

На правах рукописи



Антипов Владимир Алексеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ
КАМЕРЫ В СИСТЕМЕ ПРИКЛАДНОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСШИРЕННОГО ФИЛЬТРА
КАЛМАНА**

Специальность 2.2.13

Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир – 2021

Работа выполнена в Центре искусственного интеллекта и цифровой экономики ФГБОУ ВО «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова».

Научный руководитель:

Приоров Андрей Леонидович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры инфокоммуникаций и радиопизики ФГБОУ ВО «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова», г. Ярославль.

Официальные оппоненты:

Костров Борис Васильевич

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электронных вычислительных машин ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», г. Рязань

Самойлов Сергей Александрович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир

Ведущая организация:

ПАО «Ярославский радиозавод», г. Ярославль

Защита диссертации состоится «22» сентября 2021 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.281.01 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ корп.3, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых и на сайте <http://diss.vlsu.ru>

Автореферат разослан 09.07.2021 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, РТ и РС Самойлову А.Г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Самойлов А.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день системы технического зрения широко востребованы в разных областях науки, техники, медицины и промышленности. Техническое зрение может применяться для создания различных радиотехнических систем, примерами которых могут выступать системы прикладного телевидения (СПТ). Системы прикладного телевидения предназначены для передачи и приема изображений в промышленности, науке, образовании, медицине, военном деле, сфере безопасности и других областях.

Многие задачи, которые решают СПТ требуют получения информации о месторасположения того или иного объекта и локализации камеры. С помощью такой информации можно решить такие задачи как обнаружение и оценка параметров движущихся объектов, навигации в пространстве, автоматизирования процессов видеофиксации требуемых событий, исследования труднодоступных или опасных для человека мест. Сложность задачи определения месторасположения объектов и локализации камеры характеризуется множеством самых разнообразных проблем, начиная с неравномерного освещения и заканчивая проблемами различных радиопомех и переотражений от внешних источников сигналов. Также сложность решения этой задачи обусловлена с затруднениями реализации каналов связи. Из-за выше перечисленных проблем возникает необходимость в создании систем прикладного телевидения способных решать задачи определения месторасположения объектов в плохо обусловленных и зашумленных средах.

Перспективным, быстро развивающимся и востребованным направлением в СПТ являются одновременная локализация и картографирование (SLAM). Значительный вклад в разработку методов и алгоритмов решения задачи SLAM внесли работы таких ученых как П. Смита, П. Чизмена, В.И. Кобера, Е.Н. Сосновой, С.Л. Зенкевича, В.С. Лемпицкого, А. Девисона, Р. Парра, А. Элизара, Д.В. Солдатовой и др.

Задача SLAM – синхронное определение местоположения и составление карты. Она связана с построением карты неизвестного пространства мобильным устройством во время навигации по строящейся карте. Проблема одновременной локализации и построения карты является фундаментальной задачей для создания автономных мобильных платформ и алгоритм SLAM является базовым методом для большинства навигационных систем.

Алгоритмы SLAM позволяют решать такие задачи как:

- 1) Создание беспилотных транспортных средств и систем помощи водителю. Решение этой задачи обеспечивает повышение мобильности населения, эффективности грузопассажирских перевозок, повышение безопасности дорожного движения, снижение экологической нагрузки на окружающую среду, повышение комфортности водителей и пользователей транспорта.
- 2) Поиск и спасение людей. С помощью алгоритмов SLAM беспилотный летательный аппарат (БЛА, БПЛА) способен быстро находить человека и доставлять жизненно важный груз, а также детектировать опасность. Тем самым это дает возможность вовремя обнаружить, оказать первую

медицинскую помощь и эвакуировать в безопасное место терпящих бедствие людей.

- 3) Детектирование и сопровождение объектов. В настоящее время идет широкое внедрение систем видеоаналитики в различные сферы жизни людей. С помощью алгоритмов SLAM можно способствовать решению таких задач, как наблюдение за объектами интереса или посторонними, обнаружение несанкционированного проникновения на охраняемые зоны или появления человека в опасных зонах. Также алгоритмы SLAM могут стать важной составляющей любой интеллектуальной транспортной системы.
- 4) Исследование труднодоступных мест. Алгоритмы SLAM могут применяться к быстрому оперативному получению точной информации о радиационной, химической и биологической обстановке местности для дальнейшего планирования эффективных мер по ликвидации опасности, а также применяться для построения детальных карт при поиске различных ресурсов.
- 5) Исследование космоса. При исследовании поверхности планет необходимы аппараты, оснащенные автономной навигационной системой, позволяющей аппарату передвигаться по сложному рельефу местности. Такая система должна работать несколько лет, делать точную карту и давать оценку локализации относительно нее, а также должна быть способна рационально использовать энергетические ресурсы.

Степень разработанности темы. Задача локализации может быть решена с помощью других систем, таких как системы глобального позиционирования (GPS, ГЛОНАСС и др.) или системы локального позиционирования (локальные беспроводные сети WLAN, Bluetooth – маяки, RFID метки и т.д.), но эти системы либо имеют высокую погрешность, либо плохо работают в плохо обусловленных и зашумленных средах. Основными преимуществами способа локализации с помощью алгоритма SLAM перед другими способами являются:

- 1) Отсутствие необходимости реализации различных сетей.
- 2) Отсутствие необходимости в заранее заданных координатах опорных точек и предварительной разметке местности.
- 3) Способность работать в плохо обусловленных и зашумленных средах.
- 4) Низкие экономические затраты. Для реализации СПТ с алгоритмом SLAM необходимы пара датчиков и одноплатный компьютер.
- 5) Построение детализированной карты, с помощью которой автономные роботизированные платформы могут взаимодействовать с окружающей средой.

Также SLAM имеет следующий недостаток:

1) Ошибка локализации имеет свойство накапливаться. Однако, есть, например, алгоритмы замыкания, которые частично решают эту проблему.

На сегодняшний день существует множество различных подходов к задаче SLAM с использованием разных типов сенсоров: лидары, сонары, камеры. Исследования разработок в данной области показывает, что на сегодняшний день основными методами являются методы на основе расширенного фильтра Калмана, фильтра частиц и графов.

Решения, основанные на расширенном фильтре Калмана, дают более высокую точность построения карты по сравнению с фильтром частиц при одинаковом количестве ориентиров, но имеют квадратичную вычислительную сложность и высокую чувствительность к соответствию ориентиров.

Алгоритмы SLAM, основанные на фильтре частиц, имеют линейную вычислительную сложность и возможность убирать ошибочные соответствия ориентиров, но ошибки каждой частицы привносят вклад в общую карту и накапливаются с течением времени.

Алгоритмы, использующие графы, представляют карту в виде узлов (месторасположения камеры в определенные моменты времени) и ребер (оценку перемещения между двумя позициями камеры), что дает линейную зависимость требуемой памяти от количества объектов на карте и делает обновление графа постоянным по времени. Но данные алгоритмы имеют высокую вычислительную сложность внутри узла из-за задачи поиска ближайших точек, а также окончательная оптимизация графа может потребовать больших вычислительных затрат.

В каждой области, где требуется определить месторасположения камеры, существуют свои требования к точности нахождения месторасположения. Например, для дорожной навигации в большинстве случаев достаточно точности в 5 метров. С другой стороны, для создания автономных транспортных средств необходима высокая точность определения местоположения, с целью предотвращения аварий и соблюдения правил дорожного движения. Алгоритмы SLAM являются рекуррентными алгоритмами, у которых текущая оценка месторасположения зависит от предыдущей оценки. Если немного повысить точность оценки месторасположения на каждой итерации, то значительно повысится результирующая оценка. При плохой точности алгоритмы невозможно применять для построения карт крупномасштабных сцен и решать задачи навигации по ним. Таким образом, существует научная проблема, связанная с необходимостью повышения точности построения карты и локализации относительно нее, и уменьшения вычислительной сложности.

Основной целью работы является повышение точности оценки месторасположения камеры в системе прикладного телевидения.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе решаются следующие **задачи**:

1. Разработка алгоритма одновременной локализации и построения карты с использованием камеры и лазерной сканирующей системы.
2. Разработка алгоритма визуальной одометрии с использованием сферической модели камеры.
3. Определение матриц измерения и их якобиана для ориентира типа «особая точка» с использованием сферической модели камеры.
4. Улучшение алгоритмов детектирования пространственных ориентиров по данным лазерной сканирующей системы.
5. Исследование алгоритмов одновременной локализации и построения карты на основе расширенного фильтра Калмана.

6. Сравнение визуальных алгоритмов одновременной локализации и построения карты.

Объектом исследования является измерительная система прикладного телевидения в составе автономной мобильной платформы.

Предметом исследования являются алгоритмы цифровой обработки изображений и дальнометрических данных, позволяющие детектировать ориентиры и локализовать камеру в пространстве найденных ориентиров.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались современные методы прикладного телевидения, технического зрения, цифровой обработки сигналов и изображений, математической статистики и линейной алгебры. Для практической реализации алгоритмов применялись современные методы программирования на языке высокого уровня Python 2.7 с использованием библиотеки компьютерного зрения OpenCV 3.0, библиотеки матричных вычислений NumPy, библиотеки для выполнения научных и инженерных расчетов SciPy, фреймворка для программирования робототехнических систем Robot Operating System Kinetic (ROS Kinetic), трехмерного динамического симулятора Gazebo с возможностью точного и эффективного моделирования робототехнических систем и инструмента визуализации Rviz. Моделирование и экспериментальные исследования предлагаемых алгоритмов выполнялись на мобильной платформе с установленной камерой и лидаром.

Научная новизна

Получены следующие новые научные результаты:

Получены следующие новые научные результаты:

- 1) Разработан обобщенный алгоритм EKF-SLAM, отличающийся возможностью интеграции нескольких типов датчиков и использования нескольких оценок состояния системы, полученных разным путем, для уточнения параметров системы в расширенном фильтре Калмана. А также алгоритм отличается тем, что позволяет рассматривать сложные динамические системы (группа мобильных платформ), формировать и обрабатывать локальные карты по заданным критериям.
- 2) Разработан алгоритм одновременной локализации камеры и построения карты и его модификации с использованием камеры и лазерной сканирующей системы, отличающиеся интеграцией двух типов датчиков в расширенном фильтре Калмана, применением сферической модели камеры и контурного анализа. Алгоритм позволяет строить карту, состоящую из вектора состояния и ковариационной матрицы, двумерную карту проходимости, а также трехмерную карту окружающей среды.
- 3) Улучшены алгоритмы детектирования пространственных ориентиров по данным лазерной сканирующей системы. Алгоритмы отличаются дополнительным преобразованием данных лидара в комплекснозначный сигнал и его делением на сегменты.
- 4) Разработан алгоритм построения локальных карт с равномерным использованием ориентиров. Алгоритм отличается от остальных алгоритмов построения локальных карт тем, что учитывает корреляцию между всеми ориентирами с сохранением линейной вычислительной сложности.

- 5) Разработан алгоритм реконструкции трехмерной сцены. Алгоритм отличается тем, что в процессе реконструкции используются панорамные изображения, полученные от камеры с объективом типа «рыбий глаз», и учитывается сферическая модель камеры.

Практическая значимость

- 1) Предложен обобщенный алгоритм EKF-SLAM, который позволяет рассматривать сложные динамические системы, использовать несколько оценок состояния системы для повышения точности, а также формировать и обрабатывать локальные карты. Это позволяет рационально контролировать точность построения карты, определения месторасположения и вычислительные ресурсы. Таким же способом можно обобщить и другие алгоритмы на базе расширенного фильтра Калмана, применяемые в других областях науки, промышленности и техники.
- 2) Предложен и реализован на языке высокого уровня алгоритм одновременной локализации и построения карты на основе цифровой обработки телевизионных изображений и данных лазерной сканирующей системы с использованием системы прикладного телевидения. Данный алгоритм позволяет строить траекторию движения мобильной платформы, карту проходимости и трехмерную карту окружающей среды. Ошибка определения месторасположения мобильной платформы разработанного алгоритма составляет 0.88 ± 0.73 м по метрике RPE и 0.09 ± 0.08 м по метрике ATE.
- 3) Получены результаты исследования применимости различных подходов и особенностей реализации задачи одновременной локализации и построения карты в системе прикладного телевидения.
- 4) Предложен способ представления данных лидара в комплекснозначный сигнал (контур). Такой способ представления дает возможность применять корреляционные и спектральные методы обработки сигналов к данным лидара.

Достоверность полученных научных результатов обеспечивается корректным использованием математического аппарата и экспериментальными данными, подтверждающими теоретические выкладки и результаты схожих российских и зарубежных исследований.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

- Девятая научно-техническая конференция «Техническое зрение в системах управления 2019», Москва, 2019.
- Международная конференция «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях «СИНХРОИНФО», Ярославль, 2019.
- Международная конференция «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях «СИНХРОИНФО», Минск, 2018.

- Двадцать третья международная конференция открытой инновационной ассоциации FRUCT, Болонья, 2018
- Двадцать четвертая международная конференция открытой инновационной ассоциации FRUCT, Москва, 2019.
- Ярославские областные конференции молодых ученых и аспирантов.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, из них 3 статьи в изданиях из перечня ВАК, 5 статей, индексируемые в SCOPUS.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников и приложения.

Личный вклад автора. Выносимые на защиту положения предложены и реализованы автором самостоятельно в ходе выполнения научно-исследовательских работ в Центре искусственного интеллекта и цифровой экономики Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова.

Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Алгоритм одновременной локализации и построения карты на основе цифровой обработки телевизионных изображений и данных лазерной сканирующей системы для применения в системах прикладного телевидения, обеспечивающий повышение точности позиционирования до 0.88 ± 0.73 м по метрике RPE и 0.09 ± 0.08 м по метрике ATE, за счет добавления дополнительной оценки состояния системы и пренебрежением избыточной и ошибочной корреляции между мобильной платформы, и ориентирами.
2. Улучшение алгоритмов детектирования пространственных ориентиров по данным лазерной сканирующей системы, обеспечивающие вероятность детектирования ориентира до 90%, за счет применения предварительной обработки данных.
3. Обобщенный алгоритм EKF-SLAM, позволяющего рассматривать сложные динамические системы и применять алгоритмы построения и обработки локальных карт, за счет построения вектора состояния и ковариационной матрицы из соответствующих матриц выбранных объектов системы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе представлена краткая история развития задачи одновременной локализации и картографирования и основные научные результаты, полученные к настоящему времени. Описываются основная проблема и особенности задачи SLAM (рис. 1). Современное состояние исследований в данной области показывает, что существующие методы решения указанной проблемы базируются на основе расширенного фильтра Калмана и фильтра частиц. Приводится их описание, основные особенности и отличия.

При решении задачи SLAM могут применяться различные типы сенсоров для детектирования и построения карты, такие как лазерный дальномер, цифровые

камеры видимого и инфракрасного диапазона и другие. Приводятся принципы работы данных сенсоров, их основные характеристики, преимущества и недостатки.

Рассматривается такое направление, как визуальный SLAM, в котором в качестве датчика используется камера. Приводится описание популярных алгоритмов: ORB SLAM, LSD-SLAM и RGB-D SLAM.

Во второй главе приведено описание этапов работы разработанного алгоритма одновременной локализации и построения карты с использованием камеры с объективом типа «рыбий глаз» и лазерной сканирующей системы (рис. 2).

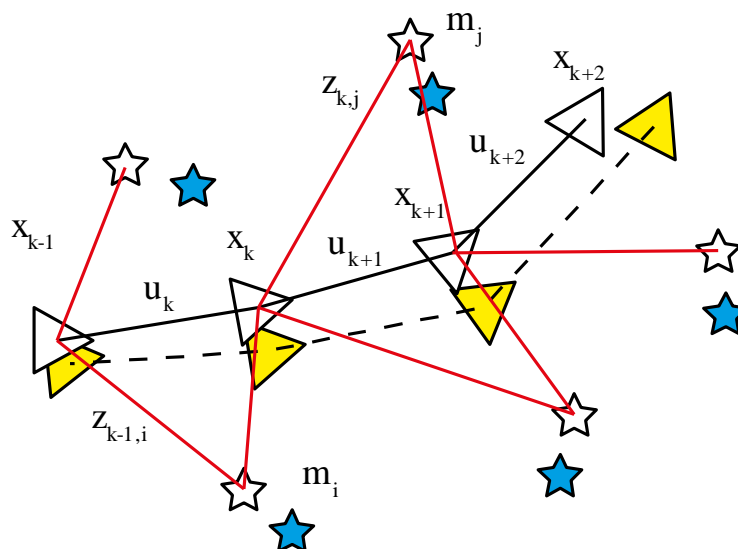


Рис. 1. Процесс работы алгоритма SLAM: движение мобильной платформы от положения x_{k-1} под управляющими воздействиями u_k, u_{k+1}, u_{k+2} (наблюдения ориентира m_i обозначены как $z_{k-1,i}, z_{k,i}, z_{k+1,i}$)

Данный алгоритм можно условно разделить на несколько частей: извлечение и синхронизация данных, обнаружение ориентиров в пространстве, ассоциация данных, оценка месторасположений мобильной платформы и ориентиров, уточнение месторасположений мобильной платформы и ориентиров, получение карты глубины, формирование облака точек и карты проходимости. Приводится описание реализации частей алгоритма.

Рассматривается два типа модели камеры: «модель камеры обскура» и «сферическая модель». Приводится калибровка сферической модели камеры. Также приводится описание и примеры работы алгоритма визуальной одометрии с использованием сферической модели камеры.

Рассматриваются требования к ориентирам, которые обеспечивают инвариантность относительно изменений координат мобильной платформы. Приводятся два вида ориентиров и их матрицы измерения и матрицы, отображающие отношение измерений и состояний, необходимые для реализации алгоритма SLAM на базе расширенного фильтра Калмана (рис. 3).

Матрицы измерения для ориентиров типа «угол» и «особая точка»:

$$z_{corner} = \begin{bmatrix} r \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_m - x_l)^2 + (y_m - y_l)^2} \\ atan \frac{y_m - y_l}{x_m - x_l} - \gamma \end{bmatrix},$$

$$z_{feature} = \begin{bmatrix} x_z \\ y_z \\ z_z \end{bmatrix} = \mathbf{R}^{CW} \left(\rho_i \left(\begin{pmatrix} x_{c,i} \\ y_{c,i} \\ z_{c,i} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_r - d \cos \gamma \\ y_r + d \sin \gamma \\ z_r \end{pmatrix} \right) + m(\theta_{c,i}, \varphi_{c,i}) \right)$$

$$x_l = x + d \cos \gamma, y_l = y + d \sin \gamma,$$

где x_m, y_m – координаты ориентира типа «угол», x_l, y_l – координаты лидара, x_r, y_r, z_r, γ – координаты мобильной платформы, r – расстояние от лидара до ориентира, α – угол между ориентации лазерным дальномером и ориентиром типа “угол”, \mathbf{R}^{CW} – матрица поворота мобильной платформы, $x_{c,i}, y_{c,i}, z_{c,i}, \theta_{c,i}, \varphi_{c,i}$ – координаты - ориентира типа «особая точка», γ – направление мобильной платформы.

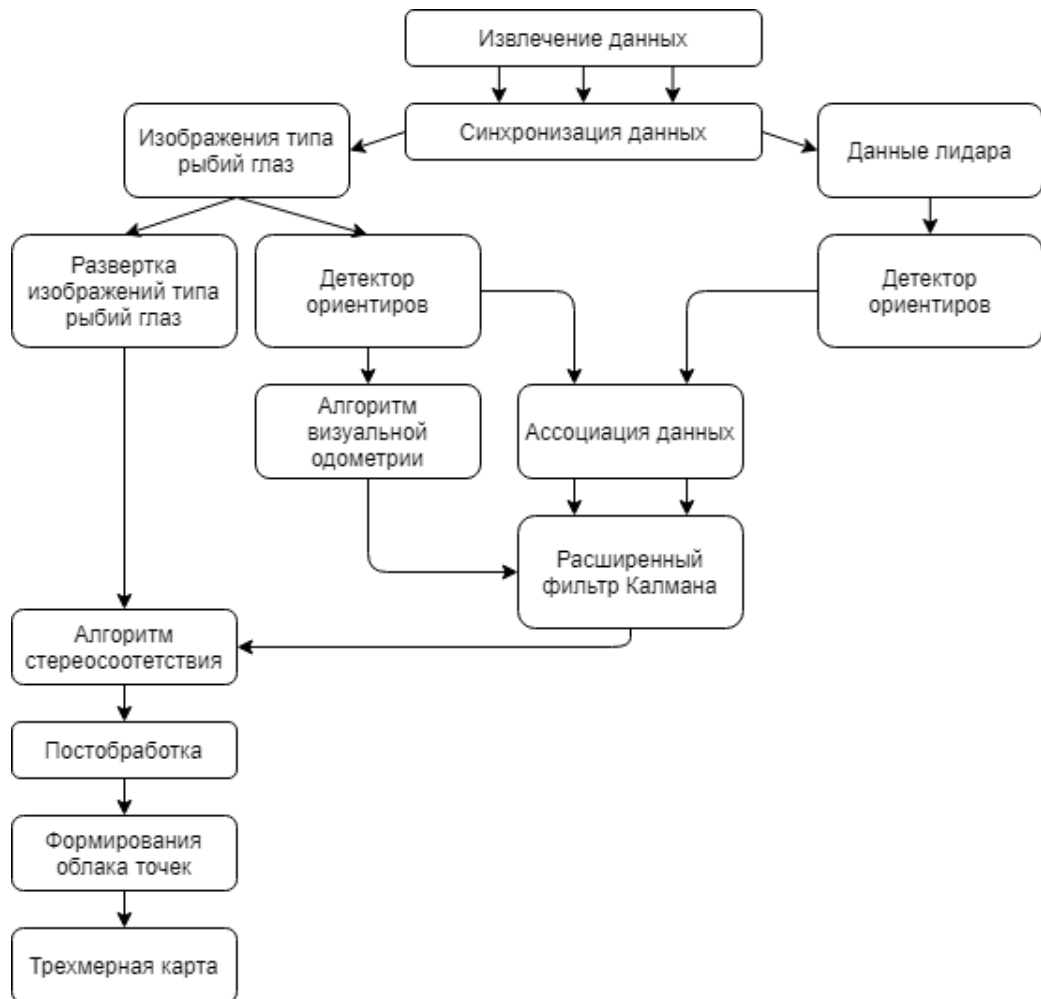


Рис. 2. Структурная схема разработанного алгоритма одновременной локализации и построения карты

Для поиска и слежения за ориентирами типа «особая точка» реализован алгоритм трекинга Лукаса-Канаде с использованием ORB-детектора.

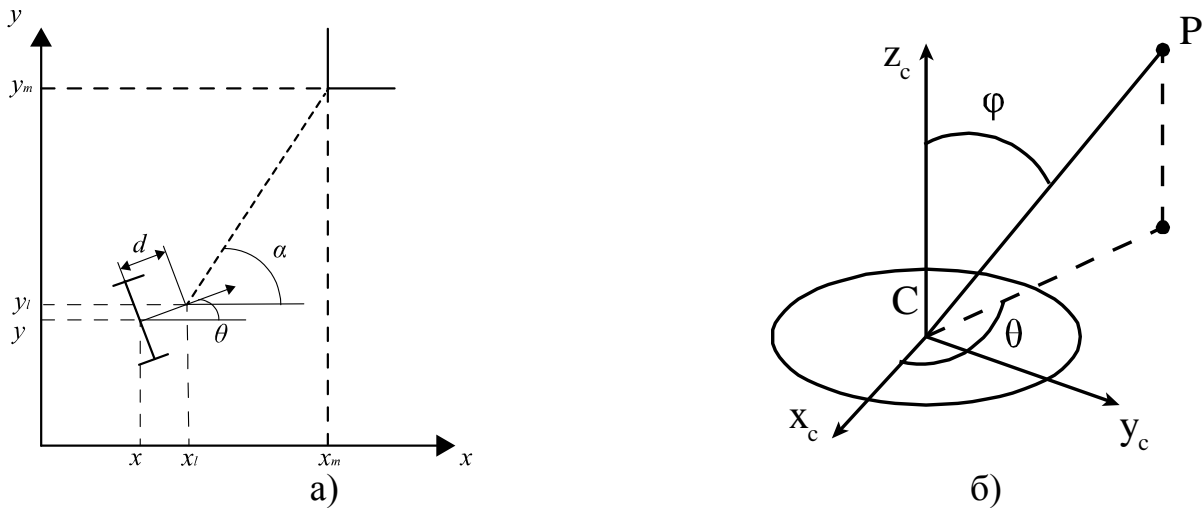


Рис. 3. Геометрические отношения между мобильной платформой и ориентирами: а) для ориентира типа «угол»; б) для ориентира типа «особая точка»

Описываются основные проблемы детектирования ориентиров по данным лазерной сканирующей системы: недостающие данные и окклюзия. В связи с этим предложено использовать контурный анализ. В таком подходе данные, полученные лазерной сканирующей системой, обрабатываются как контур, а не как облако точек. Контур представляется в виде комплекснозначного сигнала – такая модель дает в большей степени использовать методы, инвариантные к переносу, повороту и изменению масштаба.

На основе контурного анализа для детектирования ориентиров рассматриваются такие алгоритмы, как детектор ориентиров с использованием согласованной фильтрации, алгоритм Teh-Chin, алгоритм Wu и детектор ориентиров, использующий метод масштабного пространства кривизны.

Алгоритм EKF-SLAM успешно используется для построения небольших карт потому, что он имеет квадратичную вычислительную сложность обновления ковариационной матрицы на каждом шаге. Поэтому также рассматриваются вопросы улучшения алгоритма EKF-SLAM, которые вызывают большой интерес к исследованиям. В работе рассматриваются три усовершенствованных алгоритма EKF-SLAM (рис. 4.).

Алгоритм EKF-SLAM с адапционным диапазоном наблюдения. В основе алгоритма лежит локальная круговая карта для текущей оценки координат мобильной платформы и локализации зоны используемых ориентиров, с одновременным обновлением глобальной карты. То есть, радиус локальной карты меняется таким образом, чтобы использовать определенное количество ориентиров для расчетов.

Алгоритм EKF-SLAM «разделяй и властвуй». Алгоритм создает бинарное дерево, состоящее из последовательных локальных карт фиксированного размера, которые затем объединяют в глобальную карту. Для формирования локальных карт выполняется стандартный алгоритм EKF-SLAM до фиксированного максимального размера.

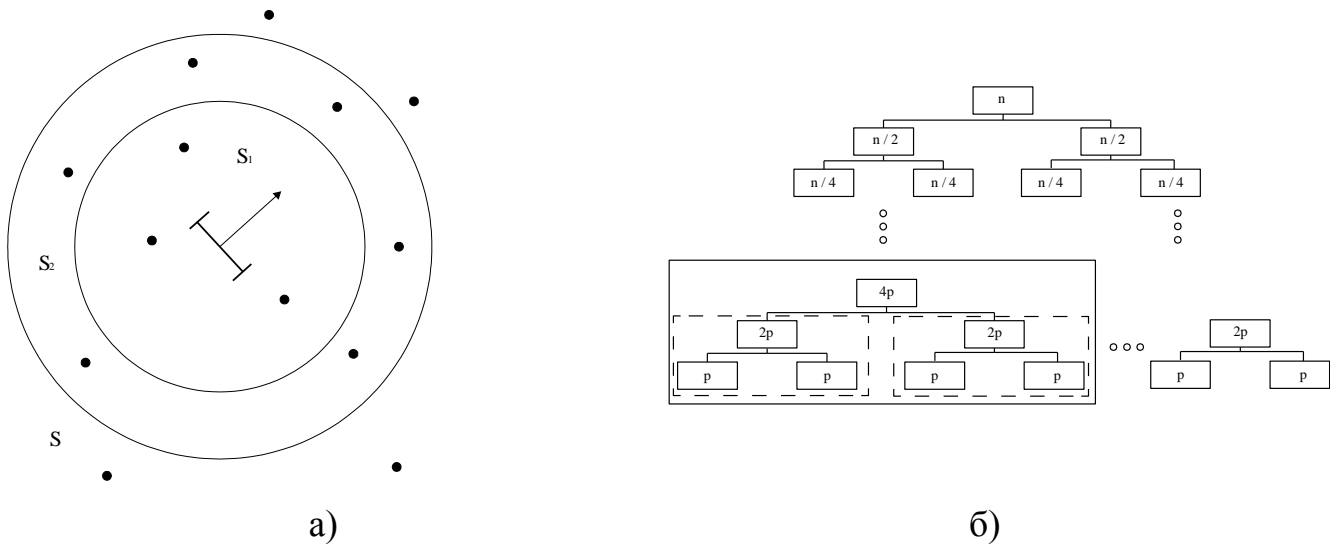


Рис. 4. Модифицированные алгоритмы SLAM: а) Алгоритм EKF-SLAM с адаптивным диапазоном наблюдения (S – глобальная карта, S_1 – зона наблюдения мобильной платформы, S_2 – зона круговой локальной карты); б) Бинарное дерево иерархии локальных карт алгоритма EKF-SLAM «Разделяй и властвуй»

Алгоритм EKF-SLAM с равномерным использованием ориентиров. В этом алгоритме строится локальная карта фиксированного количества ориентиров из наблюдаемых ориентиров и ориентиров с высокой мерой использования. Мера использования вычисляется следующим образом:

$$s = \frac{o - 0.5 * u}{1 + o},$$

где s – мера использования ориентира o – количество наблюдений ориентира, u – количество использования ориентира в построении локальной карты.

На основе анализа усовершенствованных алгоритмов EKF-SLAM разработан обобщенный алгоритм EKF-SLAM.

Предложен алгоритм поиска соответствия ориентиров с помощью камеры. Поскольку многие способы восприятия, такие как зрение, предоставляют богатую информацию о форме, цвете и текстуре, все они могут быть использованы для поиска соответствия между двумя наборами ориентиров. Алгоритм поиска соответствий ориентиров состоит из следующих этапов: детектирование ориентира по данным лидара; преобразование изображения «рыбий глаз» в панорамное изображение; поиск области изображения, где находится найденный ориентир; поиск ключевых точек и их дескрипторов методом SIFT в найденной области изображения; сопоставление ориентиров по набору совпавших ключевых точек.

Представлен алгоритм построения трехмерной карты с использованием камеры с объективом типа «рыбий глаз». Для вычисления карты смещения используются два последовательных изображения, полученных с разных точек обзора. Каждая из них определяется с помощью алгоритма локализации. В данной работе применяется локальный алгоритм стереосоответствия, в котором карта смещения определяется на основе сопоставления окон пикселей на эпиполярной линии с помощью суммы абсолютных разностей:

$$E_{SAD}(p, d) = \sum_{i=-1}^l \sum_{j=-k}^k [B(x + i, y + j) - M(x + d + i, y + j)]^2,$$

где B – первое изображение, M – второе изображение.

Точность оценки карты смещения часто страдает от экстремальных сценариев, таких как область без текстур, переэкспонирование, повторяющаяся структура и т. д. Чтобы повысить точность карты смещения необходима постобработка. На этапе постобработки применяется взвешенная фильтрация наименьших квадратов (WLS фильтр), поскольку она обеспечивает хорошее сглаживание, сохраняющее края.

Приведены примеры работы алгоритма (рис. 5).

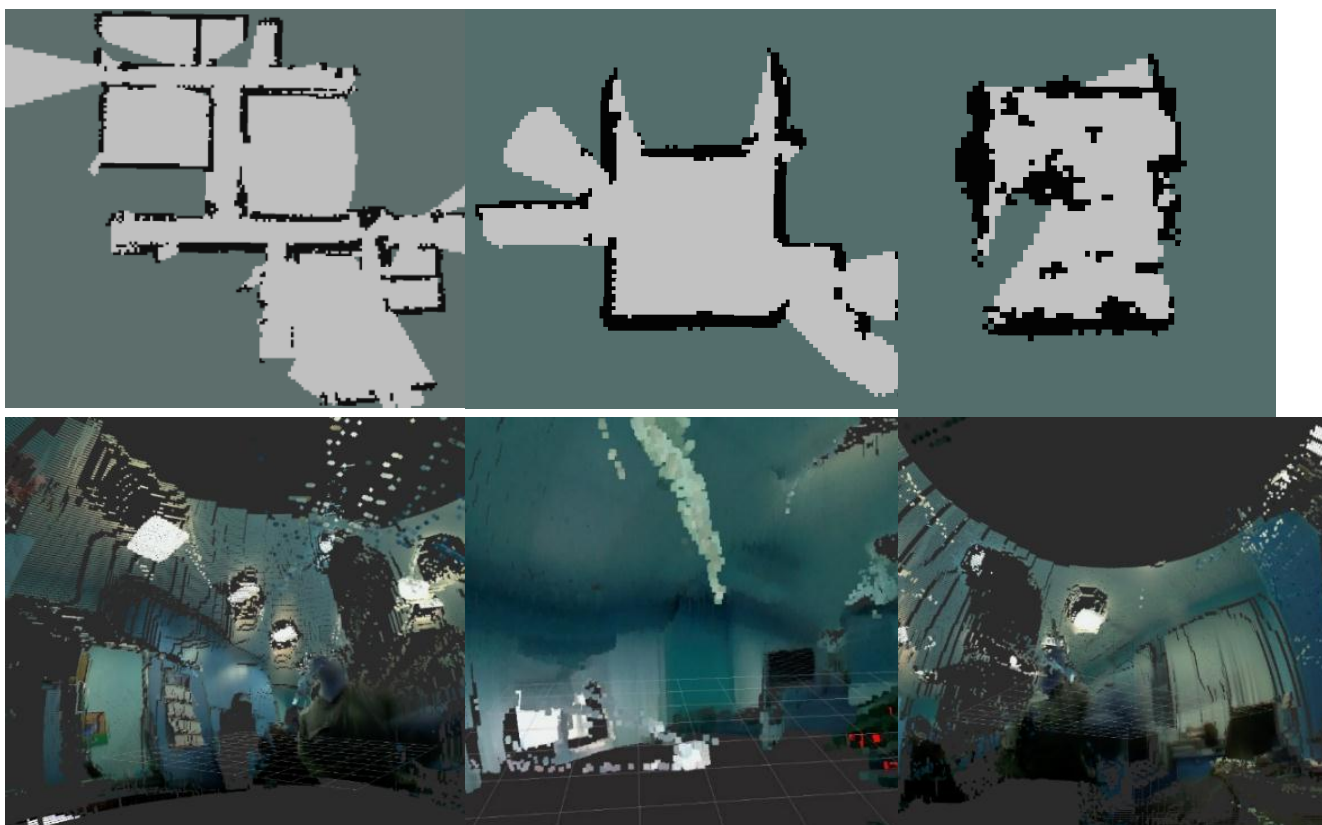


Рис. 5. Примеры работы алгоритма одновременной локализации и построения карты

В третьей главе представлены исследования разработанного алгоритма одновременной локализации и построения карты. Приводятся результаты исследования по определению оптимальных параметров детекторов обнаружения ориентиров, такие как размер окна, порог (табл. 1).

Для оценки качества работы детекторов использовался показатель F-меры:

$$F = 2 * \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall}$$

где *Precision* – точность, *Recall* – полнота.

Максимальное значение F-меры детекторов составила 0.95, хуже всего показал себя алгоритм детектирования ориентиров с использованием метода масштабного пространства кривизны, у которого F-мера составила около 0.64.

Оптимальные параметры для алгоритмов детектирования ориентиров

	Алгоритм согласованной фильтрации	Алгоритм Wu	Алгоритм Teh-Chin	Метод масштабного пространства кривизны
Параметры	Размер окна 12 Порог 0.85	Размер окна 12 Порог 0.1	Размер окна 12 Порог 0.2	Размер окна 14 Дисперсия 16
F-мера	0.87	0.95	0.87	0.64

Рассмотрено влияние шума типа АБГШ на работу детекторов обнаружения ориентиров (рис. 6). Анализ результатов показывает, что при АБГШ метод согласованной фильтрации и алгоритм Wu работают лучше, чем остальные алгоритмы.

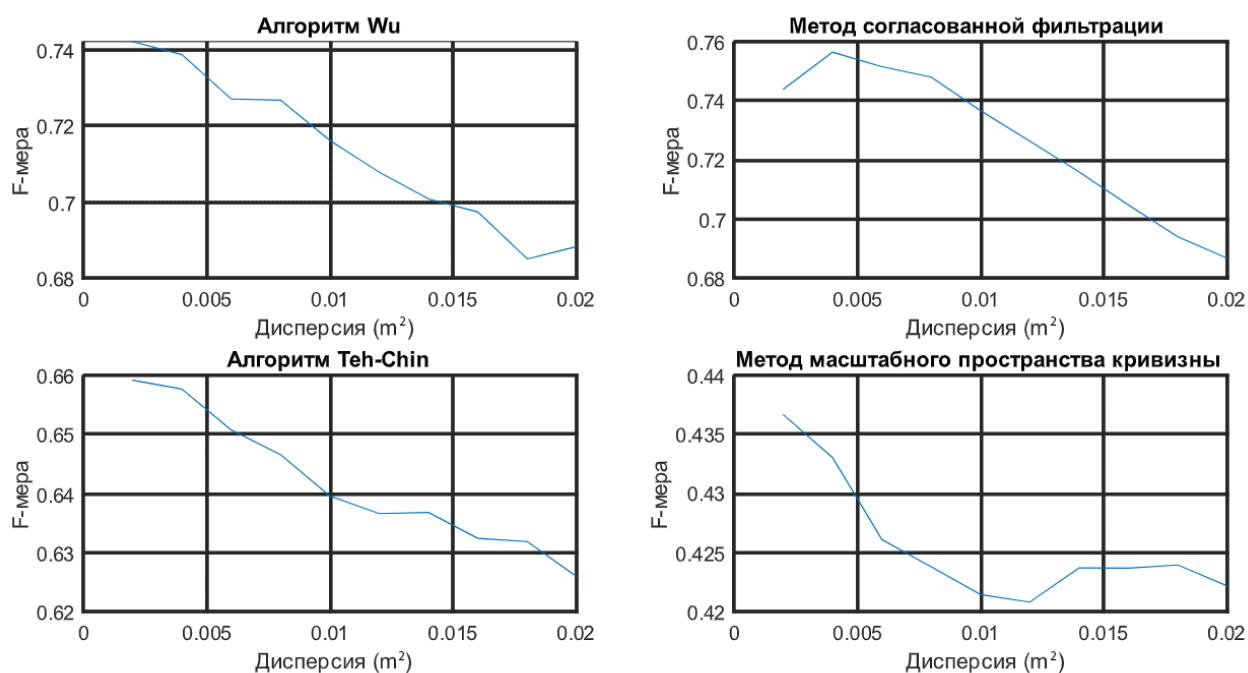


Рис. 6. Зависимость работы детекторов от дисперсии АБГШ

Проведена оценка точности визуального одометра. Экспериментальные исследования проводились в помещении. Оператор с помощью пульта дистанционного управления вел мобильную платформу из точки А в конечную точку В, через условные промежуточные точки С1 и С2. Длина траектории составила 5.9 м (рис. 7).

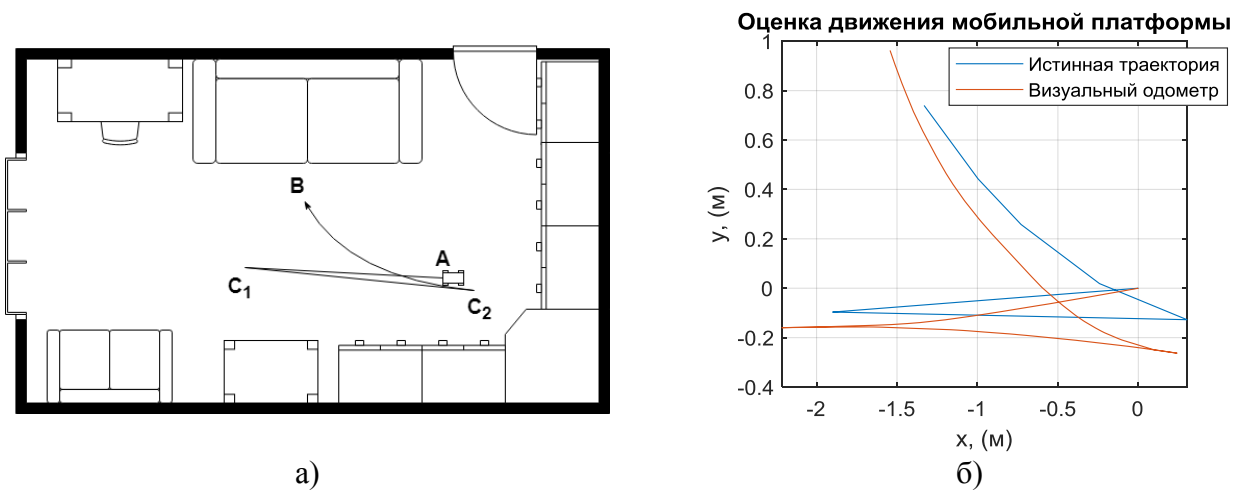


Рис. 7. Оценка точности визуального одометра: а) траектория движения мобильной платформы; б) результат работы визуального одометра

Ошибка RPE (относительная ошибка месторасположения) составила 0.45 м, и ошибка ATE (абсолютная ошибка траектории) – 0.05 м.

Проанализированы улучшенные алгоритмы EKF-SLAM. Исследовано время работы итерации каждого алгоритма в зависимости от количества ориентиров (рис. 8).

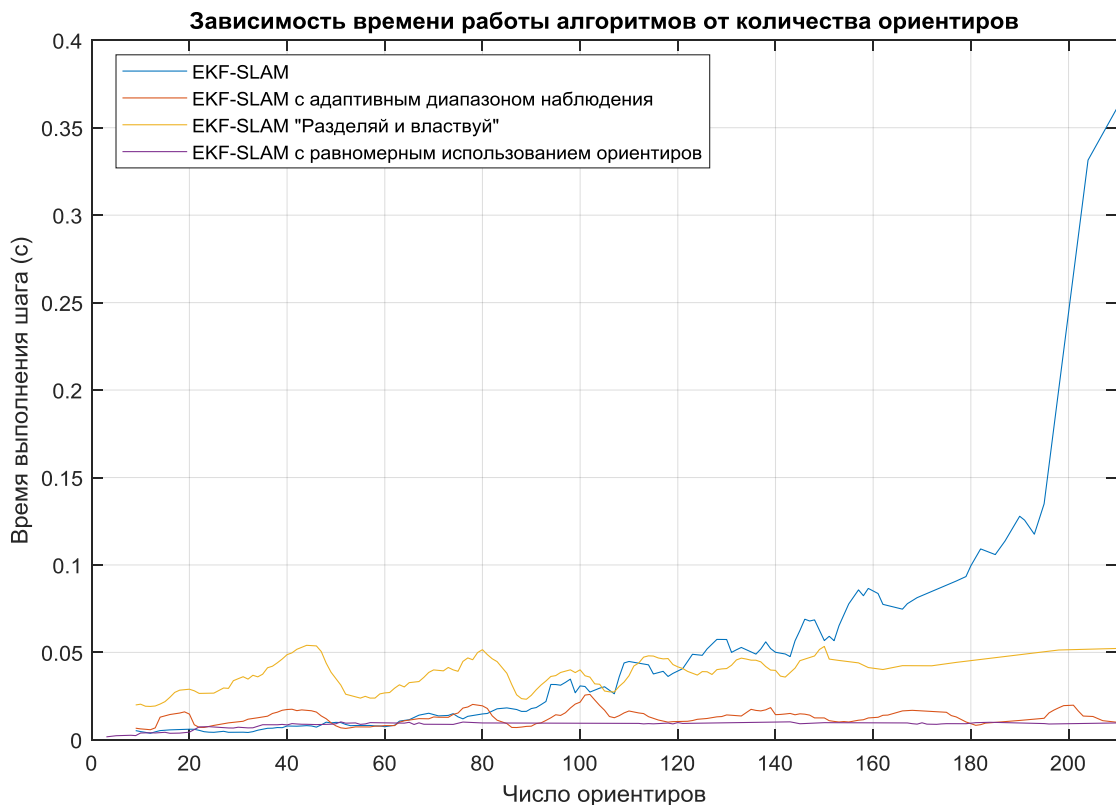


Рис. 8. Зависимость времени работы алгоритмов от количества ориентиров

По графику видно, что алгоритм EKF-SLAM имеет квадратичную вычислительную сложность, а остальные – линейную. Также у алгоритма EKF-SLAM «разделяй и властвуй» наблюдается пилообразная форма кривой, это

связано с тем, что он во время работы строит последовательно несколько локальных карт фиксированного размера.

Для сравнения работы алгоритма EKF-SLAM с использованием разных видов датчиков делалось три записи сразу со всеми датчиками. Помимо этого, определялась последовательность месторасположений мобильной платформы во время записи. Далее строилась последовательность оценок месторасположений, полученных при помощи алгоритма EKF-SLAM. Полученные последовательности приводились к общему виду с помощью интерполяции. С помощью этих последовательностей делалась оценка ошибок RPE и ATE. Результаты эксперимента представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнения работы алгоритма EKF-SLAM с использованием разных видов датчиков

Номер заезда	Лидар		Камера		Лидар и камера	
Алгоритм EKF-SLAM						
	RPE (м)	ATE (м)	RPE (м)	ATE (м)	RPE (м)	ATE (м)
1	0.32	0.13	0.31	0.09	0.31	0.08
2	0.36	0.19	0.36	0.20	0.34	0.16
3	1.98	0.16	1.98	0.17	1.97	0.17
Алгоритм EKF-SLAM “Разделяй и властвуй”						
1	0.33	0.03	0.33	0.03	0.31	0.02
2	0.38	0.01	0.38	0.20	0.31	0.02
3	1.95	0.16	1.95	0.16	1.96	0.16
Алгоритм EKF-SLAM с адаптивным диапазоном наблюдения						
1	0.32	0.02	0.32	0.05	0.32	0.02
2	0.37	0.01	0.38	0.01	0.38	0.01
3	1.98	0.17	2.00	0.18	1.97	0.17
Алгоритм EKF-SLAM с равномерным использованием ориентиров						
1	0.33	0.03	0.34	0.04	0.32	0.02
2	0.41	0.01	0.43	0.01	0.41	0.01
3	2.02	0.13	1.94	0.13	1.91	0.16

Как видно из приведённых результатов, алгоритм с использованием двух датчиков способен точнее восстановить траекторию движения камеры и

окружающее пространство. В результате использования двух датчиков точность позиционирования увеличилось на 1.95 % по метрике RPE и на 21.26 % по метрике ATE в сравнении использованием только камеры, и увеличилось на 2.23 % по метрике RPE и на 4.8 % по метрике ATE в сравнении использованием только лидара.

Также приведено сравнение различных алгоритмов SLAM (табл. 3).

Таблица 3
Сравнение различных алгоритмов SLAM

Алгоритм	ATE (м)
ORB-SLAM	0.02 ± 0.01
LSD-SLAM	0.37±0.48
RGBD-SLAM	0.1 ± 0.06
EKF-SLAM	0.09 ±0.08

Из таблицы видно, что алгоритм EKF-SLAM работает точнее на 75,68%, чем алгоритм LSD-SLAM; на 10% точнее, чем алгоритм RGBD-SLAM, и хуже на 77,78%, чем алгоритм ORB-SLAM.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы и результаты диссертационной работы можно сформулировать в следующем виде:

1. Предложен алгоритм одновременной локализации и построения карты с использованием камеры с объективом типа «рыбий глаз» и лазерной сканирующей системы и его модификации. Данный алгоритм позволяет строить траекторию движения мобильной платформы, карту проходимости и трехмерную карту окружающей среды.
2. В результате использования двух датчиков точность позиционирования увеличилось на 1,95% и 21,26% в сравнении использованием только камеры, и увеличилось на 2,23% и 4,8% в сравнении с использованием только лидара по метрикам RPE и ATE.
3. Предложен метод представления данных лазерной сканирующей системы в виде комплексозначного сигнала, позволяющего применять алгоритмы обработки телевизионных сигналов, использующих контурный анализ. Данный метод представления позволяет применять алгоритмы, инвариантные к переносу, масштабированию и повороту.
4. Рассмотрен ориентир типа «особая точка». Для этого типа ориентира определены матрицы измерения и якобиана с использованием сферической модели камеры.
5. Проведено исследование детекторов ориентиров с использованием контурного анализа. Численные результаты показывают, что метод согласованной фильтрации и алгоритм Wu в среднем показывают F-меру

равной 0,9. Хуже всех результат имеет метод масштабного пространства кривизны.

6. Исследование времени работы улучшенных алгоритмов EKF-SLAM показывает, что алгоритм EKF-SLAM имеет квадратичную вычислительную сложность, а улучшенные алгоритмы – линейную.
7. Разработан алгоритм визуальной одометрии с использованием сферической модели камеры, учитывающий особенности движения мобильной платформы и камеры с объективом типа «рыбий глаз». Точность работы алгоритма визуальной одометрии составила 0.45 м и 0.05 м по метрике RPE и ATE.
8. Исследование точности работы алгоритмов EKF-SLAM показывает, что при построении маленьких карт точность сравнительно одинакова, но при построении больших карт алгоритм EKF-SLAM проигрывает улучшенным.
9. Проведен эксперимент по сравнению различных модификаций алгоритма EKF-SLAM. Установлено, что наиболее эффективный с точки зрения скорости и точности является алгоритм EKF-SLAM с равномерным использованием ориентиров. Средняя ошибка у него меньше на 12,35%, чем у алгоритма EKF-SLAM, меньше на 10,34%, чем у алгоритма EKF-SLAM «разделяй и властвуй» и меньше на 4.87%, чем у алгоритма EKF-SLAM с адаптивным диапазоном наблюдения.
10. Сравнение различных алгоритмов SLAM показало, что алгоритм EKF-SLAM работает точнее на 75,68%, чем LSD-SLAM, на 10% точнее, чем RGBD-SLAM, и хуже на 77,78% чем ORB-SLAM.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи из перечня ВАК

1. Антипов В.А., Коковкина В.А., Кирнос В.П., Приоров А.Л., Гурьянов Е.Д. Решение задачи одновременной локализации и картографирования с использованием модификаций расширенного фильтра Калмана // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2019. № 4. С. 44-51.
2. Кирнос В.П., Антипов В.А., Коковкина В.А., Приоров А.Л., Гурьянов Е.Д. Построение карты глубины с использованием камеры с широкоугольным объективом типа "рыбий глаз" // Радиотехника. 2020. Т. 84. № 2 (3). С. 64-71.
3. Коковкина В.А., Антипов В.А., Кирнос В.П., Приоров А.Л., Гурьянов Е.Д. Обнаружение ориентиров по данным лазерной сканирующей системы на основе контурного анализа в задаче одновременной локализации и построения карты при движении автономного мобильного робота // Успехи современной радиоэлектроники. 2020. № 2. С. 22-29.

Материалы, индексируемые в SCOPUS

4. Kirnos V.P. Kokovkina V.A., Antipov V.A., Priorov A.L. Simultaneous Localization And Mapping Using The Support Image Base Algorithm // "2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO): Proceedings of the International Conference. Belarus, Minsk, 2018.

5. Kirnos V.P., Antipov V.A., Priorov A.L., Kokovkina V.A. The LIDAR odometry in the SLAM // "Proceedings of the 23th Conference of Open Innovations Association FRUCT'23 Bologna, Italy, 13-16 November 2018. pp. 180-185.
6. Antipov V.A., Kirnos V.P., Kokovkina V.A., Priorov A.L. The Object-Oriented Simultaneous Localization and Mapping on the Spherobot Platform // In: Favorskaya M., Jain L. (eds) Computer Vision in Control Systems—6. Intelligent Systems Reference Library, vol 182. Springer, Cham, 2020, pp. 165-175.
7. Kokovkina, V.A., Antipov, V.A., Kirnos, V.P., Priorov, A.L. The algorithm of EKF-SLAM using laser scanning system and fisheye camera // Proceedings of Conference 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2019. Kazan, Russia, 2019.
8. Kirnos V., Antipov V., Priorov A., Kokovkina V. Landmarks detection by contour analysis in the problem of SLAM // Proceedings of the 24th Conference of Open Innovations Association FRUCT'24. Moscow, Russia, 8-12 April 2019. pp. 156-162.

Материалы всероссийских и международных конференций

9. Кирнос В.П., Приоров А.Л., Антипов В.А., Коковкина В.А. Проблемы картографирования пространства в задаче SLAM // Телевидение: передача и обработка изображений: Материалы 14-й международной конференции. СПб.: 2017. С. 152-155.
10. Кирнос В.П., Коковкина В.А., Антипов В.А., Приоров А.Л. Алгоритм одометрии на основе данных лазерного дальномера для задачи SLAM // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 13-ой международной научно - технической конференции / Владим. гос. университет; редкол.: А.Г. Самойлов (и др). Владимир: ВлГУ. 2019. Т. 2. С. 211-217.
11. Антипов В.А., Коковкина В.А., Кирнос В.П., Приоров А.Л. Реализация алгоритмов одновременной локализации и картографирования на основе опорных объектов // Техническое зрение в системах управления - 2018: Сб. тезисов докладов научно-технической конференции, ТЗСУ-2018. Москва, 2018. С. 13-14.
12. Антипов В.А., Коковкина В.А., Кирнос В.П., Приоров А.Л. Обнаружение ориентиров с использованием контурного анализа в задаче SLAM // Техническое зрение в системах управления - 2019: Сб. тезисов докладов научно-технической конференции, ТЗСУ-2019. Москва, 2019. С. 7-8.
13. Антипов В.А., Коковкина В.А., Кирнос В.П., Приоров А.Л., Гурьянов Е.Д. Решение задачи одновременной локализации и картографирования с использованием модификаций расширенного фильтра Калмана // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2019. № 4. С. 44–51.

Подписано в печать 09.07.2021

Формат 60×84 1/16. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе

Ярославский государственный университет

150003, Ярославль, ул. Советская, 14