

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

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 исследования

В настоящее время мобильные роботы применяются для решения широкого спектра задач во многих сферах. Сигнал систем глобального позиционирования зачастую бывает недоступен при автономной навигации мобильных роботов, а карта местности также бывает недоступной или устаревшей. В этом случае необходимо выполнять одновременное картирование и локализацию (ОКЛ), которое в зарубежной литературе известно как задача В настоящее время, задача ОКЛ решается методами, которые строят карту в виде плотных метрических структур, таких как двумерная сетка занятости или трехмерные воксельные сетки. Однако, во многих приложениях, например, при автоматизированной доставке робототехнические системы преодолевают большие расстояния и картируют большие площади, в такой ситуации поддержание плотной метрической карты требует значительных затрат памяти и вычислительных ресурсов, что может привести к сбоям картирования и некорректной локализации. Альтернативой метрическому подходу к решению задачи ОКЛ является топологический подход, в котором карта представляется в виде разреженных топологических структур, таких как граф локаций, вместо плотных метрических структур. За счет разреженности графа обеспечивается быстрое планирование пути и экономия памяти и вычислительных ресурсов, что особенно важно при навигации робота в среде большой площади. Таким образом, задача разработки вычислительно эффективных и надежных алгоритмов топологического картирования и локализации является актуальной и способствует повышению автономности современных робототехнических систем.

Структура и основное содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и 1 приложения. Полный объем диссертации составляет 125 страниц, включая 40 рисунков и 19 таблиц. Список литературы содержит 101 наименование. Объем автореферата составляет 22 страницы.

Во введении приведены все формальные необходимые разделы, обоснована актуальность исследования, описана степень разработанности темы исследования, сформулированы цели и задачи диссертации, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен подробный обзор современных методов ОКЛ. Методы делятся на три класса в зависимости от типа создаваемой карты: метрические, топометрические, топологические. Приводится характеристика рассмотренных методов по нескольким критериям: работа в реальном времени, вычислительная эффективность, эффективное картирование больших площадей, работа без накопления ошибки позиционирования, возможность работы внутри и вне помещений, наличие программной реализации в открытом доступе. Также в первой главе приводится обзор современных методов локализации, которые автор разделяет на три класса: сопоставление текущего наблюдения с робота с картой, распознавание места и комбинированные методы. Приводится характеристика рассмотренных методов локализации по следующим критериям: скорость и точность работы, компактность используемой карты, возможность работы на большой площади, наличие программной реализации в открытом доступе. Ни один из рассмотренных современных методов

картирования и локализации не удовлетворяет всем критериям, что подтверждает актуальность задач диссертации.

Вторая глава содержит математическую постановку задачи ОКЛ. В ней описана предложенная диссертантом оригинальная математическая модель задачи ОКЛ, в которой карта представляется в виде графа локаций, а качество карты оценивается с точки зрения путевой эффективности графа. Предложенная модель не предполагает наличия глобальных метрических координат в карте и оценивает качество карты с точки зрения эффективности ее применения для навигации робота, в отличие от традиционных моделей ОКЛ, в которых оценивается метрическая точность карты. Данная математическая модель является значимым вкладом в развитие топологических методов ОКЛ, поскольку позволяет оценивать качество таких методов и проводить их сравнение по эффективности применения.

Третья глава содержит описание разработанного алгоритма топологического ОКЛ, названного PRISM-ТороМар. Входными данными алгоритма являются наблюдения с различных датчиков: камеры глубины и камеры видимого диапазона, которые позволяют получить данные для алгоритма в виде облаков точек и изображений соответственно, а также одометрические сенсоры, позволяющие получить оценку перемещения робота. Предлагаемый алгоритм состоит из двух выполняемых параллельно процедур: поддержания графа и текущего состояния робота в нем и локализации. Отличительной особенностью алгоритма является высокая вычислительная эффективность и значительно более низкие затраты памяти на хранение карты по сравнению с метрическими и топометрическими алгоритмами ОКЛ. Высокая вычислительная эффективность достигается за счет использования двухэтапного метода локализации, состоящего из нейросетевого распознавания локации, в которой находится робот, и точного сопоставления двумерных проекций сканов (текущего наблюдения с робота и локации в карте), основанного на извлечении особых точек. Также предложенный алгоритм обеспечивает вычислительно эффективное замыкание циклов за счет добавления ребра в граф при переходе к локации, найденной и сопоставленной с помощью процедуры локализации.

Четвертая и пятая главы содержат описание созданного на основе разработанного алгоритма программного комплекса и проведенного с помощью него экспериментального исследования. Программный комплекс содержит реализацию основных классов алгоритма, а также реализацию расчета критериев качества. Исходный код выложен в открытый доступ, что дает возможность воспроизвести описанные в пятой главе эксперименты. Проведенное экспериментальное исследование включает в себя численные эксперименты на симуляционных данных с вычислением предложенных во второй главе критериев качества, а также натурные эксперименты на данных, полученных при навигации мобильных роботов внутри и вне помещений. В ходе численных экспериментов моделируется погрешность реальной одометрии с помощью добавления к позиции робота гауссовского шума. Проводится сравнение разработанного автором алгоритма PRISM-ТороМар с другими современными алгоритмами ОКЛ, как топологическими, так и метрическими. Помимо оценки качества, дается также оценка вычислительной эффективности алгоритмов – затрат времени и памяти. По результатам сравнения, предложенный автором работы алгоритм оказывается лучшим как по путевой эффективности, так и по затратам памяти на хранение карты, значительно превосходя другие рассмотренные алгоритмы ОКЛ. Эксперименты на реальных роботах, в том числе в открытой среде большой площади, подтверждают высокую вычислительную эффективность алгоритма PRISM-ТороМар и демонстрируют надежную локализацию на протяженных маршрутах даже при значительных различиях между текущими наблюдениями с робота и сканами локаций в карте (разность времен года, автомобили, люди).

В заключении обобщены теоретические и практические результаты работы. В целом в диссертации создан теоретический задел для исследования топологических методов ОКЛ и разработаны новые вычислительно эффективные алгоритмы топологического картирования и локализации, способствующие повышению эффективности навигации и, как следствие, повышению автономности мобильных робототехнических систем.

Научная новизна и практическая значимость результатов диссертации

Результаты, выводы и положения диссертационной работы теоретически обоснованы, имеют практическую значимость и обладают научной новизной. Следует отметить следующие наиболее важные научные результаты:

1. Математическая модель задачи топологического картирования и локализации и оценки качества решения этой задачи. В отличие от аналогов, опирающихся на глобальные метрические координаты, предложенная модель позволяет оценивать качество графа локаций с точки зрения путевой эффективности в случае отсутствия глобальных метрических координат в локациях графа.
2. Алгоритм построения топологической карты и локализации в ней, обладающий высокой путевой и вычислительной эффективностью. В отличие от других топологических алгоритмов ОКЛ, разработанный диссертантом алгоритм обеспечивает надежную локализацию при высокой вычислительной эффективности за счет использования двухэтапной процедуры локализации и оригинальной процедуры сопоставления двумерных проекций облаков точек.

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, в том числе для навигации беспилотных транспортных средств в условиях нестабильного сигнала спутниковых систем позиционирования.

Апробация результатов работы

Содержание диссертационной работы автора отражено в 9 публикациях в российских и международных печатных изданиях, индексируемых в РИНЦ, Scopus и Web of Science. В том числе, автор имеет две публикации в журналах первого квартиля (Q1 Scopus) и одну публикацию в журнале, рекомендованном ВАК. Результаты диссертации были также представлены в докладах на 7 российских и международных научных конференциях. По созданному на основе разработанного алгоритма PRISM-ТороМар программному комплексу зарегистрирована программа для ЭВМ.

Замечания по диссертационной работе

К диссертационной работе К.Ф. Муравьева имеются следующие замечания:

1. Предложенный автором алгоритм сопоставления сканов является одним из основных научных результатов работы, данный алгоритм основан на использовании дескриптора ORB. В таблице 15 приведены результаты экспериментального сравнения алгоритмов сопоставления сканов, предложенный автором алгоритм исследован с использованием двух детекторов особых точек: SIFT и ORB. Из текста работы не ясно, чем обоснован выбор именно этих детекторов, при наличии большого количества других быстро работающих детекторов особых точек?
2. Вызывает сомнения идея автора использовать дескриптор ORB при навигации робота на открытой местности, вне помещений, так как известно, что данный детектор имеет проблемы при анализе размытых изображений. Есть основания полагать, что предложенный алгоритм построения пути на графе локаций на открытой местности будет эффективен только при наличии определенных идеальных условий, а в реальных условиях, при наличии шумов различной природы, таких как неравномерное освещение, шум матричных приемников, а также искажения, вызванные различными

погодными явлениями (атмосферная дымка, дождь, туман, снег, и.т.п.) качественные характеристики работы предложенного алгоритма будут существенно отличаться от заявленных. Deskriptor HOG для данной задачи представляется лучшим кандидатом, кроме того, видится целесообразным использование различных методов восстановления качества изображений в качестве предварительной обработки, в том числе методов, направленных на улучшение видимости и качества изображений, на которые влияет различные природные процессы.

3. В экспериментальном исследовании приведено сравнение лишь с одним топологическим алгоритмом одновременной навигации и картографирования, при этом для алгоритмов других классов (метрических и топометрических) результаты сравнительного анализа являются более репрезентативными, представлено несколько известных методов в каждом классе.
4. В работе при построении пути по графу локаций (формула 2.23) выбираются локации, имеющие ближайшие точки наблюдения к начальной и конечной точкам в метрическом евклидовом пространстве. В связи с этим всегда можно смоделировать ситуацию, при которой стартовая и финишная точка в задаче планирования траектории не будут принадлежать этим локациям. Как автор видит решение данной проблемы?
5. В тексте диссертации не раскрыты детали реализации задачи регистрации облаков точек с использованием комбинации алгоритмов RANSAC + ICP. Известно множество вариантов итеративного алгоритма ближайших точек с различными с разными стратегиями отбора точек для сопоставления и взвешивания точек, а также с разными методами решения вариационной задачи ICP в классе аффинных или ортогональных преобразований. В тексте диссертации и автореферата данная информация не раскрыта в достаточной мере, в связи необходимо обращаться к научным статья автора и программному коду. ICP является итеративным алгоритмом, поэтому качество его работы и сходимость во многом зависят от выбора начальных значений векторов геометрических преобразований, из текста работы не ясно, как автор выбирает значения для инициализации алгоритма ICP?

Заключение

Диссертационная работа К.Ф. Муравьева представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой автором проведены новые исследования в области топологического картирования и локализации, получены новые теоретические и практические результаты, разработана новая топологическая математическая модель задачи ОКЛ и новый вычислительно эффективный топологический алгоритм решения этой задачи. Разработанные алгоритмы обладают высокой надежностью и вычислительной эффективностью, подтвержденными в ходе экспериментов, и имеют программную реализацию в открытом доступе, что позволяет повысить степень автономности мобильных робототехнических систем.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (технические науки) по пунктам 2, 3, 8, 9, поскольку в ней представлена математическая модель задачи ОКЛ, разработан вычислительно эффективный алгоритм решения данной задачи и его программная реализация, а также описаны постановка и проведение вычислительного эксперимента и проведен его анализ.

Таким образом, диссертация К.Ф. Муравьева на тему «Исследование методов и разработка алгоритмов топологического картирования и локализации» соответствует требованиям ВАК Минобрнауки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям по

специальности 1.2.2 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а ее автор, Муравьев Кирилл Федорович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, доцент,
Заведующий научно-исследовательской лабораторией
«Интеллектуальные информационные технологии и системы»,
ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет»

Докторская диссертация защищена по специальности 05.13.01 — Системный анализ, управление и обработка информации (в информационных и технических системах).

Вохминцев А.В.



11 2025 г.

Подпись Вохминцева А.В. заверяю:

Ведущий специалист
отдела кадров
АКУТИНА В.И.