

УДК 621.396.06

Научная статья

<https://doi.org/10.32603/2071-8985-2025-18-4-39-54>

Система навигации беспилотной мобильной платформы в различных условиях окружающей среды

Е. А. Масленникова^{1✉}, А. Саламахин¹, Д. М. Филатов¹, А. А. Трутс², П. С. Григорьев²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники
и технической кибернетики (ФГАНУ «ЦНИИ РТК»), Санкт-Петербург, Россия

✉ eamaslennikova@etu.ru

Аннотация. В настоящее время наблюдается растущая актуальность использования беспилотных мобильных платформ в различных отраслях промышленности и производства. В связи с этим возрастают требования к точности их позиционирования и безопасности дальнейшего применения. Целью исследования служит разработка системы визуальной ориентации и картографирования, инвариантной к изменению освещения. Для роботов, ориентирующихся только с помощью камеры, изменение освещенности в помещении может привести к сбоям при повторной локализации в процессе автономной навигации. В данной статье описывается многосессионный подход к визуальному SLAM, позволяющий создать карту, состоящую из нескольких вариантов одних и тех же мест в условиях различной освещенности. Такая карта может быть использована в любое время суток для улучшения возможности локализации в помещениях и на открытых территориях, соответствующих области ее дальнейшего применения.

Ключевые слова: робототехника, мобильная платформа, стереокамера, навигация, локализация, визуальные маркеры, система управления, автономное управление

Для цитирования: Система навигации беспилотной мобильной платформы в различных условиях окружающей среды / Е. А. Масленникова, А. Саламахин, Д. М. Филатов, А. А. Трутс, П. С. Григорьев // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 4. С. 39–54. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-4-39-54.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: Работа выполнена в рамках Гос. задания на 2024 год «Разработка приводного модуля повышенной радиационной стойкости с изменяемым передаточным числом и использованием электромагнитной муфты» (FNRG-2022-0024, per. № 1021101316166-9-2.2.2).

Original article

The Navigation System of an Unmanned Mobile Platform in Different Environmental Conditions

E. A. Maslennikova^{1✉}, A. Salamakhin¹, D. M. Filatov¹, A. A. Truts², P. S. Grigoriev²

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² Russian State Scientific Centre for Robotics and Technical Cybernetics (RTC), Saint Petersburg, Russia

✉ eamaslennikova@etu.ru

Abstract. Currently, the importance of using unmanned mobile platforms in various industries and production is increasing. This has led to an increase in the need for accurate positioning and safe use of these platforms. The main goal of this research is to develop a vision-based navigation system that is invariant to changes in lighting conditions. For robots that navigate using only cameras, changes in illumination can cause failures during re-localization during autonomous navigation. This article describes a multi-session visual simultaneous localization and mapping (SLAM) approach that allows for the creation of a map consisting of multiple variations of the same location in different lighting conditions. This map can be used any time of day to improve localization both indoors and outdoors, making it suitable for various applications.

Keywords: robotics, mobile platform, stereo camera, navigation, localization, visual markers, control system, autonomous control

For citation: The Navigation System of an Unmanned Mobile Platform in Different Environmental Conditions / E. A. Maslennikova, A. Salamakhin, D. M. Filatov, A. A. Truts, P. S. Grigoriev // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 4. P. 39–54. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-4-39-54.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Financing: The work was performed within the framework of the State Task for 2024 «Development of a drive module with increased radiation resistance with a variable gear ratio and the use of an electromagnetic clutch» (FNRG-2022-0024, reg. no. 1021101316166-9-2.2.2).

Введение. В связи с тем, что за последнее десятилетие произошел сильный скачок в развитии технологий и автоматизации технологических процессов, выросла и потребность в использовании автономных мобильных платформ, способных решать определенный перечень задач в различных отраслях. Список задач достаточно широк и затрагивает такие сферы, как транспортировка грузов и мониторинг окружающей обстановки. Однако для того чтобы подобные системы безопасно и корректно функционировали, нужно предъявлять высокие требования к точности позиционирования и стабильности работы при различных условиях окружающей среды.

В настоящий момент многие современные автономные мобильные платформы сталкиваются с рядом ограничений, вызванных изменением условий их эксплуатации. Необходимо отметить, что основная задача при разработке таких платформ – обеспечение стабильности их функционирования как на открытых территориях, так и в замкнутых пространствах. Однако при смене области эксплуатации возникают и препятствия, влияющие на точность позиционирования и дальнейшей навигации. К примеру, освещение, наличие объектов, изменение рельефа и погодные условия могут существенно влиять на способность платформы правильно определять свое местоположение и ориентироваться в пространстве.

Для решения вышеупомянутой проблемы в системах навигации используются различные сочетания высокоуровневых датчиков. Построение систем на этих датчиках позволяет создать не только систему позиционирования и навигации, но и трехмерную карту окружающей среды. Цель данного исследования заключается в разработке программно-аппаратного обеспечения для беспилотной мобильной платформы, которое будет обеспечивать эффективную навигацию

независимо от внешних условий. В рамках исследований был создан прототип платформы, который прошел верификационные испытания в различных сценариях, что позволило оценить его производительность и надежность в реальных условиях.

Постановка задачи. Основной перечень задач, которые необходимо решить для реализации эффективной системы управления беспилотной мобильной платформой:

1. Разработка архитектуры программно-аппаратного обеспечения, включающей в себя слияние различных высокоуровневых датчиков, для повышения точности позиционирования и устойчивости к внешним воздействиям.
2. Разработка виртуальной и реальной моделей мобильной платформы для проведения тестирования алгоритмов. Здесь будет проведено исследование для выбора наиболее эффективного подхода к реализации.
3. Проведение тестирований как в закрытых помещениях, так и на открытых территориях для оценки производительности, точности навигации и способности адаптироваться к изменениям окружающей среды.
4. Проведение анализа результатов.

Разработка архитектуры программно-аппаратного обеспечения, включающей в себя слияние различных высокоуровневых датчиков, для повышения точности позиционирования и устойчивости к внешним воздействиям. Энкодеры – важный компонент в системах управления движением колесных роботов, предоставляющий информацию о вращении колес и, следовательно, о перемещении робота. Однако использование только энкодеров для определения перемещения может привести к проблеме дрейфа, когда робот начинает перемещаться в неправильном направлении из-за ошибок в измерении или интерпретации данных.

Проблема дрейфа возникает из-за того, что энкодеры измеряют только угловое перемещение колес, но не учитывают фактического расстояния, пройденного роботом. Это может привести к тому, что робот начнет отклоняться от заданной траектории из-за небольших погрешностей в измерениях или из-за внешних факторов, например неровности поверхности или сопротивление движению.

Для решения проблемы дрейфа необходимо использовать дополнительные датчики и алгоритмы, которые могут компенсировать ошибки измерений и обеспечивать более точное определение перемещения робота (например датчики расстояния или акселерометры – для измерения фактически пройденного расстояния, а алгоритмы фильтрации и коррекции – для уточнения данных от энкодеров).

Для задачи одновременного позиционирования и картографирования, SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), применяются различные типы датчиков, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения: ультразвуковые и инфракрасные датчики позволяют роботу измерять расстояние до объектов вокруг него, лидары создают трехмерные карты окружающей среды, стереокамеры дают возможность воспринимать глубину и создавать более точные карты, а инерциальные измерительные блоки помогают отслеживать движение и ориентацию в пространстве, но могут накапливать ошибки со временем. Выбор датчиков зависит от конкретных требований задачи SLAM, включая точность, стоимость, энергопотребление и сложность алгоритмов обработки данных.

1. Выбор стереокамеры. Визуальные датчики для SLAM играют ключевую роль в мобильных автономных роботах, позволяя им ориентироваться в окружающей среде и создавать карту местности. Существует несколько типов камер, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки:

– Монокулярные камеры – самый простой и доступный тип визуальных датчиков, состоят из одной камеры, которая захватывает плоские цветные 2D-изображения. Они подходят для работы в условиях хорошей освещенности и на поверхностях с достаточным количеством текстур.

– Стереокамеры – это пара камер, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга. Они позволяют роботу строить карту глубин, что особенно полезно в задачах навигации и избегания препятствий. Стереокамеры хорошо работают в

условиях низкой освещенности, но могут испытывать трудности с однородными поверхностями.

– RGB-D-камеры – это комбинация обычной камеры и датчика глубины. Они предоставляют информацию о цвете и глубине сцены, что делает их универсальными для различных условий освещения и типов поверхностей. RGB-D-камеры часто используют инфракрасный проектор для измерения расстояния до объектов.

В данных исследованиях будут использоваться камеры глубины Intel RealSense D455 и D435i. Внешний вид камеры RS D435i представлен на рис. 1.

Данные стереокамеры имеют высокое разрешение и широкий угол обзора. В них присутствует инфракрасная подсветка, что позволяет значительно улучшить восприятие глубины, особенно в условиях низкой освещенности или темноты. Камеры поддерживают несколько режимов работы, например можно выбрать профиль максимальной дальности либо максимальной плотности изображения глубины. К минусам можно отнести небольшой размер стереобазы, что ограничивает дальность обзора. Камера применяется для задач визуальной одометрии, картографирования и локализации, а также для определения расстояния до препятствий.



Рис. 1. Внешний вид камеры Intel RealSense D435i
Fig. 1. The appearance of the Intel RealSense D435i camera

2. Выбор лидара. Использование 2D-и 3D-лидаров в задачах SLAM широко распространено благодаря их способности точно измерять расстояния до объектов в окружающей среде. Преимущество использования лидаров заключается в том, что технология, на которой они функционируют, может быстро предоставлять точную информацию с большим углом обзора, не подверженную влиянию ночи и изменениям освещенности. Однако лидары не могут различать дорожные знаки, номера автомобилей, цвета светофора, прозрачные объекты, а также плохо работают в однотипных средах, что требует дополнительных систем для полноценного восприятия ситуации вокруг робота. Кроме того, для корректной работы лидаров необходимо соблюдение определенных температурных условий и отсутствие помех для сигнала, что усложняет их интеграцию в транспортные средства, как и их большие габариты [1].

В разрабатываемой платформе будет использоваться 3D-лидар LSLIDAR C16, внешний вид которого представлен на рис. 2, с высокими показателями к надежности и долговечности, что важно в условиях эксплуатации на транспортных средствах.



Рис. 2. Внешний вид камеры 3D-лидара LSLIDAR C16
Fig. 2. The appearance of the 3D lidar camera LSLIDAR C16

Принцип определения дальности у 3D-лидара LSLIDAR C16 заключается в измерении времени возврата луча лазера. Время полета (TOF – Time-of-Flight) определяется по принципу: когда лазерный излучатель испускает лазерный импульс, внутренний таймер начинает отсчитывать время (t_1) и останавливается (t_2), когда лазерный приемник получает частичную энергию лазерной волны, отразившейся от каких-либо объектов.

3. Выбор инерциального модуля. Для локализации на открытой местности использовался модуль инерциально-навигационной системы (далее ИНС) ГКВ-3 производства «Лаборатории микроприборов» (рис. 3). Он основан на модуле ГКВ-1 – базовой версии, содержащей трехосевые датчики угловой скорости, акселерометры, магнитометры и датчик абсолютного давления, дополненный дополнительно двумя ГНСС-приемниками, что позволяет определять курс в режиме статики.



Рис. 3. Внешний вид модуля ГКВ-3
Fig. 3. The appearance of the GKV-3 module

Дополнительно к комплекту инерциально-навигационного модуля ГКВ-3 прилагаются ГНСС-антенны U-Blox серии ANN-MB.

В результате было выбрано оборудование, способное обеспечить высокоточное и стабильное функционирование системы верхнего уровня для реализации беспилотной мобильной платформы.

Разработка виртуальной и реальной моделей мобильной платформы для проведения тестирования алгоритмов. Выбор SLAM-алгоритма:

1. Visual SLAM. Как следует из названия, визуальный SLAM (или vSLAM) использует изображения, полученные с камер и других датчиков изображения. Visual SLAM может использовать простые камеры (широкоугольные, «рыбий глаз» и сферические камеры) [2], камеры с несколькими объективами (стереокамеры и мультикамеры) и камеры RGB-D (камеры глубины и ToF). На рис. 4 приведено облако точек для работы RGB-D SLAM.

Visual SLAM может быть реализован с применением относительно недорогих камер. Кроме того, поскольку камеры предоставляют большой объем информации, их можно использовать для обнаружения ориентиров (ранее измеренных положений или маркеров). Эти алгоритмы можно сочетать и с оптимизацией на основе графа, что обеспечивает гибкость реализации SLAM.

Алгоритмы Visual SLAM можно разделить на две категории. Разреженные методы сопоставляют характерные точки изображений и применяют такие алгоритмы, как PTAM и ORB-SLAM. Плотные методы используют общую яркость изображений и алгоритмы DTAM, LSD-SLAM, DSO, SVO и т. д.



Рис. 4. Регистрация облака точек для RGB-D SLAM
Fig. 4. Point cloud registration for RGB-D SLAM

2. LiDAR SLAM. В основе данного алгоритма лежит лидар. Если сравнивать с стереокамерами, Time of Flight и другими датчиками, то лидары обладают гораздо большей точностью и часто

применяются в высокоскоростных транспортных средствах – беспилотных автомобилях, дронах и т. п., а также с данными лидара намного легче работать. Лидары сразу создают 2D-(x, y) или 3D-(x, y, z) облака точек, тогда как при работе с камерами необходимо использовать определенные алгоритмы для создания облаков точек из стереокартинки. Облака точек используются как для задачи одометрии, так и для построения карт. Карты облаков точек (2D или 3D) можно представить в виде карты-сетки или карты, как на рис. 5.

Наиболее популярные алгоритмы сопоставления точек – это «итерационная ближайшая точка» (ICP) и алгоритмы преобразования нормального распределения (NDT). Чтобы оценить движение, сопоставляют последовательные облака точек. Полученное перемещение (пройденное расстояние) помогает рассчитать одометрию и тем самым локализовать робота [3].

По сравнению с облаком точек, создаваемым камерой, лидарное облако точек имеет гораздо меньшую плотность. Из-за этого могут возникать трудности при нахождении ключевых признаков, необходимых для сопоставления с предыдущими кадрами. Например, в местах с малым количеством препятствий или в пустом коридоре транспортное средство не сможет отслеживать свое перемещение и локализоваться. Из-за этих проблем локализация для автономных транспортных средств может включать объединение других результатов измерений – одометрии колес, глобальной навигационной спутниковой системы (GPS), данных IMU и т. д.

Если в задаче предполагается использование робота в простой и не динамичной среде, например на складе товаров, то можно ограничиться двумерным лазерным сканером в качестве датчика для навигации и построения карты. Если речь идет о более серьезных автономных системах – таких, как БПЛА или городской автомобиль, то требуется уже большее количество данных и использование 3D LiDAR SLAM.

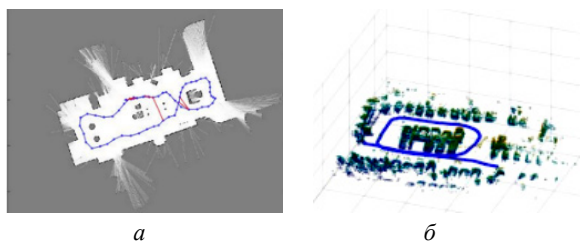


Рис. 5. Карты, построенные с использованием:

a – 2D-лидар; b – 3D-лидар

Fig. 5. Maps constructed using:

a – 2D lidar; b – 3D lidar

Проведение тестирований как в закрытых помещениях, так и на открытых территориях, для оценки производительности, точности навигации и способности адаптироваться к изменениям окружающей среды. Реализация SLAM:

1. RTAB-Map (Real-Time Appearance-Based Mapping) – это подход SLAM на основе RGB-D, стерео и лидарных графов, основанный на инкрементальном детекторе замыкания цикла на основе визуальных особенностей. Для обнаружения замыкания цикла используется метод «мешка слов» (Bag-of-words), который оценивает вероятность того, что новое изображение соответствует предыдущему или новому местоположению [4]. Когда детектор замыкания цикла предполагает наличие цикла, новое ограничение добавляется в граф карты, а затем оптимизатор графа минимизирует ошибки в карте. Для управления памятью применяют специальный подход, который ограничивает количество хранимых мест для обнаружения цикла и оптимизации графа таким образом, чтобы всегда соблюдались ограничения реального времени, даже в больших средах. RTAB-Map может использоваться как независимый инструмент для построения карт «с рук» при помощи Kinect, стереокамеры или 3D-лидара, или на роботе для создания карт с тремя степенями свободы. Отличительные особенности и выходные данные других алгоритмов описаны далее.

2. VINS-Mono [5] предоставляет текущее облако точек одометрии, но не карту. Помимо RTAB-Map и RGBDSLAMv2 [6], ни один из подходов визуального SLAM не предоставляет карты занятости, необходимых для автономной навигации. RGBDSLAMv2, вероятно, представляет собой подход визуального SLAM, имеющий наибольшее сходство с RTAB-Map, поскольку оба могут использовать внешнюю одометрию для оценки движения. Хотя они не объединяют IMU с камерой, они все равно могут использовать подход визуально-промежуточной одометрии при помощи внешних входных данных одометрии. Они также могут генерировать трехмерную сетку занятости (OctoMap) и плотное облако точек. Однако RTAB-Map также может предоставлять двухмерную карту занятости, как и подходы SLAM на основе лидара. На рис. 6 представлена блок-схема подхода RTAB – Map SLAM. В блок синхронизации (Synchronization) попадают данные с датчиков робота – энкодеров, камер глубины, лидаров, а также информация об их взаимном

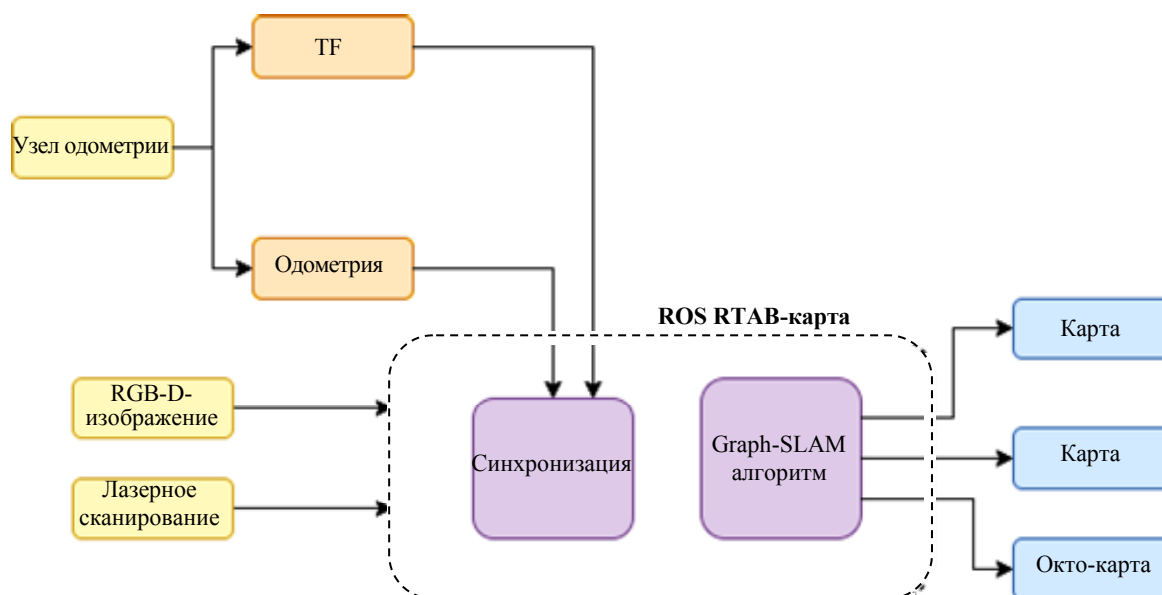


Рис. 6. Блок-схема подхода RTAB – Map SLAM
Fig. 6. Block diagram of the RTAB – Map SLAM approach

расположении. Синхронизация необходима для того, чтобы изображение с камеры, лидаров и данные о местоположении робота были выровнены между собой во времени и пространстве. Результирующий набор данных попадает в узел Graph-Slam, выходом которого служат карты занятости в различном представлении.

RTAB-Map использует цветное изображение и данные глубины, получаемые от камер, и выделяет на них ключевые точки. Каждому изображению присваиваются данные о его положении в пространстве и ориентации камеры. Эти пары «изображение–координаты» сохраняются в базе данных для последующего сопоставления с другими кадрами. При получении новых изображений метод проверяет, знакомо ли ему это место. Если место уже известно, можно определить положение камеры в пространстве или скорректировать уже имеющиеся данные.

3. *Визуальный SLAM, инвариантный к изменению освещенности.* Рассмотрим методики, позволяющие роботам, использующим только камеры для навигации, бороться с проблемами, связанными с изменением освещенности в помещении. Данный подход предполагает создание нескольких карт, каждая из которых отображает одно и то же место в различных условиях освещенности. Эти карты могут быть использованы в любое время суток, чтобы обеспечить более надежную локализацию робота.

Визуальные системы SLAM, которые оперируют визуальными признаками, обычно эффективно работают в малодинамичных средах, при

наличии различных ключевых точек и при умеренных изменениях освещения. Создание невосприимчивого к изменениям освещенности SLAM-алгоритма на основе камеры – непростая задача, ведь визуальные признаки, снятые днем при естественном свете, могут значительно отличаться от тех, что были сняты ночью при искусственном освещении. Существуют датчики, менее подверженные изменению окружающей среды, – это лидары, однако они имеют ряд других недостатков, связанных с большими габаритами и высокой стоимостью.

Опыт работы с алгоритмами SLAM, включая используемые детекторами замыкания циклов, показал, что при многократном прохождении одной и той же территории, где атмосферные условия периодически меняются (например, смена «день–ночь»), обнаружение замыканий циклов более вероятно в местах, где ранее проводились сеансы картографирования и условия освещенности или атмосферные условия схожи.

На основе этого наблюдения рассматривается многосеансовый метод построения карт, обладающих инвариантностью к условиям освещенности, используя визуальный SLAM-подход.

Концепция улучшения повторной локализации в условиях изменения освещенности посредством многократного картографирования одной и той же области уже рассматривалась в работах, посвященных системам долгосрочной локализации (Lifelong localization) [P. Muhlfehlner, M. Bürki, M. Bosse, W. Derendarz, R. Philippsen, P. Furgale (2016). Summary maps for lifelong visual localiza-

tion. J. of Field Robotics, 33(5): 561–590.], [Rosen D. M., Mason J., and Leonard J. J. (2016). Towards lifelong feature-based mapping in semistatic environments. In IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). P. 1063–1070. IEEE.]. Эти системы разрабатываются с учетом потребности в адаптации карты к изменениям в окружающей среде, чтобы предотвратить ухудшение качества локализации со временем. Однако существует риск того, что робот может неправильно обновлять карту, что сильно повлияет на эффективность локализации.

Рассматривая доступные алгоритмы картографирования и локализации, можно сделать вывод, что большинство методов работают в два этапа:

- фаза SLAM, в ходе которой создается карта окружающего пространства;

- фаза локализации, во время которой робот самостоятельно перемещается, решая поставленные задачи, а карта остается неизменной.

Перед тем как робот начнет автономное перемещение, человек может исправить грубые ошибки в созданной карте. Также в любой момент для обновления карты может быть запущена новая фаза SLAM.

Запуск таких обновлений вручную может привести к увеличению объема технического обслуживания роботов, особенно тех, которые работают в динамичных средах, например в магазинах или на складах. Поэтому более предпочтительно использование системы локализации, которая может функционировать на протяжении всего срока эксплуатации робота. Гибкий метод включает в себя два ключевых этапа.

Первый этап – это фаза SLAM, на которой создается мультисессионная карта, содержащая различные варианты освещенности в одних и тех же местах. На этом этапе также происходит поиск замыкания цикла для коррекции карты, а также для объединения разных карт в один координатный фрейм.

Второй этап – фаза локализации. Здесь робот определяет свое местоположение, используя ранее созданную карту. В обеих фазах применяется один и тот же метод локализации.

Аналогично [7] и [8] одна из ключевых особенностей многосеансового этапа SLAM, по сравнению с картой опыта (Experience Map), – то, что взаимосвязь между локациями в разных сеансах не ограничивается только топологическими аспектами, а также учитывает ограничения на все степени свободы.

Для создания мультисессионной карты необходимо учитывать, что между сеансами должно пройти время, чтобы изменилось освещение. Если

ли между сеансами будет проходить небольшое время, то новые кадры не будут добавляться, так как они будут в точности совпадать с предыдущими. С другой стороны, если пройдет слишком много времени и внешний вид окружающей среды изменится настолько сильно, что не получится найти соответствие с предыдущей картой, то в таком случае не удастся создать мультисессионную карту для автоматического функционирования робототехнической системы.

Выбор типа ключевых точек в зависимости от их способности сохранять инвариантность к изменениям освещенности может оказать влияние на конечный объем многосеансовой карты. Некоторые ключевые точки быстро вычисляются и занимают небольшое количество памяти, но для представления различных условий освещенности среды таких точек потребуется много. Другие ключевые точки более устойчивы к изменениям освещенности, масштаба, но, с одной стороны, их вычисление более ресурсозатратно и растет занимаемая память, однако, с другой стороны, таких точек потребуется меньше.

Выбор типа ключевых точек повлияет на количество сеансов, необходимых для достижения одинаковой точности локализации. Так, например, нейросетевые алгоритмы имеют значительно большую устойчивость к освещению по сравнению с классическими алгоритмами. В целом, есть возможность написать собственный детектор ключевых точек под необходимую задачу, либо же обучить нейросеть.

На рис. 7 показан пример возможной многосеансовой карты. Здесь карта собрана из трех сеансов картографирования, а именно в 12:00, 18:00 и 23:00. Также на схеме показаны два сеанса локализации – один в дневное время, а другой ранним утром, в 16:00 и 04:00 соответственно. Пунктирные связи показывают, в каких узлах графа был выполнен повторный процесс локализации для соответствующего кадра. Главная цель заключается в том, чтобы новые кадры могли успешно повторно локализоваться в тех же узлах, которые соответствуют одному и тому же времени. Если время локализации находится между двумя отметками времени, то повторная локализация может переключаться между двумя или более сессиями внутри многосеансовой карты. В пределах многосеансовой карты каждая отдельная карта преобразуется в общую глобальную систему координат (в данном примере – Map1). Это обеспечивает согласованность координат, что позволяет роботу успешно выполнять повторную локализацию в разных сессиях, не переключаясь между разными системами координат.

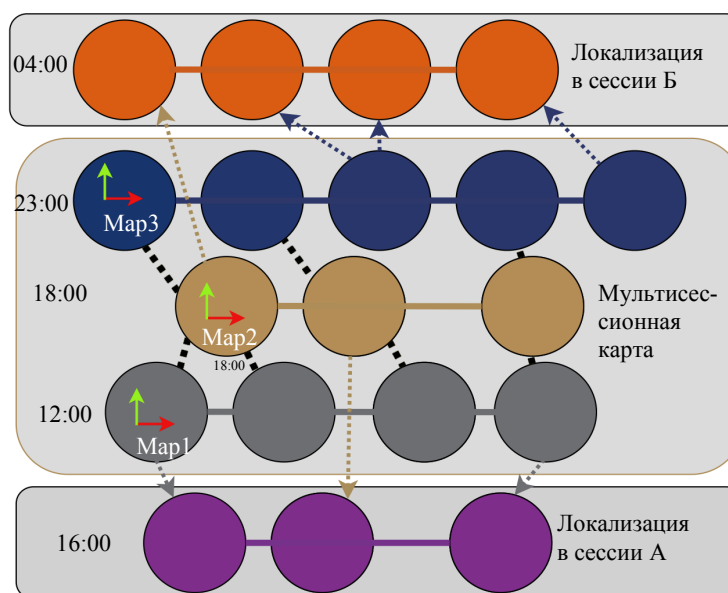


Рис. 7. Структура мультисесссионной карты
Fig. 7. The structure of the multisession card

Три сессии, снятые в разное время, были объединены на этапе SLAM с помощью поиска замыканий циклов между ними (пунктирные линии без стрелок). Каждая карта имеет свой координатный фрейм. На этапе «только локализации» сеанс локализации А (16:00) повторно локализуется относительно дневных сеансов на карте (12:00 и 18:00), а сеанс локализации В (04:00) повторно локализуется только относительно ночного сеанса (23:00).

Для оценки влияния естественного света, поступающего из окон в течение дня, все лампы в помещении были включены во время всех замеров. Помимо естественного освещения, меняющегося в течение дня, на RGBD-камере были включены автоэкспозиция и автобаланс белого. Эти параметры играют ключевую роль в создании качественных фотографий. Автоэкспозиция регулирует количество света, попадающего на сенсор камеры, чтобы обеспечить правильное экспонирование изображения, что помогает избежать недоэкспонированных (слишком темных) или переэкспонированных (слишком светлых) снимков. Баланс белого, в свою очередь, корректирует цветовую температуру изображения, чтобы цвета выглядели естественно и соответствовали условиям освещения. Например, при съемке в помещении с лампами накаливания баланс белого поможет убрать желтый оттенок, который может появиться из-за теплого света ламп.

Включение этих функций позволяет камере автоматически адаптироваться к различным условиям освещения, что особенно полезно для задач локализации, – ведь нужно, чтобы снимки имели

одинаковый вид независимо от количества света, попадающего на сенсор камеры, а также типа освещения. Однако, несмотря на удобство, автоэкспозиция и баланс белого иногда могут давать неожиданные результаты, особенно в сложных условиях освещения. Рис. 8 иллюстрирует, что происходит, когда большее освещение поступает снаружи: при этом автоэкспозиция делает внутреннее пространство очень темным, когда камера проходит мимо окна. Для сравнения, в ночное время никаких изменений не происходило. Для нейтрализации данного эффекта можно перейти на ручную настройку, но это лишь породит большее число проблем.

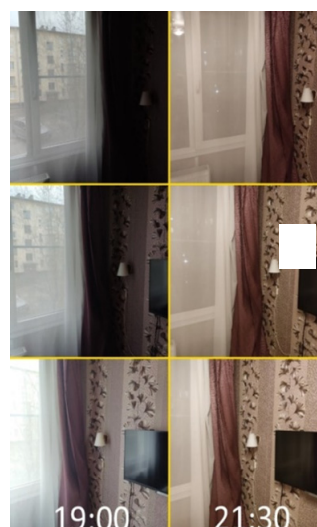


Рис. 8. Влияние экспозиции на вид изображения с камеры на трех последовательных кадрах в разное время суток
Fig. 8. The effect of exposure on the view of the camera image on three consecutive frames at different times of the day

Таким образом, для конкретного набора данных большинство изменений освещенности происходит либо от естественного освещения (рис. 9), либо от вариаций автоэкспозиции.

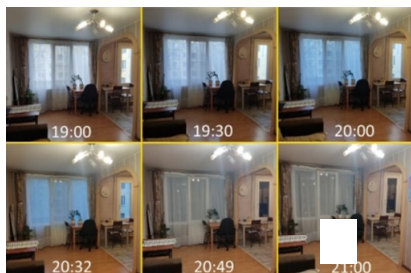


Рис. 9. Изменение сцены из-за естественного освещения
 Fig. 9. Changing the scene due to natural light

В проведенном эксперименте оценивается эффективность локализации с использованием мультисессионных карт, созданных на основе карт, сформированных в разное время в ходе шести сеансов картографирования. Были протестированы шесть различных комбинаций мультисессионных карт (рис. 10), числа в списке означают используемые комбинации карт при сеансе локализации. Всего было записано 6 карт с интервалом примерно 30 мин, числа соответствуют времени записи карты: 1 – 18:40; 2 – 19:20; 3 – 19:50; 4 – 20:20; 5 – 20:50; 6 – 21:30:

– 1+6 объединяет две сессии создания карты с наибольшими изменениями освещенности (время построения карты 18:40 и 21:30);

– 1+3+5 и 2+4+6 – мультисессионные карты, созданные в предположении, что построение карты будет происходить каждый час;

– 1+2+3+4+5+6 – комбинация всех карт, снятых с интервалом в 30 мин.

Эти мультисессионные карты были объединены без редукции графа, что позволило сохранить все узлы всех сессий. Для сравнения: мультисессионная карта 1–2–3–4–5–6 представляет собой собранные карты с включенной редукцией графа. Рис. 10 иллюстрирует для каждой мультисессионной карты показатели локализации, где по оси абсцисс показан вариант карты, а по оси ординат – время, соответствующее сеансу локализации. Шкала указывает на отношение кадров с удачной локализацией ко всем кадрам в течение сеанса (измеряется в процентах и обозначается символом σ). Для классических алгоритмов справедливо правило, что чем больше карт участвует в процессе локализации, тем лучше показатели, причем наилучшие показатели демонстрирует мультисессионная карта 1+2+3+4+5+6, а 1–2–3–4–5–6 не сильно отстает от нее.

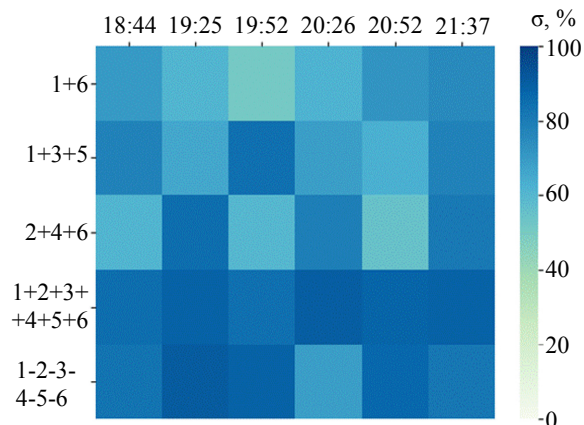


Рис. 10. Повторная локализация кадров с течением времени по пяти мультисеансовым картам
 Fig. 10. Re-localization of frames over time using five multi-session maps

Как и предполагалось, использование много-сеансовых карт повышает эффективность локализации. Однако такой подход может быть сложно реализовать в течение нескольких сезонов, поскольку общие изменения освещенности не всегда происходят в одно и то же время. Кроме того, смена погоды (дождливые, солнечные или облачные дни) приводит к изменению условий освещенности в одно и то же время суток.

Еще одна проблема заключается в обеспечении корректного совмещения карт в одной и той же системе координат исходной карты, а также на протяжении всей траектории. Со временем может произойти глобальный дрейф локализации, который называют эффектом «фотокопии» [9]. Также при многосессионном подходе выбор сессии картографирования осуществляется неявно, отбором лучших кандидатов на обнаружение замыкания контура по всем сессиям.

Применение визуальных маркеров в системах локализации беспилотных мобильных платформ. Мобильные платформы активно используют информацию, получаемую от различных датчиков, для создания цифровых карт и обеспечения локализации и навигации в процессе движения. В процессе восприятия окружающей среды платформы, оборудованные лидарами, стереокамерами, энкодерами и инерциальными измерительными блоками, собирают данные об окружающей среде и преобразуют их в информацию, необходимую для управления движением. Процесс локализации заключается в определении местоположения робота на цифровой карте с использованием данных от высокоточных датчиков. Это позволяет затем планировать траекторию движения, учитывая текущее положение и картографиче-

скую информацию. Несмотря на преимущества методов, использующих двумерные лидары, они также обладают определенными недостатками.

Проблемы с локализацией могут возникнуть в условиях, где геометрические черты окружающей среды мало различимы. Лидар, который зависит от расстояния до объектов и их способности отражать свет, может ошибаться с точным определением местоположения в таких условиях. Если мобильная платформа сталкивается с множеством однотипных пространств, это усложняет ее способность адекватно локализоваться.

Точность сенсорных данных также подвержена влиянию изменений освещения, что существенно влияет на процесс локализации.

Ограничения в обзоре окружающей среды происходят из-за того, что лидар сканирует только в одной плоскости, и это может привести к пропуску важной информации о предметах, расположенных вне этой плоскости. В результате доступ к полезным данным для определения местоположения ограничен.

В настоящее время для повышения точности локализации часто используется система с визуальными маркерами. Они установлены в окружающей среде и автоматически распознаются камерами благодаря специализированным алгоритмам детекции. Такой подход обладает устойчивостью к различным внешним факторам, включая углы обзора, окклюзию (частичное или полное перекрытие метки) и изменения расстояния.

В системах автономных мобильных платформ визуальные маркеры обычно размещаются в фиксированных точках. Это позволяет определить положение движущейся камеры, что в свою очередь дает возможность оценить положение и ориентацию мобильной платформы, а также локализоваться относительно маркера [10]. Применение систем на основе визуальных меток отличается устойчивостью к таким факторам, как угол обзора, окклюзия и изменение расстояния.

Большинство визуальных маркеров обладают общей конструктивной особенностью – прямоугольной рамкой, внутри которой находится шаблон с закодированной информацией. Наличие четырех углов вокруг маркера позволяет однозначно определить его положение и ориентацию относительно камеры. Как видно из рис. 11 [11], все метки имеют монохромное изображение, что снижает чувствительность к условиям освещения. Это устраняет необходимость определения оттенков серого, упрощая задачу до порогового решения.

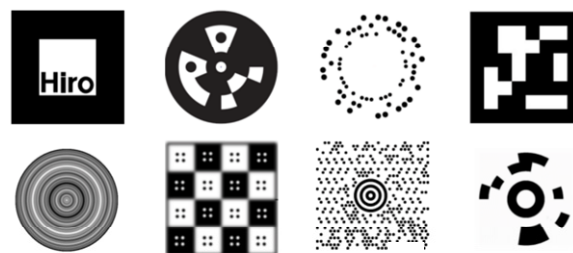


Рис. 11. Различные семейства визуальных маркеров
Fig. 11. Different families of visual markers

Все маркеры применяются для выполнения двух этапов: сначала происходит выделение уникальных характеристик, а затем их идентификация. На первом этапе обнаружения маркер обычно имеет квадратную форму, что упрощает его распознавание. На втором этапе изображение анализируется внутри рамки маркера для окончательного определения, является ли объект маркером. Маркеры могут быть спроектированы по-разному и использовать различные алгоритмы обнаружения и распознавания, чем определяется их эффективность и применимость в различных ситуациях. Оценка эффективности маркеров основывается на нескольких критериях – устойчивость к закрытию, вероятность неверной идентификации маркера и способность к адаптации к изменениям освещения и размера маркера, что зависит от расстояния до него [12].

AprilTag – это метод позиционирования кодовых меток, фиксирующий конкретную двухмерную метку через камеру. После ряда вычислений можно извлечь преобразование координат метки относительно камеры для дальнейшей локализации или применения.

Процесс обнаружения состоит из нескольких этапов: первоначально вычисляется значение и направление градиента в каждом пикселе изображения, содержащего метку AprilTag, которые в дальнейшем группируются в кластеры [13], называемые компонентами, с помощью графового метода. С помощью метода взвешенного наименьшего квадрата на каждый компонент накладывается линия, причем направление градиентов определяет направление сегментов линии. Таким образом, каждая линия будет иметь темную область слева и светлую (белую) – справа. Далее после идентификации всех линий определяются возможные четырехугольники. Кроме того, с помощью гомографии и внутренней оценки по извлеченной метке определяется позиция метки в системе координат камеры 6-DOF. Более детально алгоритм распознавания маркера AprilTag представлен на рис. 12.

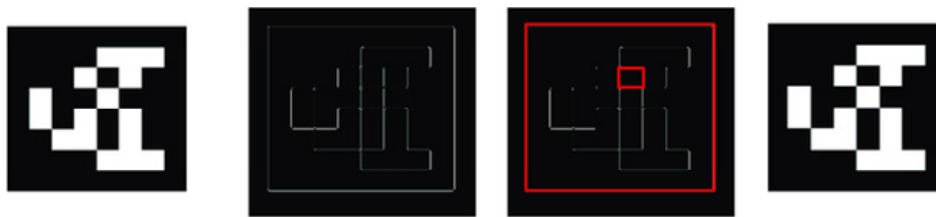


Рис. 12. Процесс обнаружения визуальных маркеров AprilTag
 Fig. 12. Visual representation of the AprilTag visual marker detection process

Алгоритм AprilTag использует лексикод для кодирования внутреннего рисунка меток, определяемый двумя ключевыми параметрами: количеством бит внутреннего рисунка и минимальным расстоянием Хэмминга между любыми двумя кодами. Эта система позволяет эффективно обнаруживать и корректировать ошибки. В AprilTag существуют различные семейства тегов, отличающиеся указанными параметрами. Например, семейство тегов «Tag36h11» представляет собой 36-битные теги (массив 6×6) с минимальным расстоянием Хэмминга в 11 бит, а «Tag16h5» – это 16-битные теги (массив 4×4) с минимальным расстоянием Хэмминга в 5 бит [14]. Более того, поскольку камера, установленная на мобильной платформе, изменяет свое положение вместе с движением робота, то она выдает серию поз в каждый момент времени, которые показывают положение робота вдоль траектории движения [15], [16].

Тестирование визуальных маркеров AprilTag.

Для проверки корректности работы алгоритма было принято решение внедрить визуальные маркеры AprilTag в алгоритм RTAB-Map. RTAB-Map также использует технику петлевого замыкания (loop closure) [17], позволяющую алгоритму распознавать места, которые он уже посещал ранее. Это существенно для уменьшения ошибок в определении местоположения и создания более точной карты [18]. В начале работы подсистема локализации синхронизирует и обрабатывает данные, полученные от стереокамеры. Каждый кадр содержит пары изображений, полученные из разных ракурсов, что позволяет системе оценивать глубину объектов в сцене. Этот этап называется стереорекоonstrukцией и играет ключевую роль в создании трехмерной модели окружающей среды [19].

Далее, с учетом данных стереокамеры, система приступает к процессу извлечения и отслеживания ключевых точек в кадрах. Эти ключевые точки служат уникальными ориентирами для определения положения робота в пространстве и обеспечивают навигацию по среде.

На следующем этапе происходит построение и обновление карты. RTAB-Map использует методы, основанные на алгоритмах SLAM, для ин-

крементального построения и обновления трехмерной модели. Данные о ключевых точках и глубине сцены объединяются для формирования точной карты, отражающей геометрию и особенности окружающего пространства.

RTAB-Map также учитывает информацию о положении камеры в каждый момент времени, что позволяет устойчиво связывать различные кадры во времени и пространстве. Этот процесс называется SLAM-последовательностью и служит важным компонентом обеспечения непрерывности построения карты. В итоге, результатом работы RTAB-Map с использованием стереокамеры становится высокоточная трехмерная карта среды, которую можно использовать для автономной навигации и выполнения различных задач в робототехнике. Локализацию мобильной платформы, основанной на алгоритме RTAB-Map, демонстрирует на рис. 13. Для отображения визуальных данных применяются внутренние инструменты и пакеты ROS (Robot Operating System).

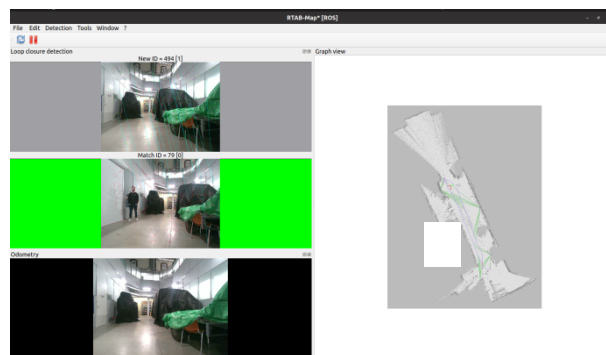


Рис. 13. Результат тестирования алгоритма RTAB-Map
 Fig. 13. The result of testing RTAB-Map algorithms

После того как система успешно прошла тестирование в условиях, аналогичных тем, при которых была создана карта, произошло изменение искусственного освещения. Это изменение повлияло на сопоставление текущих кадров с полученными ранее, затруднив процесс локализации. В результате мобильная платформа смогла эффективно локализоваться только с помощью визуальных маркеров AprilTag (рис. 14).

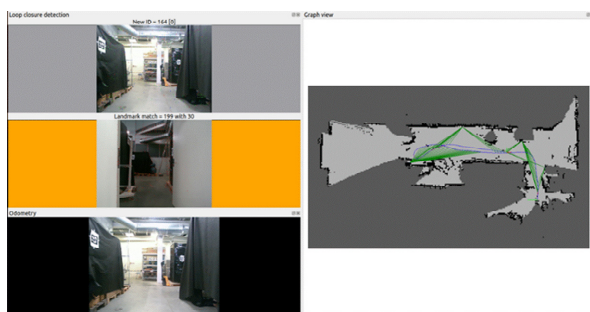


Рис. 14. Результат тестирования алгоритма RTAB-Map
Fig. 14. The result of testing RTAB-Map algorithms

Этот подход предлагается применять в условиях, где освещение может варьироваться, — к примеру, во внутренних помещениях с искусственным освещением или наружных пространствах с изменяющимся естественным светом. Маркеры AprilTag обеспечивают устойчивость к теням, блеску и другим факторам, которые могут повлиять на качество локализации.

Система глобальной маршрутизации. В рамках разработки системы глобального планирования маршрута используется библиотека Leaflet и плагин Leaflet Routing Machine. Эти инструменты предоставляют удобный и эффективный способ построения и визуализации маршрутов на интерактивных картах, что особенно важно для тестирования и демонстрации работы системы. Пример визуализации маршрута, полученный при запуске системы в любом доступном браузере, представлен на рис. 15.

Для непосредственного построения маршрутов на карте использовался плагин Leaflet Routing Machine, который взаимодействует с внешними сервисами маршрутизации — OSRM (Open Source Routing Machine), GraphHopper и Mapbox Directions и др. Этот плагин выполняет функции интерфейса между Leaflet и серверами маршрутизации, которые обрабатывают и предоставляют данные о маршрутах. Leaflet Routing Machine позволяет зада-

вать начальные и конечные точки, а также промежуточные точки маршрута, что делает его подходящим для глобального планирования движения беспилотного транспортного средства.

Результаты интеграции Leaflet и Leaflet Routing Machine в разработке системы глобального планирования для нашей навигационной платформы позволят обеспечить наглядное и интуитивно понятное представление маршрутов, а также реализовать динамическое обновление маршрута с учетом изменений в условиях движения.

Выводы. В результате проведенного анализа аппаратных и программных средств была разработана система управления верхнего уровня беспилотной мобильной платформы, включающая в себя следующие высокоуровневые датчики: стереокамеру Intel RealSense D435i, трехмерный лидар LSLIDAR C16 и инерциально-навигационный модуль ГКБ-3. В исследовании особое внимание было уделено вопросу обеспечения точной локализации мобильной платформы в условиях как закрытого, так и открытого пространства. Для выбора основополагающих алгоритмов был проведен ряд исследований, в ходе которых предпочтение по точности и стабильности работы было отдано многосессионному методу SLAM. Для повышения точности локализации в закрытом пространстве был предложен алгоритм на основе визуальных маркеров AprilTag, корректность работы которого не зависит от внешних факторов — освещения, погодных условий и т. д.

Заключение. В данной статье были рассмотрены проблемы и пути их решения при создании системы автономной навигации мобильной платформы. Посредством тестирований как в симуляторах, так и на реальном образце была выбрана определенная комбинация алгоритмов, обеспечивающая корректную работоспособность системы и включающая в себя: построение карты неиз-

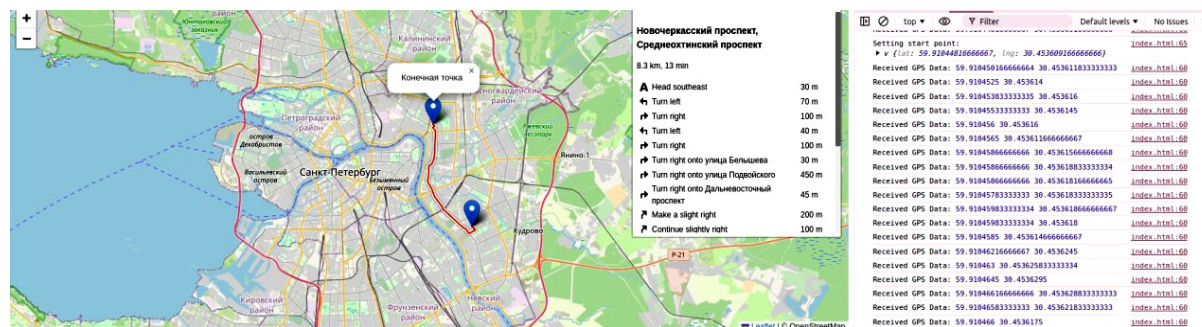


Рис. 15. Интерактивная карта с визуализацией маршрута
Fig. 15. Interactive map with route visualization

вестной окружающей среды, с комбинацией таких высокоуровневых датчиков, как лидар и стереокамера, локализация на записанной ранее карте, выбор глобального и локального планировщика и настройка их параметров под задачи системы.

Особое внимание в данной статье уделялось тому, чтобы система могла корректно работать не просто в закрытом помещении, но в том, в котором окружающая среда подвержена частым изменениям. Отсюда следовал ряд проблем, которые необходимо было решать, – например, каким образом мобильная платформа будет локализоваться в разное время суток? Или как будет вести себя система, если перекрыть ей движение?

Сравнив различные конфигурации датчиков и настроив параметры глобального и локального планировщика, удалось добиться того, что система будет работать полностью автономно и на ее работу не будут влиять изменения, происходящие в окружающей среде.

Подобные системы могут пользоваться спросом в складских и производственных помещениях, где круглосуточно ведутся работы по сортировке и транспортировке грузов между цехами или точками производства.

В дальнейшем систему планируется совершенствовать, в том числе в условиях открытой пересеченной местности.

Список литературы

1. Autonomous navigation with simultaneous localization and mapping in/outdoor. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:231835902> (дата обращения: 09.08.2024).
2. Huang B., Zhao J., Liu J. A survey of simultaneous localization and mapping with an envision in 6G Wireless Networks // J. of Global Positioning Syst. (Springer Science+Business Media). 2019. Vol. 17, no. 1. P. 94–127.
3. Comparing ICP variants on real-world data sets / F. Pomerleau, F. Colas, R. Siegwart, S. Magnenat // Autonomous Robots. 2013. T. 34, no. 3. C. 133–148.
4. Labbé M., Michaud F. RTAB-Map as an open-source lidar and visual simultaneous localization and mapping library for large-scale and long-term online operation // J. of Field Robotics. 2019. T. 36, no. 2. P. 416–446.
5. Qin T., Li P., Shen S. VINS-Mono: A robust and versatile monocular visual-inertial state estimator // IEEE Transactions on Robotics. 2018. T. 34, no. 4. P. 1004–1020.
6. 3D mapping with an RGB-D camera / F. Endres, J. Hess, J. Sturm, D. Cremers, W. Burgard // IEEE Transactions on Robotics. 2014. Vol. 30, no. 1. P. 1–11.
7. Appearance-based landmark selection for efficient long-term visual localization / M. Bürki, I. Gilitschenski, E. Stumm, R. Siegwart, J. Nieto // 2016 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). Daejeon, Korea (South): IEEE, 2016. P. 1–7.
8. I can see for miles and miles: An extended field test of visual teach and repeat 2.0 / M. Paton, K. MacTavish, L.-P. Berczi, S. Kai van Es, T. D. Barfoot // Field and Service Robotics. Springer Proc. in Advanced Robotics (SPAR). 2018. Vol. 5. P. 415–431.
9. Predictive and adaptive maps for long-term visual navigation in changing environments / L. Halodová, E. Dvoráková, F. Majer, T. Vintr, Ó. Mozos, F. Dayoub, T. Krajník // 2019 IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Syst. (IROS). Macau, China: IEEE, 2019. P. 7033–7039.
10. Yu L., Li M., Pan G. Indoor localization based on fusion of AprilTag and adaptive Monte Carlo // 2021 IEEE 5th Inform. Technol., Networking, Electronic and Automation Control Conf. (ITNEC). Xi'an, China: IEEE, 2021. Vol. 5. P. 464–468.
11. Park S., Lee G. Mapping and localization of cooperative robots by ROS and SLAM in unknown working area // 2017 56th Ann. Conf. of the Soc. of Instrument and Control Engin. of Japan (SICE). Kanazawa, Japan: IEEE, 2017. P. 858–861.
12. Wang J., Olson E. AprilTag 2: Efficient and robust fiducial detection // 2016 IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Syst. (IROS). Daejeon, Korea: IEEE, 2016. P. 4193–4198.
13. Annusewicz A., Zwierzchowski J. Marker detection algorithm for the navigation of a mobile robot // 2020 27th Intern. Conf. on Mixed Design of Integrated Circuits and Syst. (MIXDES). Lodz, Poland: IEEE, 2020. P. 223–226.
14. Qi J., Guan X., Lu X. An autonomous pose estimation method of MAV based on monocular camera and visual markers // 2018 IEEE 8th Ann. Intern. Conf. on CYBER Technol. in Automation, Control, and Intelligent Syst. (CYBER). Tianjin, China: IEEE, 2018. P. 480–485. doi: 10.1109/CYBER.2018.8688085.
15. Optimizing fiducial marker placement for improved visual localization / Q. Huang, J. DeGol, V. Frago, S. N. Sinha, J. J. Leonard // IEEE Robotics and Automation Lett. 2023. Vol. 8, no. 5. P. 2756–2763. doi: 10.1109/LRA.2023.3260700.
16. Visual assist system with enhanced localization for indoor navigation of visually impaired people / D. Adapa, V. S. Shekhawat, A. Gautam, S. Mohan // IEEE Access. 2024. Vol. 12. P. 162075–162093. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3482714.
17. Virtual experiments on ArUco and AprilTag Systems Comparison for fiducial marker rotation resistance under noisy sensory data / A. Zakiev, T. Tsoy, K. Shabalina, E. Magid and S. K. Saha // 2020 Intern. Joint Conf. on Neural Networks (IJCNN). Glasgow, UK: IEEE, 2020. P. 1–6. doi: 10.1109/IJCNN48605.2020.9207701.
18. Liu Y., Schofield H., Shan J. Intensity Image-based LiDAR fiducial marker system // IEEE Robotics and Auto-

mation Lett. 2022. Vol. 7, no. 3. P. 6542–6549. doi: 10.1109/LRA.2022.3174971.

19. Fiala M. Designing highly reliable fiducial markers // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intel-

ligence. 2010. Vol. 32, no. 7. P. 1317–1324, July 2010, doi: 10.1109/TPAMI.2009.146.

Информация об авторах

Масленникова Екатерина Андреевна – ассистент кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: eamaslennikova@etu.ru

Саламахин Антон – ассистент кафедры робототехники и автоматизации производственных систем. СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: asalamakhin@etu.ru

Филатов Денис Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: dmfilatov@etu.ru

Трутс Александр Александрович – зам. гл. конструктора по робототехнике и роботостроению. Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК). Тихорецкий пр., д. 21, Санкт-Петербург, 194064, Россия.

E-mail: a.truts@rtc.ru

Григорьев Павел Сергеевич – начальник сектора Федерального государственного автономного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК). Тихорецкий пр., д. 21, Санкт-Петербург, 194064, Россия.

E-mail: p.grigorev@rtc.ru

Вклад авторов:

Масленникова Е. А. – написание текста статьи, разработка системы локализации в условиях замкнутого помещения и планирования беспилотной мобильной платформы.

Саламахин А. – написание текста статьи, проведение исследования в области локализации на открытой местности, разработка ПО.

Филатов Д. М. – постановка задачи, общее руководство, выводы.

Трутс А. А. – подбор аппаратной части, разработка методики оценки точности работы системы управления.

Григорьев П. В. – обзор литературы, проведение экспериментов.

References

1. Autonomous navigation with simultaneous localization and mapping in/outdoor. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:231835902> (дата обращения: 09.08.2024).

2. Huang B., Zhao J., Liu J. A survey of simultaneous localization and mapping with an envision in 6G Wireless Networks // J. of Global Positioning Syst. (Springer Science+Business Media). 2019. Vol. 17, no. 1. P. 94–127.

3. Comparing ICP variants on real-world data sets / F. Pomerleau, F. Colas, R. Siegwart, S. Magnenat // Autonomous Robots. 2013. T. 34, no. 3. C. 133–148.

4. Labbé M., Michaud F. RTAB-Map as an open-source lidar and visual simultaneous localization and mapping library for large-scale and long-term online operation // J. of Field Robotics. 2019. T. 36, no. 2. P. 416–446.

5. Qin T., Li P., Shen S. VINS-Mono: A robust and versatile monocular visual-inertial state estimator // IEEE Transactions on Robotics. 2018. T. 34, no. 4. P. 1004–1020.

6. 3D mapping with an RGB-D camera / F. Endres, J. Hess, J. Sturm, D. Cremers, W. Burgard // IEEE Transactions on Robotics. 2014. Vol. 30, no. 1. P. 1–11.

7. Appearance-based landmark selection for efficient long-term visual localization / M. Bürki, I. Gilitschenski, E. Stumm, R. Siegwart, J. Nieto // 2016 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). Daejeon, Korea (South): IEEE, 2016. P. 1–7.

8. I can see for miles and miles: An extended field test of visual teach and repeat 2.0 / M. Paton, K. MacTavish, L.-P. Berczi, S. Kai van Es, T. D. Barfoot // Field and Service Robotics. Springer Proc. in Advanced Robotics (SPAR). 2018. Vol. 5. P. 415–431.

9. Predictive and adaptive maps for long-term visual navigation in changing environments / L. Halodová, E. Dvoráková, F. Majer, T. Vintr, Ó. Mozos, F. Dayoub, T. Krajník // 2019 IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Syst. (IROS). Macau, China: IEEE, 2019. P. 7033–7039.

10. Yu L., Li M., Pan G. Indoor localization based on fusion of AprilTag and adaptive Monte Carlo // 2021 IEEE 5th Inform. Technol., Networking, Electronic and Automation Control Conf. (ITNEC). Xi'an, China: IEEE, 2021. Vol. 5. P. 464–468.

11. Park S., Lee G. Mapping and localization of cooperative robots by ROS and SLAM in unknown working area // 2017 56th Ann. Conf. of the Soc. of Instrument and Control Engin. of Japan (SICE). Kanazawa, Japan: IEEE, 2017. P. 858–861.

12. Wang J., Olson E. AprilTag 2: Efficient and robust fiducial detection // 2016 IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Syst. (IROS). Daejeon, Korea: IEEE, 2016. P. 4193–4198.

13. Annusewicz A., Zwierzchowski J. Marker detection algorithm for the navigation of a mobile robot // 2020 27th Intern. Conf. on Mixed Design of Integrated Circuits and Syst. (MIXDES). Lodz, Poland: IEEE, 2020. P. 223–226.

14. Qi J., Guan X., Lu X. An Autonomous Pose Estimation Method of MAV Based on Monocular Camera and Visual Markers // 2018 IEEE 8th Ann. Intern. Conf. on

CYBER Technol. in Automation, Control, and Intelligent Syst. (CYBER). Tianjin, China: IEEE, 2018. P. 480–485. doi: 10.1109/CYBER.2018.8688085.

15. Optimizing fiducial marker placement for improved visual localization / Q. Huang, J. DeGol, V. Frago, S. N. Sinha, J. J. Leonard // IEEE Robotics and Automation Lett. 2023. Vol. 8, no. 5. P. 2756–2763. doi: 10.1109/LRA.2023.3260700.

16. Visual assist system with enhanced localization for indoor navigation of visually impaired people / D. Adapa, V. S. Shekhawat, A. Gautam, S. Mohan // IEEE Access. 2024. Vol. 12. P. 162075–162093. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3482714.

17. Virtual experiments on ArUco and AprilTag Systems Comparison for fiducial marker rotation resistance under noisy sensory data / A. Zakiev, T. Tsoy, K. Shabalina, E. Magid and S. K. Saha // 2020 Intern. Joint Conf. on Neural Networks (IJCNN). Glasgow, UK: IEEE, 2020. P. 1–6. doi: 10.1109/IJCNN48605.2020.9207701.

18. Liu Y., Schofield H., Shan J. Intensity Image-based LiDAR fiducial marker system // IEEE Robotics and Automation Lett. 2022. Vol. 7, no. 3. P. 6542–6549. doi: 10.1109/LRA.2022.3174971.

19. Fiala M. Designing highly reliable fiducial markers // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2010. Vol. 32, no. 7. P. 1317–1324, July 2010, doi: 10.1109/TPAMI.2009.146.

Information about the authors

Ekaterina A. Maslennikova – Assistant of the Department of Automatic Control Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: eamaslennikova@etu.ru

Anton Salamakhin – Assistant of the Department of Robotics and Automation of Production Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: asalamakhin@etu.ru

Denis M. Filatov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automatic Control Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: dmfilatov@etu.ru

Alexander A. Truts – Deputy Chief Designer for Robotics and Robotics. Federal State Autonomous Scientific Institution «Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics» (SSC RF Central Research Institute of RTK). Tikhoretsky Av., 21, St. Petersburg, 194064, Russia.

E-mail: a.truts@rtc.ru

Pavel S. Grigoriev – Head of the sector of the Federal State Autonomous Scientific Institution «Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics» (SSC RF Central Research Institute of RTK). Tikhoretsky Av., 21, St. Petersburg, 194064, Russia.

E-mail: p.grigorev@rtc.ru

Contribution of the authors:

Maslennikova E. A. – writing the article, developing a localization system in a closed space and planning an unmanned mobile platform.

Salamakhin A. – writing the article, conducting research in the field of localization in open areas, developing software.

Filatov D. M. – problem statement, general management, conclusions.

Truts A. A. – hardware selection, development of a methodology for assessing the accuracy of the control system.
Grigoriev P. V. – literature review, conducting experiments.

Статья поступила в редакцию 28.11.2024; принята к публикации после рецензирования 21.02.2025; опубликована онлайн 25.04.2025.

Submitted 28.11.2024; accepted 21.02.2025; published online 25.04.2025.
