

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Визильтера Юрия Валентиновича

на диссертационную работу Муравьева Кирилла Федоровича

«Исследование методов и разработка алгоритмов топологического картирования и локализации», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности **1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»**

Актуальность темы диссертации

Решение задач картирования и локализации критически важно для автономной навигации мобильных роботов в условиях отсутствия или нестабильного приема спутникового сигнала и в динамических средах. Выполнение одновременного картирования и локализации (SLAM, ОКЛ) 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 внутри и вне помещений, поисково-спасательные операции, мониторинг и патрулирование различных объектов, в том числе подземных, и др.

В настоящее время существует множество методов решения задачи ОКЛ, однако большинство из них строит карту в виде плотной метрической структуры, например, двумерной сетки занятости или трехмерной воксельной сетки. Такие метрические карты содержат детальное геометрическое представление всех препятствий среды и потому удобны для навигации, однако поддержание таких карт для сред большой площади требует больших 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 ОКЛ и сбою навигации робота.

Альтернативным подходом к решению задачи ОКЛ является использование не метрических моделей, а т.н. «топологических» структур для представления окружающей среды. Примером такой структуры является граф локаций, в котором вершинами являются локации (помещения или участки местности), а смежные локации соединяются ребрами. Такие карты не требуют глобальной метрической согласованности и не подвержены накоплению ошибки позиционирования, а также обеспечивают быстрое планирование пути

за счет разреженности графа. Однако построение топологических карт и локализация с их помощью являются сложной научной задачей, универсальное решение которой на данный момент отсутствует.

Таим образом, тема диссертации К.Ф. Муравьева, посвященной разработке вычислительно эффективных методов «топологического» картирования и локализации в топологической карте для повышения автономности мобильных робототехнических систем, является несомненно актуальной.

Структура и основное содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и 1 приложения.

Во введении раскрывается актуальность диссертационного исследования, формулируется цель и задачи диссертации, приводятся основные положения.

В первой главе представлен обзор методов метрического, топометрического и топологического картирования, а также методов локализации, которые автором делятся на методы сопоставления текущего наблюдения с картой, методы распознавания места и комбинированные методы. Выполнен анализ множества современных методов картирования и локализации, результаты анализа приведены в двух таблицах, характеризующих качество работы, вычислительную эффективность и возможность работы методов в средах большой площади. Сделаны выводы об отсутствии общедоступного вычислительно эффективного топологического метода ОКЛ, способного работать в средах большой площади внутри и вне помещений.

Во второй главе представлена предложенная автором математическая модель задачи топологического картирования и локализации в топологической карте. Предложенная модель отличается от имеющихся моделей задачи ОКЛ отсутствием глобальных метрических координат у элементов карты. Предложен способ оценки качества топологической карты с точки зрения т.н. «путевой эффективности», а также количества компонент связности, доли покрытия среды, корректности и полноты ребер графа локаций. Приведен набор терминов и определений, необходимых для задания математической модели и критериев качества. Для вычисления путевой эффективности пути между парами точек в среде, проложенные по графу локаций, сравниваются с кратчайшими путями в среде.

В третьей главе описан разработанный Муравьевым К.Ф. алгоритм топологического картирования и локализации, а также предложен двухэтапный способ планирования пути по построенной топологической карте. Алгоритм

состоит из процедуры построения карты в виде графа локаций и процедуры локализации в графе. На вход алгоритму подаются наблюдения с робота – облака точек с лидара, изображения с камер, данные одометрии. Процедура построения карты обновляет граф и поддерживает текущее положение робота в нем, состоящее из локаций и относительного положения робота в ней. Для изменения текущего состояния используются данные одометрии и результаты процедуры локализации. Отличительной особенностью процедуры локализации является использование итеративной процедуры сопоставления двумерных проекций наблюдения робота и локаций в карте по особым точкам с удалением выбросов. Такое сопоставление позволяет значительно снизить количество ложных определений текущей локаций и с высокой точностью определить относительную позицию робота в локациях.

Четвертая глава содержит техническое описание разработанного автором комплекса программных средств для топологического картирования и локализации, созданного на базе описанного в третьей главе алгоритма. В главе приведены описания основных классов комплекса, параметры и атрибуты, и пример запуска комплекса для проведения вычислительного эксперимента.

Пятая глава содержит описание экспериментального исследования разработанного алгоритма и его сравнения с другими современными алгоритмами ОКЛ. Помимо численных экспериментов в высокореалистичном симуляторе с моделированием шума одометрии, в главе приведены результаты экспериментов на реальных роботах внутри и вне помещений. Сравнение проводилось с другими метрическими, топометрическими и топологическими алгоритмами по представленным во второй главе критериям качества и по вычислительной эффективности. Предложенный автором алгоритм показал значительные улучшения по значению путевой эффективности и по затратам памяти на хранение карты, при этом другие показатели (покрытие сцены, время работы) остались на уровне лучших современных алгоритмов. Отдельно было исследовано сопоставление сканов (облаков точек с робота и из локаций в карте).

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и адекватно ее характеризует. Диссертация и автореферат соответствуют специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Научная новизна

Научной новизной обладают следующие, полученные автором

диссертационного исследования, результаты:

1. Оригинальный алгоритм топологического картирования и локализации в топологической карте, отличающийся от аналогов надежной локализацией, достигаемой за счет использования оригинальной итеративной процедуры сопоставления сканов, что позволяет обеспечить высокую путевую эффективность, а также обеспечивает низкие затраты памяти и вычислительных ресурсов;
2. Оригинальная математическая модель задачи ОКЛ, в которой не требуется наличие глобальных метрических координат в карте;
3. Оригинальный способ оценки качества карты с точки зрения путевой эффективности, который позволяет оценить эффективность применения топологической карты (графа локаций) для навигации робота.

Практическая значимость

Представленный в диссертации топологический алгоритм ОКЛ, названный автором PRISM-ТороМар, применим для навигации мобильных роботов, в том числе для навигации беспилотных транспортных средств. Его применение дает возможность автономной навигации с низкими затратами памяти и вычислительных ресурсов, что способствует повышению автономности мобильных робототехнических систем. Проведенное экспериментальное исследование подтверждает высокое качество и вычислительную эффективность алгоритма при применении на мобильных роботах. Алгоритм имеет открытую программную реализацию, что позволяет воспроизвести результаты экспериментов и применить его на различных робототехнических системах.

Достоверность и обоснованность научных результатов

В диссертационной работе корректно применяется математический аппарат, лежащий в основе созданных автором математических моделей и алгоритмов. Экспериментальное исследование разработанного алгоритма проводится на различных коллекциях данных, в том числе, полученных с использованием реальных роботов, и подтверждает заявленные характеристики – высокую путевую и вычислительную эффективность.

Основные результаты диссертации были представлены в виде докладов на 7 ведущих российских и международных научных конференциях. Содержание исследования отражено в 9 научных публикациях, в том числе в 6 изданиях, индексируемых в Scopus (два из них входят в первый квартиль), и одном

издании перечня ВАК. На созданный программный комплекс получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Замечания

Имеются следующие замечания по содержанию диссертации:

1. При вычислении путевой эффективности препятствия в среде представлялись в растровом виде (в виде набора клеток в карте занятости). Между тем, представление препятствий в виде геометрических фигур (например, двумерных полигональных представлений) может дать более точную аппроксимацию объектов среды и более быстрое вычисление кратчайших путей при больших масштабах карт. Желательно было бы в будущем такую возможность рассмотреть.

2. В диссертации не описаны границы применимости представленного алгоритма топологического картирования и локализации. Приведены результаты экспериментов в помещениях и на местности, окруженной зданиями, однако нет явных предположений о возможности работы алгоритма в более сложных средах (например, при отсутствии вертикальных стен в зданиях, при наличии деревьев вне помещений, при наличии движущихся объектов в поле зрения и т.д.).

3. В численном эксперименте по сопоставлению сканов качество сопоставления определяется с использованием характеристик точности и полноты (характеризующих надежность работы алгоритма), а не метрической точности сопоставления (описывающей собственно геометрическую точность локализации), хотя результатом сопоставления является позиция робота относительно центра локации. Желательно было бы такие геометрические оценки точности добавить.

4. Автором предложен оригинальный способ оценки качества карты с точки зрения путевой эффективности, который позволяет оценить ожидаемую эффективность применения топологической карты (графа локаций) для навигации робота с точки зрения оптимизации его перемещений. Однако эффективность навигации зависит также от точности и надежности локализации в каждый момент времени, а они также зависят от выбора и количества локаций. Очевидно, что при большем числе локаций ожидаемая надежность и точность локализации растут, зато растут и затраты по памяти и время вычислений. Таким образом, желательно было бы рассмотреть комплексный критерий оценки создаваемой топологической карты (графа локаций), включающий путевую эффективность, ожидаемую надежность и

точность локализации, а также затраты памяти и вычислительных ресурсов.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Заключение

Считаю, что диссертация К.Ф. Муравьева «Исследование методов и разработка алгоритмов топологического картирования и локализации» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научно-техническом уровне. Работа соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Муравьев Кирилл Федорович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент,
начальник подразделения
ФАУ «ГосНИИАС»,
д.ф.-м.н., профессор РАН



Визильтер Юрий Валентинович
« 12 » ноября 2025 г.

Подпись Визильтера Ю. В. заверяю.

Ученый секретарь ФАУ «ГосНИИАС»,
д.т.н. профессор



Мужичек Сергей Михайлович
« 12 » ноября 2025 г.

Визильтер Юрий Валентинович – доктор физико-математических наук по специальности 05.13.17, профессор РАН, начальник подразделения Федерального автономного учреждения "Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем" (ФАУ "ГосНИИАС").

г. Москва, ул. Викторенко, 7, тел.: +7 (499) 157-94-98, e-mail: viz@gosniias.ru.