

На правах рукописи

Муравьев Кирилл Федорович

**Исследование методов и разработка алгоритмов
топологического картирования и локализации**

Специальность 1.2.2 —
«Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук».

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук
Яковлев Константин Сергеевич

Официальные оппоненты: **Вохминцев Александр Владиславович**,
доктор технических наук,
ФГБОУ высшего образования «Челябинский
государственный университет»,
заведующий лабораторией «Интеллектуаль-
ные информационные технологии и системы»

Визильтер Юрий Валентинович,
доктор физико-математических наук,
Федеральное автономное учреждение «Госу-
дарственный научно-исследовательский ин-
ститут авиационных систем»,
начальник подразделения «Системы техниче-
ского зрения»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт программных
систем им. А.К. Айламазяна Российской
академии наук

Защита состоится 09 декабря 2025 г. в 13 часов на заседании диссертацион-
ного совета 24.1.224.01 на базе ФИЦ ИУ РАН по адресу: 117312, г. Москва,
пр.-т 60-летия Октября, д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИЦ ИУ РАН по
адресу: 119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2 и на официаль-
ном сайте: https://www.frccsc.ru/diss-council/00207304/diss/list/44-muraviev_kf.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учре-
ждения, просьба направлять по адресу: 117312, г. Москва, пр.-т 60-летия
Октября, д. 9, ученому секретарю диссертационного совета 24.1.224.01.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2025 года.

Телефон для справок: +7(499)135-51-64.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.224.01,
д-р техн. наук

Смирнов Иван Валентинович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Задача одновременного картирования и локализации (ОКЛ) является одной из важнейших для обеспечения навигации робототехнических систем. Ее решение позволяет робототехнической системе определять свое положение в пространстве, не опираясь на системы глобального позиционирования, а также строить карту местности, учитывая изменения среды. Таким образом, успешное решение задачи ОКЛ дает возможность применять робототехнические системы в таких областях, как автоматизированная доставка грузов в условиях нестабильной работы систем спутникового позиционирования, поисково-спасательные операции, мониторинг и патрулирование различных объектов и др.

В настоящее время, как правило, задача ОКЛ решается методами, которые строят карту в виде плотных метрических структур, таких как двумерная сетка занятости или трехмерные воксельные сетки. Однако, в случае, к примеру, автоматизированной доставки, робототехнические системы преодолевают большие расстояния и картируют большие площади. В такой ситуации поддержание плотной метрической карты и коррекция ошибки одометрии требуют значительных затрат памяти и вычислительных ресурсов, что может привести к переполнению памяти, задержке обновления карты, накоплению ошибки позиционирования. Все это может привести к некорректной работе алгоритмов и, как следствие, — к остановке робота либо к столкновению его с препятствиями.

Альтернативным подходом к решению задачи ОКЛ является топологическое картирование и локализация. Идея такого подхода заключается в представлении окружающей среды в виде разреженных топологических структур, таких как граф локаций, вместо плотных метрических структур. За счет разреженности графа такой подход обеспечивает быстрое планирование пути и позволяет избавиться от накопления ошибки позиционирования при долговременной навигации. Таким образом, построение топологической карты и локализация в ней позволят обеспечить эффективную долговременную автономную навигацию робототехнических систем в средах большой площади.

В связи с этим актуальной является проблема разработки алгоритмов построения топологической карты по данным бортовых сенсоров робототехнической системы, а также проблема разработки алгоритмов локализации робототехнической системы в топологической карте.

Степень разработанности темы. Существует множество методов, которые используют графовые структуры для создания глобальной геометрической модели окружающей среды (метрической карты). Среди наиболее известных методов такого класса можно выделить ORB-SLAM3, Cartographer и RTAB-Map, которые используют графы позиций для глобальной оптимизации оценки траектории робота и коррекции построенной

метрической карты, и методы Voxgraph и GLIM, которые строят граф локальных метрических карт, объединяемых в общую глобальную метрическую карту. Существует довольно обширный класс методов, которые строят совместно метрическую и топологическую карту. Среди таких методов – Hydra, S-graphs+, IncrementalTopo. Общими недостатками подобных методов являются высокие затраты памяти и вычислительных ресурсов при построении плотной глобальной метрической карты пространств большой площади, а также неизбежное накопление ошибки глобального позиционирования при долговременной работе метода.

Развитие технологий глубокого обучения и рост мощности вычислителей привели к появлению обучаемых методов, решающих задачу ОКЛ с помощью построения графа локаций без использования метрических координат. Локализация в таких графах и перемещение между локациями осуществляется нейросетевыми методами. В качестве примеров таких методов можно привести NTS, ETP-Nav, VGM, TSGM. Однако такие методы, как правило, разрабатываются для решения определенной краткосрочной задачи, такой как навигация до одного целевого объекта, и работают преимущественно в симуляционных средах в небольших помещениях. Использование полностью нейросетевых методов при долгосрочной навигации может привести к ложным срабатываниям нейросетевой локализации, и, как следствие, к соединению ребрами удаленных друг от друга локаций и к ошибкам навигации. В работе исследователей из Монреаля представлен обучаемый алгоритм топологического картирования LTVN, пригодный для долгосрочной навигации, однако для начала его работы необходима предварительно построенная карта.

Еще одним направлением развития топологического картирования и локализации являются методы, которые строят глобальную топологическую карту в виде графа локаций с использованием локальной метрической информации. К настоящему моменту разработаны такие методы, предназначенные как для исследования и картирования помещений, так и для картирования открытых пространств, локализации и навигации по построенной карте в разное время суток.

Таким образом, на настоящий момент разработано множество методов решения задачи картирования и локализации с применением топологических структур, однако отсутствуют методы, обеспечивающие долговременную навигацию как в помещениях, так и на открытых пространствах с низкими затратами вычислительных ресурсов, что обуславливает необходимость данного исследования.

Целью работы является исследование и разработка вычислительно эффективных алгоритмов ОКЛ на основе топологических структур для повышения автономности мобильных робототехнических систем.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Провести анализ существующих методов топологического картирования и локализации.
2. Построить математическую модель задачи топологического картирования и локализации и оценки качества ее решения.
3. Разработать вычислительно эффективный алгоритм топологического картирования и локализации, обладающий высоким качеством локализации и построенной карты.
4. Создать программный комплекс топологического картирования и локализации, провести экспериментальные исследования разработанных алгоритмов с использованием предложенной математической модели в симуляционных средах и на реальных робототехнических системах.

Научная новизна работы состоит в следующем:

Предложен новый алгоритм построения и поддержания топологической карты в реальном времени. Карта представляется в виде графа локаций, не содержащих глобальных метрических координат. Такое представление позволяет выполнять долговременную навигацию без накопления ошибки позиционирования и снижает потребление вычислительных ресурсов и памяти при долговременной навигации.

Предложен двухэтапный алгоритм локализации в построенной карте, основанный на нейросетевых методах распознавания места (локации) и поиске относительной позиции путем сопоставления двумерных сканов местности. В отличие от аналогичных методов, предложенный подход позволяет фильтровать ложно распознанные нейросетевыми моделями локации и корректировать ошибку одометрии в реальном времени.

Реализован двухуровневый алгоритм планирования пути по построенной карте, который позволяет значительно ускорить планирование пути по сравнению с алгоритмами, использующими глобальную метрическую карту. Проведено экспериментальное исследование комплекса предложенных алгоритмов картирования, локализации и планирования пути в симуляционной среде и на данных с реальных робототехнических систем.

Предложена новая математическая модель оценки качества графов локаций. В отличие от аналогов, опирающихся на глобальные метрические координаты, предложенная модель позволяет оценивать качество графа с точки зрения путевой эффективности в случае отсутствия глобальных метрических координат в локациях графа. Предложена новая модель оценки качества локализации, которая помимо точности вычисления относительной позиции учитывает еще успешность локализации и долю ложно сопоставленных локаций. Проведено экспериментальное исследование известных алгоритмов топологического картирования и локализации

с помощью предложенных моделей оценки качества. Показано преимущество разработанного комплекса алгоритмов перед другими современными алгоритмами.

Теоретическая значимость работы обуславливается комплексом разработанных алгоритмов и моделей, которые создают основу как для создания новых топологических методов решения задачи ОКЛ, так и для улучшения существующих.

Практическая значимость работы заключается в реализации разработанных алгоритмов и моделей в виде комплекса программных средств для реальных робототехнических систем. Реализованные алгоритмы могут быть использованы для повышения автономности робототехнических систем различного типа и назначения.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. В соответствии с формулой специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (технические науки) в работе предложена математическая модель задачи топологического картирования и локализации и выполнены разработка, исследование и реализация алгоритмов и методов решения этой задачи. Работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности: п. 2. «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий», п. 3. «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента», п. 8. «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента», п. 9. «Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий (технические науки)».

Методология и методы исследования. Методы исследования и разработки алгоритмов топологического картирования и локализации основаны на теории графов, теории вероятностей, математической статистике, линейной алгебре, аналитической геометрии, компьютерном зрении, методах разработки и тестирования программного обеспечения для ЭВМ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Предложена математическая модель задачи топологического картирования и локализации, как построения графа локаций по входным данным с датчиков робота и определения текущей локации в построенном графе и положения внутри локации. Разработана модель оценки качества графа локаций, не требующая наличия глобальных метрических координат в локациях. Предложена новая модель оценки качества локализации в графе локаций.

2. Предложен алгоритм построения и поддержания карты местности в виде графа в реальном времени, обеспечивающий долговременную навигацию. Предложенный алгоритм основан на построении графа локаций без глобальных метрических координат, что позволяет избавиться от накопления ошибки позиционирования и повысить вычислительную эффективность методов автономной навигации.
3. Предложен двухэтапный алгоритм локализации в построенном графе локаций, основанный на глобальном поиске похожих локаций в графе с помощью нейросетевых методов и одновременной фильтрации результатов и нахождении относительной позиции с помощью сопоставления сканов. Предложенный алгоритм позволяет повысить точность локализации и уменьшить количество ложных сопоставлений текущего положения робота с локациями в графе.
4. Предложенные алгоритмы картирования и локализации реализованы в виде комплекса программных средств и выложены в открытый доступ. Программный комплекс позволяет сохранять и загружать построенные карты, настраивать параметры алгоритмов и запускать реализации алгоритмов на различных робототехнических системах без доработки исходного кода.

Достоверность полученных результатов подтверждается данными численных экспериментов, проведенных в симуляционных средах с помощью разработанных алгоритмов, математических моделей и комплекса программ, а также успешной апробацией разработанных алгоритмов и комплекса программ на данных с реальных робототехнических систем.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях: The 9th International Conference on Interactive Collaborative Robotics (ICR 2024), The 16th International Conference on Machine Vision (ICMV 2023), The 7th International Conference on Interactive Collaborative Robotics (ICR 2022), XX Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективные системы и задачи управления» (Домбайская конференция 2025), XIV Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ 2024). Результаты были получены в процессе выполнения работ по грантам: №075-15-2020-799 «Методы построения и моделирования сложных систем на основе интеллектуальных и суперкомпьютерных технологий, направленные на преодоление больших вызовов» и №075-15-2024-544 «Математические модели и численные методы как основа для разработки робототехнических комплексов, новых материалов и интеллектуальных технологий конструирования» Министерства науки и высшего образования РФ.

Личный вклад. Все положения, выносимые на защиту и изложенные в диссертации, принадлежат лично автору. Постановка задач и

обсуждение результатов проводились совместно с научным руководителем. В [4] автором проведено подробное экспериментальное исследование двух современных алгоритмов ОКЛ и проведен анализ их эффективности. В [1] автором предложен набор критериев для оценки качества графа локаций и проведено обширное экспериментальное исследование современных топологических алгоритмов ОКЛ с использованием предложенного набора критериев. В [5] автором предложен алгоритм построения и обновления графа локаций и проведены численные эксперименты. В [2; 3] автором доработан предложенный ранее алгоритм построения и обновления графа локаций, а также предложен алгоритм локализации робота в графе локаций и проведено экспериментальное исследование комплекса разработанных алгоритмов. В [6] автором предложен подход к планированию пути в графе локаций и проведено экспериментальное исследование предложенного подхода.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 10 печатных изданиях, в том числе 3 работы опубликованы в изданиях из списка ВАК категории К1 и приравненных к ним, из которых 2 – индексируются в Scopus (Q1), 6 работ опубликованы в трудах конференций, из которых 4 – индексируются в Scopus. Зарегистрирована 1 программа для ЭВМ.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель и задачи работы, приводятся основные положения, выносимые на защиту, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава содержит подробный обзор существующих методов и алгоритмов картирования и локализации. В главе описаны основные типы бортовых датчиков робота (камеры, лидары, инерциальные системы, датчики оборотов колес) и основные виды наблюдений, подаваемых на вход алгоритмам (изображение, облако точек, одометрия (оценка перемещения робота)). Описаны основные виды карт, используемых для навигации роботов – метрические (сетка занятости, облако точек, полигональная сетка) и топологические (граф локаций или ключевых кадров).

В главе приведена классификация методов картирования в зависимости от типа карт, которые они строят (метрические, топологические, топометрические), от режима работы (онлайн, офлайн) и от наличия или отсутствия метрических координат. Приведен обзор нескольких наиболее известных методов каждого класса и описаны их основные свойства: работа в реальном времени, вычислительная эффективность, картирование сред большой площади, отсутствие накопления ошибки позиции, работа внутри

Таблица 1 — Свойства рассмотренных методов картирования

| Методы | | Онлайн | Выч. эфф. | Работа на большой площади | Работа без накопления ошибки | Работа внутри и вне помещений | Открытая реализация |
|--|--------------|--------|-----------|---------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| Метрические | RTAB-Map | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ |
| | Voxblox | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ |
| Топологические офлайн | TopoMap | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |
| | City-scale | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |
| | Hierarchical | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |
| | LTVN | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ | ✗ | ✗ |
| Топометрические | GLocal | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | Hydra | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✓ |
| | S-graphs+ | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✓ |
| Топологические без координат | SPTM | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ |
| | VGM | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ |
| | TSGM | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ |
| | ETPNav | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ |
| | CMTF | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✗ | ✗ |
| Топологические с локальными координатами | Gomez et al. | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |
| | TLF | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |

и вне помещений, наличие программной реализации в открытом доступе. Из таблицы 1 видно, что ни один из рассмотренных методов не обладает всеми перечисленными свойствами и не может обеспечить точное картирование закрытых и открытых сред большой площади в реальном времени.

Помимо методов картирования, в главе описаны основные подходы к локализации в карте (сопоставление наблюдения робота с картой, распознавание места, комбинация обоих подходов) и основные современные методы и алгоритмы, присущие каждому из этих подходов. Оценивается скорость и точность локализации, компактность используемой карты, возможность локализации в средах большой площади, а также наличие программной реализации в открытом доступе. Из таблицы 2 видно, что комбинированные методы обладают приемлемой точностью локализации и могут выполнять локализацию по компактным картам сред большой площади, однако большинство из них имеет низкую скорость работы за счет ресурсоемкого сопоставления сканов.

Таким образом, проведенный в главе 1 анализ литературы подтверждает актуальность поставленных задач.

Вторая глава содержит математическую постановку задачи топологического картирования и локализации. В главе представлена оригинальная математическая модель задач топологического картирования и локализации в топологической карте, а также критерии качества решения этих задач.

В представленной модели робот движется в трехмерной окружающей среде W по дискретной траектории, состоящей из поз робота $(s_t, t = 1, \dots, t_{max})$. Окружающая среда $W \subset \mathbb{R}^3$ представляется в виде

Таблица 2 — Свойства рассмотренных методов локализации

| Методы | | Скорость | Точность | Компактность карты | Работа на большой площади | Открытая реализация |
|-----------------------------------|----------------------------|----------|----------|--------------------|---------------------------|---------------------|
| Сопоставление наблюдения с картой | IRIS | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ |
| | Wang et al. | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ | ✗ |
| | Li et al. | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ | ✗ |
| Распознавание места | DBow2 | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | NetVLAD | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | CosPlace | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | MixVPR | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | PointNetVLAD | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | MinkLoc3D | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | SVT-Net | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | MinkLoc++ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Комбинированные | Расп. места + ICP | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | Расп. места + RANSAC + ICP | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | BEVPlace++ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | BoxGraph | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | GLFP | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |

ограниченной замкнутой области трехмерного евклидова пространства с выбранной на нем правой прямоугольной декартовой системой координат. Она делится на замкнутое связное множество объектов W_{obj} и свободное пространство W_{free} :

$$W = W_{free} \cup W_{obj} (W_{free} \cap W_{obj} = \emptyset). \quad (1)$$

Поза робота s_t состоит из его позиции \mathbf{p}_t и ориентации Q_t :

$$s_t = (\mathbf{p}_t, Q_t); \mathbf{p}_t = (p_t^x, p_t^y, p_t^z) \in W_{free} \subset \mathbb{R}^3; Q_t \in SO(3). \quad (2)$$

Каждой позе s_t соответствует аффинное преобразование S_t , переводящее из системы координат робота в глобальную систему координат:

$$S_t = \left(\begin{array}{ccc|c} & & & p_t^x \\ & & & p_t^y \\ Q_t & & & p_t^z \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \in SE(3). \quad (3)$$

На вход алгоритму картирования подается облако точек C_t , содержащее точки объектов окружающей среды в системе координат робота, и одометрия $\widehat{\Delta S}_t$, полученные по наблюдениям с робота:

$$\widehat{\Delta S}_t = S_t \ominus S_{t-1} \oplus \Sigma_t \in SE(3), \quad (4)$$

где Σ_t обозначает ошибку одометрии на шаге t , состоящую из добавления гауссовского шума к сдвигу и к углу поворота.

Выходом алгоритма картирования является граф локаций. Локацией, наблюдаемой из точки $\mathbf{p} \in W$, назовем подмножество среды W , которое включает в себя все точки объектов, находящиеся в прямой видимости из точки \mathbf{p} на расстоянии не более d_{max} (дальность видимости датчиком восприятия робота), и все свободное пространство среды между точкой \mathbf{p} и этими объектами:

$$\begin{aligned} d_{obj}(\mathbf{p}, \mathbf{r}) &= \min\{\delta : \mathbf{p} + \delta \mathbf{r} \in W_{obj}\}; \\ ray(\mathbf{p}, \mathbf{r}, d_{max}) &= \{\mathbf{p} + \alpha \mathbf{r} : 0 \leq \alpha \leq d_{max}, \alpha \leq d_{obj}(\mathbf{p}, \mathbf{r})\}; \\ loc = Location(\mathbf{p}, d_{max}) &= \bigcup_{\mathbf{r} \in B_1(0)} ray(\mathbf{p}, \mathbf{r}, d_{max}) \subset W; \quad loc_{obs} = \mathbf{p} \in loc. \end{aligned} \quad (5)$$

Точка \mathbf{p} называется точкой наблюдения локаций. Две локации loc и loc' называются смежными, если их пересечение содержит точки свободного пространства среды. Пример разбиения пространства на локации показан на рисунке 1.

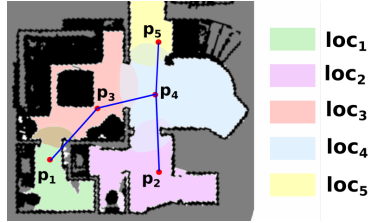


Рисунок 1 — Пример разбиения пространства на локации (красным показаны точки наблюдения локаций, смежные локации соединены синими ребрами).

Задача топологического картирования на шаге t заключается в преобразовании имеющегося графа локаций G_{t-1} в обновленный граф локаций G_t по облаку точек и одометрии с робота:

$$\begin{aligned} A(C_t, \widehat{\Delta S}_t, G_{t-1}) &= G_t = (V_t, E_t); \\ V_t &= (loc_1 \subset W, \dots, loc_n \subset W); \\ E_t &= (e_1 \in V_t \times V_t \times \mathbb{R}^+, \dots, e_m \in V_t \times V_t \times \mathbb{R}^+). \end{aligned} \quad (6)$$

Каждая локация в графе $loc \in V_t$ наблюдается с некоторой пройденной роботом точки. Каждое ребро $e = (u \in V_t, v \in V_t, l)$ содержит локации u и v , которые оно соединяет, и оценку расстояния l между точками наблюдения этих локаций.

Для оценки качества построенного алгоритмом графа локаций в главе 2 был предложен критерий путевой эффективности – средняя эффективность всех путей по графу. Путь по графу между точками \mathbf{p}_s и

\mathbf{p}_f определяется следующим образом: найдем локации loc_s, loc_f , такие, что $\mathbf{p}_s \in loc_s$, $\mathbf{p}_f \in loc_f$, имеющие ближайшие точки наблюдения к точкам \mathbf{p}_s и \mathbf{p}_f соответственно. Построим кратчайший путь $\pi = (\pi_0, \dots, \pi_k)$ между локациями loc_s и loc_f по ребрам графа E , используя расстояния, записанные на ребрах. Если локации loc_s и loc_f совпадают, путь по графу G состоит только из точек \mathbf{p}_s и \mathbf{p}_f . Если не совпадают – путь включает в себя точки наблюдения всех локаций найденного кратчайшего пути π .

$$Path(\mathbf{p}_s, \mathbf{p}_f, G_t) = \begin{cases} (\mathbf{p}_s, \mathbf{p}_f) & loc_s = loc_f \\ (\mathbf{p}_s, (\pi_0)_{obs}, \dots, (\pi_k)_{obs}, \mathbf{p}_f) & loc_s \neq loc_f \end{cases}. \quad (7)$$

Путь по графу π назовем допустимым, если каждое его звено соединяет смежные локации. Множество всех допустимых путей обозначим как P^+ . Длиной пути по графу $\pi = (\pi_0, \dots, \pi_k)$ назовем сумму длин кратчайших путей в среде, соединяющих его промежуточные точки:

$$\begin{aligned} len_{W_{free}}(s \in W_{free}, g \in W_{free}) &= \\ = \inf_{\pi=(\pi_0=s, \dots, \pi_k=g) \subset W_{free}; \forall i=1, \dots, k \hookrightarrow [\pi_{i-1}, \pi_i] \subset W_{free}} \sum_{i=1}^k ||\pi_i - \pi_{i-1}||; & (8) \\ len(\pi) &= \sum_{i=1}^k len_{W_{free}}(\pi_{i-1}, \pi_i). \end{aligned}$$

Определенное выше значение $len_{W_{free}}$ назовем расстоянием по среде W_{free} между точками s и g . Пример построения пути по графу и расчета его длины показан на рисунке 2.

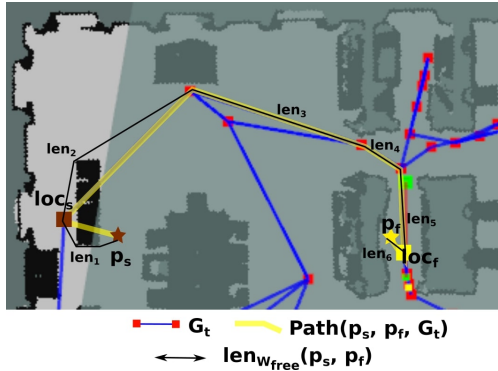


Рисунок 2 — Пример построения пути по графу между двумя точками среды и вычисления его длины. Препятствия среды показаны черным, свободные области – светло-серым.

Эффективностью допустимого пути по графу $\pi = (\mathbf{x}_0, \dots, \mathbf{x}_n)$ назовем отношение расстояния по среде между точками \mathbf{x}_0 и \mathbf{x}_n к длине пути π . Эффективность недопустимого или не найденного пути положим равной нулю. Обозначим значение эффективности пути π как $SPL(\pi)$ (от англ. Success weighted by Path Length):

$$SPL(\pi) = \frac{len_{W_{free}}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_n)}{len(\pi)} \cdot I(\pi \in P^+). \quad (9)$$

Здесь и далее $I(condition)$ обозначает оператор, который возвращает 1, если условие *condition* выполняется, и возвращает 0 в противном случае.

Так как число всех пар точек на траектории может быть велико, то предлагается для вычисления среднего значения путевой эффективности выбирать случайным образом N пар точек ($\mathbf{start}_i, \mathbf{goal}_i$) на траектории робота:

$$SPL(W, G_{t_{max}}) = \frac{1}{(t_{max} + 1)^2} \sum_{t_1=0}^{t_{max}} \sum_{t_2=0}^{t_{max}} SPL(path(\mathbf{p}_{t_1}, \mathbf{p}_{t_2}, G_{t_{max}})), \quad (10)$$

$$SPL_N(W, G) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SPL(path(\mathbf{start}_i, \mathbf{goal}_i, G)).$$

Помимо SPL , в главе 2 предложен ряд других легко вычисляемых показателей, влияющих напрямую на эффективность использования графа локаций для навигации:

1. Количество компонент связности N_{comp} .
2. Доля покрытия свободного пространства среды локациями, входящими в наибольшую компоненту связности графа:

$$Coverage = \frac{|\bigcup_{loc \in V_{main}} loc|}{|\bigcup_{t=0}^{t_{max}} Location(\mathbf{p}_t)|}, \quad (11)$$

где V_{main} обозначает наибольшую компоненту связности графа локаций, а $|W|$ обозначает объем области пространства W .

3. Корректность ребер, добавленных в граф – доля ребер, соединяющих смежные локации, среди всех ребер графа:

$$Correctness = \frac{\sum_{(loc, loc') \in E_{t_{max}}} I(loc \cap loc' \cap W_{free} \neq \emptyset)}{|E_{t_{max}}|}. \quad (12)$$

4. Полнота графа – доля ребер, соединяющих смежные локации, среди всех пар смежных локаций:

$$Recall = \frac{\sum_{(loc, loc') \in E_{t_{max}}} I(loc \cap loc' \cap W_{free} \neq \emptyset)}{|(loc \in V, loc' \in V) : loc \cap loc' \cap W_{free} = \emptyset|}. \quad (13)$$

Задача локализации в графе локаций на шаге t состоит в определении локации v_{cur}^t , в которой находится робот, и положения относительно точки наблюдения этой локации T_{cur}^t :

$$Alg(C_t, \widehat{\Delta S}_t, G_t) = (v_{cur}^t, T_{cur}^t); v_{cur}^t \in V_t; T_{cur}^t \in SE(3). \quad (14)$$

Для оценки качества локализации в графе локаций предложена адаптация стандартного критерия качества для метрической локализации – абсолютной ошибки траектории (англ. Absolute Trajectory Error, ATE):

$$ATE_{mean}(\widetilde{\mathbf{p}}_1, \dots, \widetilde{\mathbf{p}}_{t_{max}}; \mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_{t_{max}}) = \frac{1}{t_{max}} \sum_{t=1}^{t_{max}} \|\widetilde{\mathbf{p}}_t - \mathbf{p}_t\|. \quad (15)$$

В предложенной топологической модели абсолютная ошибка траектории вычисляется между истинными позициями робота и позициями, вычисленными по точкам наблюдения локаций v_{cur}^t и по относительным положениям T_{cur}^t :

$$S_p = \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & p^x \\ 0 & 1 & 0 & p^y \\ 0 & 0 & 1 & p^z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right); \quad (16)$$

$$\widetilde{S}_t = S_{(v_{cur}^t)_{obs}} \oplus T_{cur}^t;$$

$$ATE = ATE_{mean}(\widetilde{S}_1 \cdot \mathbf{0}, \dots, \widetilde{S}_T \cdot \mathbf{0}; \mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_t).$$

Помимо абсолютной ошибки траектории, также предложен показатель успешности локализации SR_{loc} :

$$SR_{loc} = \frac{\sum_{t=1}^{t_{max}} I(\mathbf{p}_t \in v_{cur}^t)}{t_{max}}, \quad (17)$$

В третьей главе описан разработанный алгоритм топологического картирования и локализации PRISM-ТороМар, решающий поставленную во второй главе задачу. Предложен двухуровневый подход к планированию пути до целевой точки с использованием построенной топологической карты.

Алгоритм PRISM-ТороМар состоит из двух выполняемых параллельно процедур: процедура построения и поддержания графа локаций и процедура локализации. Для каждой локации предложенный алгоритм сохраняет дескриптор, предсказанный нейросетью для распознавания места, а также двумерную проекцию облака точек для поиска относительного положения T_{cur}^t . Таким образом, для каждой локации сохраняется небольшой объем информации, что обеспечивает значительную экономию памяти.

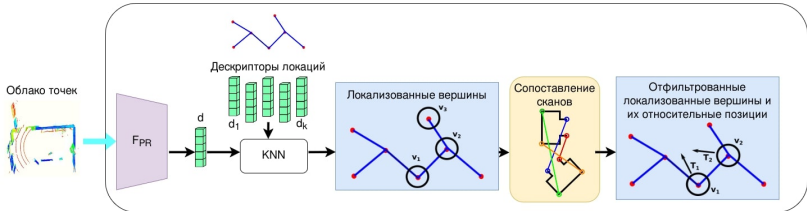


Рисунок 3 — Схема процедуры локализации.

Для каждого ребра алгоритм сохраняет оценку относительной позиции между точками наблюдения соединяемых им локаций.

Локализация проводится в два этапа: сначала с помощью нейросетевой модели распознавания места находится список локаций-кандидатов, чьи сканы близки к текущему скану робота в пространстве дескрипторов. Далее с помощью оригинального алгоритма сопоставления сканов отбрасываются ложноположительные результаты распознавания места, а для всех оставшихся локаций вычисляется положение робота относительно их точек наблюдения. Общая схема процедуры локализации представлена на рисунке 3.

Алгоритм сопоставления сканов (облаков точек) берет на вход два облака точек – текущее с робота и снятое из точки наблюдения локации. Для сопоставления по обоим облакам точек вычисляется двумерная проекция и переводится в формат черно-белого изображения. Из этих изображений извлекаются особые точки и их дескрипторы с помощью алгоритма ORB. Извлеченные особые точки сопоставляются по дескрипторам с помощью алгоритма FLANN. Затем проводится итеративная процедура вычисления итогового преобразования координат согласно алгоритму 1. После этого вычисляется оценка качества сопоставления *matchScore* путем совмещения проекций с помощью найденного преобразования и подсчета количества совпадений и несовпадений на совмещенных проекциях.

Результатом работы процедуры обновления графа на шаге t является граф локаций G_t , покрывающий все пространство, посещенное роботом, и текущее состояние робота в графе: локация v_{cur}^t , в которой находится робот на шаге t , и положение робота относительно ее точки наблюдения T_{cur}^t . На вход процедуре подаются граф локаций G_{t-1} , состояние на шаге $t - 1$, результаты локализации, измерение одометрии и облако точек S_t . Схема процедуры изображена на рисунке 4. При каждом добавлении новой локации в граф она соединяется с предыдущими локациями, что гарантирует связность графа. При смене v_{cur} по результатам локализации автоматически происходит замыкание цикла в графе локаций. При этом замыкание цикла не требует проведения ресурсоемкой глобальной оптимизации, так как в предложенном алгоритме не требуется метрическая согласованность циклов.

Алгоритм 1: Вычисление преобразования координат, сопоставляющего облака точек, и удаление выбросов среди сопоставленных особых точек.

```

1 Вход: Координаты попарно сопоставленных особых точек на изображениях
    $M = \{(p_i \in \mathbb{R}^2, q_i \in \mathbb{R}^2)\}_{i=1}^N$ 
2 Выход: Преобразование координат  $T_{loc}$  между облаками точек
3 Параметры: Максимальное число итераций  $max\_iter$ ; пороги сопоставления
    $\delta_{iter}, iter = 1, \dots, max\_iter$ ; минимальное число сопоставлений  $K$ 
4 for  $iter = 1 \dots max\_iter$  do
5   if  $|M| < K$  then
6     return NULL
7    $T = LeastSquareTransform(M)$ 
8   for  $i = 1 \dots N$  do
9     if  $||Tp_i - q_i|| > \delta_{iter}$  then
10       $M.remove((p_i, q_i))$ 
11  $T_{loc} = LeastSquareTransform(M)$ 

```

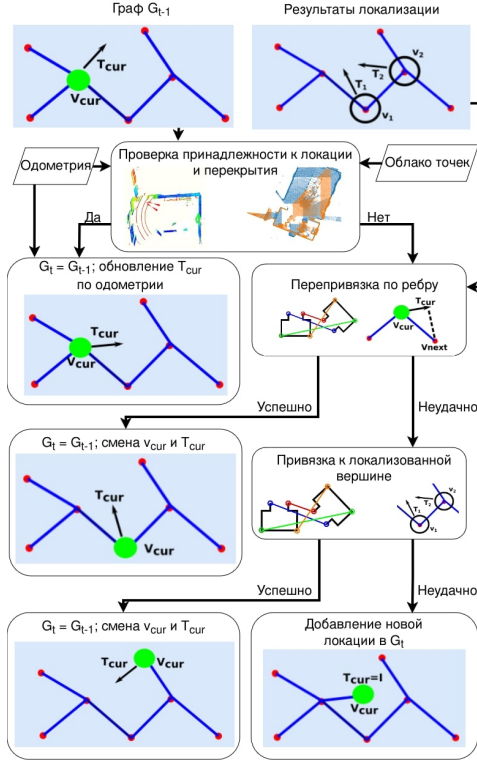


Рисунок 4 — Схема модуля поддержания графа: проверка принадлежности робота к локациям v_{cur}^{t-1} , смена v_{cur} по ребру и по результатам локализации, добавление новой локации в граф.

В четвертой главе описан программный комплекс топологического картирования и локализации, созданный на основе разработанных алгоритмов. Код программного комплекса написан на языке программирования Python и интегрирован с операционной системой роботов ROS, являющейся основным стандартом программирования в робототехническом сообществе. Программный комплекс позволяет изменять параметры алгоритма PRISM-ТороМар с помощью конфигурационного файла, сохранять построенный граф локаций на диск, а также загружать с диска и использовать при локализации сохраненный ранее граф.

Комплекс состоит из четырех основных классов:

- TopologicalGraph – класс, реализующий граф локаций;
- Feature2DGlobalRegistrationPipeline – класс, реализующий процедуру сопоставления сканов;
- Localizer – класс, реализующий процедуру локализации в графе локаций;
- TopoSLAMModel – класс, реализующий процедуру поддержания и обновления графа локаций.

Помимо вышеописанных классов, программный комплекс включает в себя класс PRISMTopoMapNode, реализующий взаимодействие классов алгоритма PRISM-ТороМар с системой ROS, а также набор вспомогательных функций, реализующих геометрические операции, и класс LocalGrid, реализующий двумерную проекцию облака точек. Для оценки качества топологического картирования по формулам 10-13 в составе программного комплекса также реализован класс MetricCounter. Схема взаимодействия основных классов представлена на рисунке 5.

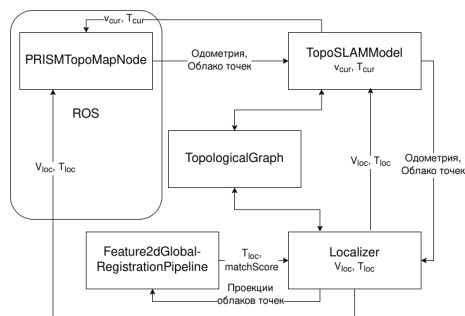


Рисунок 5 — Схема взаимодействия классов программного комплекса.

В главе 4 перечислены атрибуты, методы и параметры основных классов созданного программного комплекса. Приведены значения параметров, используемых в экспериментальном исследовании. Описан пример запуска программного комплекса на данных, используемых в численных экспериментах.

В **пятой главе** приведены результаты экспериментального исследования разработанных алгоритмов, состоящего из численных экспериментов в симуляторе Habitat и натурных экспериментов на данных с реальных робототехнических систем. В ходе экспериментов проводилось сравнение с другими современными алгоритмами ОКЛ.

Численные эксперименты проводились на пяти сценах из коллекции Matterport3D. Сцены представляли собой помещения площадью от 100 до 700 м². Для каждой сцены был составлен маршрут, наблюдения с которого охватывали всю сцену, затем был осуществлен проезд виртуального робота по маршруту. На вход алгоритмам картирования подавались наблюдения с проезда робота: облако точек, изображения с камер и одометрия. Для моделирования неточной реальной одометрии использовался гауссовский шум трех уровней интенсивности: нулевой, средний (стандартное отклонение продольного перемещения и угла поворота равны 0.003 и 0.0075 соответственно) и большой (стандартные отклонения 0.0075 и 0.025 соответственно).

Для сравнения использовались три метрических алгоритма (RTAB-Map, ORB-SLAM3, GLIM), два топометрических (Hydra, IncrementalTopo) и один чисто топологический (TSGM). Результаты численных экспериментов с большим уровнем шума приведены в таблице 3. Данные о потреблении времени и памяти алгоритмами представлены в таблице 4. Алгоритм PRISM-ТопоМар показал наилучшее значение путевой эффективности, а также высокие значения покрытия сцены, корректности и полноты ребер. При этом количество памяти, занимаемое картой, составило всего 400 кБ, что значительно превосходит результаты остальных алгоритмов.

Таблица 3 — Значение показателей качества 10-13 по результатам симуляционных экспериментов с большим уровнем шума

| Алгоритм | $N_{comp} \downarrow$ | Coverage \uparrow | Correctness \uparrow | Recall \uparrow | $SPL_N \uparrow$ |
|-----------------|-----------------------|---------------------|------------------------|-------------------|------------------|
| RTAB-Map | 1.6 | 0.68 | — | — | 0.61 |
| ORB-SLAM3 | 2.2 | 0.95 | 1.00 | 0.00 | 0.74 |
| GLIM | 1.0 | 0.80 | 0.94 | 0.27 | 0.72 |
| Hydra | 11.8 | 0.83 | 0.97 | 0.01 | 0.41 |
| IncrementalTopo | 17.2 | 0.43 | 0.98 | 0.07 | 0.20 |
| TSGM | 1.0 | 0.95 | 0.93 | 0.08 | 0.60 |
| PRISM-ТопоМар | 1.0 | 0.93 | 0.99 | 0.11 | 0.92 |

В главе 5 было проведено экспериментальное исследование навигации с использованием построенной алгоритмом PRISM-ТопоМар топологической карты. Среднее время планирования пути до целевой точки по карте помещения площадью 1600 м² составило 6 мс – более чем в 100 раз быстрее планирования пути по метрической карте, построенной алгоритмом RTAB-Map. Навигационная эффективность, измеренная по формуле SPL (Success weighted by Path Length), составила 0.89.

Таблица 4 — Результаты измерений потребления времени и памяти у рассмотренных алгоритмов

| Алгоритм | ОЗУ, МБ | Размер карты, МБ | Время обновления, мс | Время замыкания цикла, мс |
|-----------------|-----------|------------------|----------------------|---------------------------|
| RTAB-Map | 400 | 7.0 | 150 | 300 |
| ORB-SLAM3 | 600 | 237 | 130 | 250 |
| GLIM | 300 | 3.4 | 40 | 40 |
| Hydra | 2200 | 195 | 900 | 2000 |
| IncrementalTopo | 40 | 32 | 300 | - |
| TSGM | 30 | 15 | 80 | 80 |
| PRISM-TopoMap | 150 | 0.4 | 110 | 110 |

Для натурных экспериментов использовались данные с двух реальных роботов: AgileX Scout Mini и Clearpath Husky, оснащенных лидарами и источниками колесной одометрии. На обоих роботах был совершен объезд помещения большой площади. Алгоритм PRISM-ТороМар в обоих случаях успешно построил топологическую карту по наблюдениям с проездов роботов в режиме реального времени.

Для оценки применимости алгоритма PRISM-ТороМар для долговременной навигации в средах большой площади были проведены натурные эксперименты на наборе данных ITLP-Campus Outdoor, включающем в себя 9 проездов робота на улице по траектории длиной 3 км. В ходе экспериментов решалась задача локализации по предварительно построенной карте. При этом проезд, по которому строилась карта, и проезд, на котором выполнялась локализация, были совершены в разные времена года. Для сравнения использовались метрические алгоритмы картирования и локализации GLIM и HDL, а также метод BEVPlace++, основанный на распознавании места и последующем сопоставлении сканов. Результаты сравнения приведены в таблице 5. Алгоритм PRISM-ТороМар достиг наилучшей успешности локализации (98%) и наилучшего значения ATE_{mean} (2.0 м). При этом топологическая карта среды размером 500x500 м занимала в памяти всего 20 МБ, что значительно меньше размера метрической карты среды (400 МБ).

Таблица 5 — Результаты экспериментального исследования локализации в открытых пространствах

| Алгоритм | Mean ATE, м | SR_{loc} | Потребление ОЗУ, МБ | Размер карты, МБ | Время, с |
|-----------------|-------------|-------------|---------------------|------------------|------------|
| GLIM + HDL loc. | 3.6* | 0.3 | 1200** | 400 | 3.0 |
| BEVPlace++ | 14.4 | 0.84 | 15500 | 15300 | 1.0 |
| PRISM-ТороМар | 2.0 | 0.98 | 4100 | 20 | 0.5 |

* ATE посчитано на отрезке траектории до момента потери локализации

** Потребление оперативной памяти алгоритмом GLIM при построении карты составило 11 ГБ

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Предложена математическая модель задачи топологического картирования и локализации и оценки качества ее решения. В

предложенной модели карта представляется в виде графа локаций, а состояние робота в графе – в виде локации и положения робота внутри нее. Качество решения задачи оценивается с помощью путевой эффективности построенного графа, а качество локализации – как точность определения локации, в которой находится робот. Предложенные критерии качества позволяют оценить эффективность применения алгоритма ОКЛ для навигации робота.

2. Разработан алгоритм топологического картирования и локализации. Алгоритм гарантирует связность построенного графа локаций и обеспечивает вычислительно эффективное замыкание циклов за счет процедуры локализации. Отличительной особенностью разработанного алгоритма является фильтрация ложных результатов нейросетевой локализации с помощью оригинальной процедуры сопоставления проекций облаков точек. Разработанный алгоритм обеспечивает низкие затраты памяти, надежную локализацию и высокую путевую эффективность построенной карты.
3. На основе разработанного алгоритма был создан программный комплекс, позволяющий запускать алгоритм на различных робототехнических платформах и симуляторах и оценивать его качество с помощью предложенной математической модели.
4. Выполнено исследование созданного программного комплекса, включающее численные эксперименты в симуляторе и натурные испытания на данных с реальных роботов. В ходе исследования выполнено сравнение с другими современными алгоритмами ОКЛ по предложенным критериям качества и оценка вычислительной эффективности алгоритмов. Путевая эффективность предложенного алгоритма при высокой степени зашумленности одометрии составила 92%, а успешность локализации на данных с реального робота на траектории длиной 3 км составила 98%, что значительно превосходит результаты других алгоритмов ОКЛ. Высокая вычислительная эффективность разработанного алгоритма подтверждается низким временем обновления карты (110 мс) и низким объемом памяти, занимаемом построенной картой (400 КБ при картировании симуляционных помещений и 20 МБ при картировании открытой среды размером 500x500 м).

Список публикаций автора

В изданиях из списка ВАК РФ и приравненных к ним

1. *Muravyev K., Yakovlev K.* Evaluation of topological mapping methods in indoor environments [Текст] // IEEE Access. — 2023. — Т. 11. — С. 132683–132698. **Scopus (Q1).**

2. *Muravyev K., Melekhin A., Yudin D., Yakovlev K.* PRISM-TopoMap: online topological mapping with place recognition and scan matching [Текст] // IEEE Robotics and Automation Letters. — 2025. — С. 3126—3133. **Scopus (Q1)**.
3. *Муравьев К. Ф.* Топологическое картирование помещений с использованием нейросетевой локализации и сопоставления сканов [Текст] // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2024. — № 3. — С. 28—38. **ВАК (K1)**.

В сборниках трудов конференций

4. *Muravyev K., Yakovlev K.* Evaluation of RGB-D SLAM in large indoor environments [Текст] // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. — Springer. 2022. — С. 93—104. **Scopus**.
5. *Muravyev K., Yakovlev K.* Maintaining topological maps for mobile robots [Текст] // Sixteenth International Conference on Machine Vision (ICMV 2023). Т. 13072. — SPIE. 2024. — С. 265—272. **Scopus**.
6. *Muravyev K., Yakovlev K.* NavTopo: Leveraging Topological Maps for Autonomous Navigation of a Mobile Robot [Текст] // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. — Springer. 2024. — С. 144—157. **Scopus**.
7. *Муравьев К., Яковлев К.* Система картирования для долговременной навигации автономного мобильного робота в неизвестной местности [Текст] // XX Юбилейная Всероссийская научно-практическая конференция "Перспективные системы и задачи управления". — 2025. — С. 96—100.
8. *Melekhin A., Bezuglyj V., Petryashin I., Muravyev K., Linok S., Yudin D., Panov A.* ITLP-Campus: A Dataset for Multimodal Semantic Place Recognition [Текст] // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry. — Springer. 2024. — С. 185—195. **Scopus**.
9. *Муравьев К., Алхаддад М., Панов А., Миронов К.* Иерархическая навигация с избеганием препятствий и прохождением проёмов на четырёхколёсном мобильном роботе [Текст] // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления. — 2024. — С. 1640—1644.

Зарегистрированные программы для ЭВМ

10. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.* PRISM-ТороМар: программная библиотека топологического картирования с помощью распознавания мест и сопоставления сканов [Текст] / К. Ф. Муравьев ; ФИЦ ИУ РАН. — № 2025660983 ; заявл. 05.05.2025 ; опубл. 20.05.2025, 2025662382 (Рос. Федерация).

Муравьев Кирилл Федорович

Исследование методов и разработка алгоритмов топологического картирования
и локализации

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____