)

Для устранения искажений разработан алгоритм ректификации изображений. Схема преобразования представлена на рисунке 4.

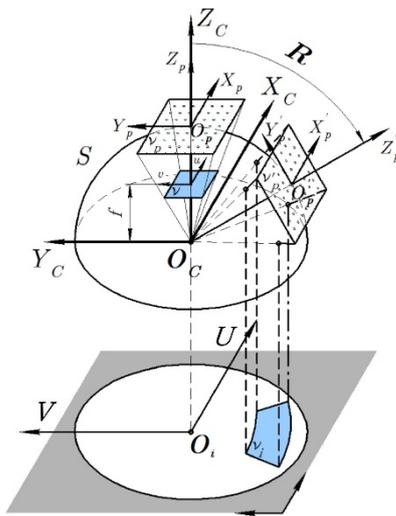


Рисунок 4 – Схема устранения искажений

В основе алгоритма лежит принцип нахождения соответствий между пикселями исходного изображения и выходного изображения. Для схемы на рисунке 3 выходное изображение интерпретируется как захваченное с «виртуальной» камеры-обскуры, имеющей углы обзора  $90^\circ$  по вертикали и по горизонтали, и повернутой вокруг оси  $X_c$  на  $45^\circ$ . Для нахождения соответствий выполняются следующие действия:

1 Каждому пикселу «виртуальной» камеры ставится в соответствие точка в системе координат исходной камеры

$$(x_c, y_c, z_c)^T = z_c \left( \frac{u}{f}, \frac{v}{f}, 1 \right)^T,$$

где  $[x_c, y_c, z_c]^T$  – точка в пространстве в системе координат исходной камеры,  $u$  и  $v$  – пиксельные координаты,  $f$  – фокусное расстояние.

2 Координаты точек областей  $v_p$  и  $v'_p$  связаны преобразованием поворота  $R$  вокруг оси  $X_c$  на  $45^\circ$ .

$$(X_c, Y_c, Z_c)^T = R \cdot [x_c, y_c, z_c]^T,$$

3 Каждой точке области  $v'_p$  с использованием обратной проекции в соответствии с выбранной математической моделью камеры ставится в соответствие точка область  $v_i$  исходного изображения. Выбранная в качестве примера модель Скарамуцци связывает точки на исходном изображении с точкой в пространстве в системе координат камеры по формуле

$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} U \\ V \\ a_0 + a_2 \rho^2 + a_3 \rho^3 + a_4 \rho^4 \end{pmatrix},$$

где  $a_0 \dots a_4$  – коэффициенты, описывающие радиальные искажения,  $\lambda$  –

масштабный коэффициент,  $\rho = \sqrt{U^2 + V^2}$  – расстояние от оптического центра исходного изображения до пикселя с координатами  $U$  и  $V$ .

В общем случае ориентация области  $v_p$ , относительно  $v'_p$  связана преобразованием поворота  $R$ , которое может быть задано углами Эйлера. Для каждой камеры стереопары поворот выполняется в зависимости от ориентации оптических осей камер пары. В частности, для схемы на рисунке 3 поворот первой камеры  $45^\circ$ , поворот второй камеры минус  $45^\circ$ . Отметим, что в предложенном алгоритме модель камеры может быть заменена, что делает алгоритм универсальным. Результат устранения искажений представлен на рисунке 5. Пунктирной линией выделена область, в которой устраняются искажения.

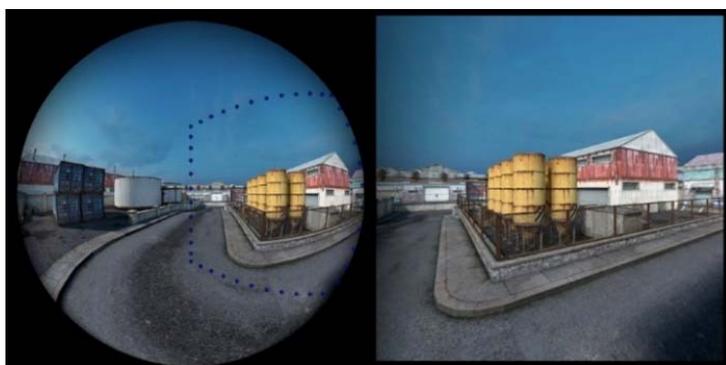


Рисунок 5 – Изображение до устранения искажений (слева) и после (справа)

Калибровка отдельных камер стереопары и пары в целом осуществляется с использованием паттерна типа «шахматная доска» по методу, предложенному Z. Zhang с использованием набор инструментов Computer Vision Toolbox из пакета MATLAB.

Используя существующие методы восстановления образа сцены в виде облака точек, выполнена оценка погрешности определения расстояния до объектов с использованием виртуального графического примитива в виде прямоугольника с нанесенной на его поверхность текстурой, располагаемого в области пересечения полей зрения камер. В качестве меры погрешности использована ошибка отклонения точек облака, соответствующих положению прямоугольника в пространстве, от заданной позиции примитива. Пример облака точек, используемого для оценок, представлен на рисунке 6.

В ходе проведения исследований использовались различных математические модели камер со сверхширокоугольными объективами в составе алгоритма. Результаты исследований показывают близкие значения оценки расстояния.

Полученные в ходе проведения имитационного моделирования наборы данных использовались для построения карты местности, реализованной в

модели. Для построения карты использованы функции и методы, реализованные во фреймворке ROS.

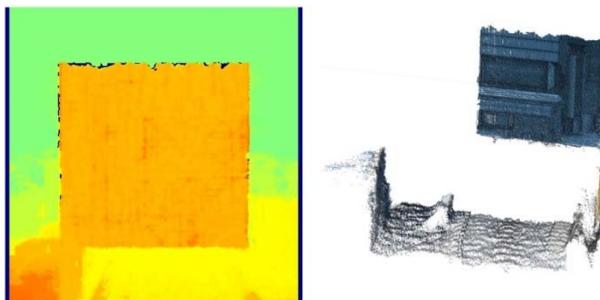


Рисунок 6 – Пример облака точек, полученного в результате обработки изображений, используемого для оценки погрешности.

Делаются выводы о возможности применения предложенного метода построения карты глубины и облака точек в составе контура управления автономного МР для построения карты местности.

### **Объекты, предмет и методы исследования**

Объектом исследования являются СТЗ МР на основе СКрО с камерами со сверхширокоугольными объективами, расположенными как на корпусе МР, так и в составе единого модуля кругового обзора.

Предметом исследования являются режимы работы СКрО в контуре управления МР и способы обработки и представления визуальной информации.

Методом исследования является имитационное компьютерное моделирование.

### **Результаты и их обсуждение**

В результате выполнения научно-квалификационной работы:

1 Исследованы современные средства и методы СТЗ, применяемые в МР и ТС с целью определения актуальных направлений исследований. Выделены СКрО с камерами со сверхширокоугольными объективами, являющиеся наиболее перспективными и наименее развитым направлением.

2 Исследованы способы моделирования СТЗ МР и ТС. Показано, что подход с использованием ПО для разработки компьютерных игр является наиболее эффективным методом разработки имитационных моделей СТЗ МР и ТС, в частности, СКрО с камерами со сверхширокоугольными объективами.

3 Разработано ПО для имитационного моделирования СКрО с камерами со сверхширокоугольными объективами. Модель является параметризованной, с возможностью изменения большого числа внутренних

(англ. intrinsic) и внешних (англ. extrinsic) параметров камеры, в частности, с возможностью выбора математической модели камер.

4 Реализовано ПО для визуализации информации, поступающей с СКрО в различных режимах. Разработан режим дополненной реальности с использованием ПО для разработки компьютерных игр.

5 Разработан математически обоснованный критерий оценки качества воспроизведения сцены для сравнения различных вариантов формы поверхности и поиска оптимальных параметров, описывающих формы.

6 Разработан метод ректификации изображений с камер со сверхширокоугольными объективами в областях наиболее сильных искажений. Результат ректификации позволяет использовать камеры СКрО с камерами со сверхширокоугольными объективами для построения карты глубины и облака точек. Полученный трехмерный образ сцены может быть использован в контуре СУ автономного МР для построения карты местности.

Цель, поставленная в начале работы, достигнута, задачи выполнены. Внедрение разработанных методов и способов в составе СКрО существующих МР, использование разработанных моделей при проектировании новых МР позволит способствовать повышению эффективности решения задач телеуправления и автономной навигации.

### **Заключение**

Предложенные в ходе выполнения работы модели, алгоритмы, методы и программные средства, направленные на создание СКрО с камерами со сверхширокоугольными объективами, а также их практическая реализация представляют собой комбинированное решение актуальной научно-технической задачи создания новых СТЗ МР и ТС для решения задач телеуправления и автономной навигации. Предложенные алгоритмы и методы дают возможность расширения функциональных возможностей существующих МР и ТС, позволяют повысить качество информационного взаимодействия операторов с телеуправляемыми МР. Можно утверждать, что разработанные методы являются очередным шагом в развитии СКрО с камерами со сверхширокоугольными объективами.

## Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

### Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1. Система кругового обзора реального времени для мобильных робототехнических комплексов / В. В. Варлашин, М. А. Ершова, В. А. Буняков, О. А. Шмаков // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019 – Т. 20 – № 3 – С. 162-170. – DOI 10.17587/mau.20.162-170.

2. Варлашин, В. В. Оптимизация параметров проецирования системы кругового обзора с использованием реперных меток / В. В. Варлашин, А. В. Лопота // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2022 – Т. 23 – № 2 – С. 97-103. – DOI 10.17587/mau.23.97-103.

3. Варлашин В.В. Методика построения карты глубины по изображениям пары ортогонально ориентированных камер со сверхширокоугольными объективами / В. В. Варлашин // Робототехника и техническая кибернетика. – 2022 – Т.10 – № 3 – С. 236-240. – DOI 10.31776/RTSJ.10309.

### В зарубежных изданиях, индексируемых в Web of Science/Scopus

4. Varlashin, V., Semakova, A.A., & Shmakov, O.A. (2019). Real-Time Surround View System for Mobile Robots. Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings” (альтернативная ссылка с elibrary - Varlashin, V. Real-time surround view system for mobile robots / V. Varlashin, A. Semakova, O. Shmakov // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2020 – Vol. 154 – P. 465-476 – DOI 10.1007/978-981-13-9267-2\_38).

### Публикации в других изданиях

5. Система кругового обзора с технологией дополненной реальности для управления мобильными роботами / В. В. Варлашин, М. А. Ершова, В. А. Буняков, О. А. Шмаков // Экстремальная робототехника. – 2018 – Т. 1 – № 1 – С. 442-450.

6. Маслов, А. В. Система кругового обзора мобильного робота / А. В. Маслов, В. В. Варлашин // Неделя науки СПбПУ : материалы научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 19–24 ноября 2018 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». – 2018 – С. 71-74.