

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ИПС им. А.К. Айламазяна РАН
кандидат технических наук

И.П. Тищенко

«12» 11 20 25 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт программных систем им. А.К. Айламазяна Российской академии наук
на диссертацию 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

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.

Работа К.Ф. Муравьева посвящена разработке вычислительно эффективных алгоритмов топологического картирования и локализации. Разработанные алгоритмы способствуют повышению автономности современных мобильных робототехнических систем.

Структура и основное содержание диссертации

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

В главе 1 приводится подробный обзор существующих методов одновременного картирования и локализации (ОКЛ). Приведена классификация современных методов картирования (метрические/топометрические/топологические, онлайн/офлайн) и методов локализации (сопоставление наблюдения робота с картой, распознавание места, комбинация подходов) и сравнительный анализ наиболее известных современных методов каждого класса. Проведенный анализ показывает отсутствие универсального вычислительно эффективного решения для картирования и локализации в открытом доступе и подтверждает актуальность поставленных задач.

В главе 2 описана математическая постановка задачи топологического картирования и локализации. Представлена оригинальная математическая модель задач топологического картирования и локализации в топологической карте, а также критерии качества решения этих задач. В отличие от традиционной (метрической) постановки задачи ОКЛ карта представляется в виде графа локаций, и наличия глобальных метрических координат в карте не требуется. Вводится новый критерий качества картирования – эффективность путей, построенных по графу локаций, которая зависит от корректности путей и от их длины. Помимо путевой эффективности, оценивается количество компонент связности в графе локаций, доля площади среды, покрытая локациями наибольшей компоненты связности, корректность и полнота ребер графа.

В главе 3 описан разработанный алгоритм топологического картирования и локализации, названный PRISM-ТороМар. Алгоритм состоит из двух выполняемых параллельно процедур: поддержания графа и локализации. Локализация проводится в два этапа – вначале выполняется поиск «похожих» локаций методами распознавания места, затем в найденных локациях вычисляются относительные положения робота с помощью предложенного автором алгоритма сопоставления сканов. Для локализации в каждой локации хранится нейросетевой дескриптор (вектор признаков небольшой размерности) и двумерная проекция ее скана, что обеспечивает низкое потребление памяти. Процедура поддержания графа обновляет граф локаций и текущее состояние робота в нем (текущую локацию и относительное положение в ней), добавляя новые локации при отсутствии локализации и новые ребра при смене текущей локации. Процедура гарантирует связность графа и обеспечивает замыкание циклов без ресурсоемкой глобальной оптимизации.

В главе 4 описан комплекс программных средств, созданный на базе разработанного алгоритма PRISM-ТороМар. Комплекс позволяет запускать алгоритм

PRISM-ТороМар на различных роботах и робототехнических симуляторах без изменения исходного кода программ. В главе 5 представлены результаты экспериментального исследования, проведенного с использованием созданного программного комплекса и предложенной математической модели. По результатам численных экспериментов, проведенных в симуляционных средах с зашумленными данными о позиции робота, алгоритм PRISM-ТороМар оказался наилучшим по путевой эффективности и по потреблению памяти по сравнению с другими метрическими, топометрическими и топологическими алгоритмами ОКЛ. По результатам натурных экспериментов на открытой местности PRISM-ТороМар показал наилучшую точность локализации на трехкилометровом маршруте, при этом размер топологической карты среды размером 500х500 м составил всего 20 МБ, что значительно меньше размера метрической карты среды (400 МБ).

Степень обоснованности научных положений и выводов, новизна результатов

Обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации К.Ф. Муравьева, подтверждается детальным обоснованием и описанием разработанных алгоритмов и математических моделей, результатами численных и натурных экспериментов и апробацией полученных результатов на российских и международных конференциях. Выводы по главам и всей работе логически следуют из основного содержания диссертации. Программная реализация разработанных диссертантом алгоритмов размещена в открытом доступе, что позволяет воспроизвести результаты описанных в диссертации экспериментов.

В работе Муравьева К.Ф. предложены новые оригинальные алгоритмы топологического картирования и локализации в топологической карте, отличающиеся высокой вычислительной эффективностью и надежной локализацией. Предложена новая математическая модель задачи картирования и локализации и 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.

Значимость для науки и практики полученных автором диссертации результатов

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.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Разработанные методы, алгоритмы и математические модели могут быть использованы для создания систем автономной навигации мобильных роботов внутри и вне помещений, а также для локализации беспилотных транспортных средств. Предложенные алгоритмы позволят снизить затраты памяти, требуемые на хранение карты, и повысить стабильность и точность локализации мобильных роботов и беспилотных транспортных средств в средах большой площади. Кроме того, использование топологической карты позволит ускорить планирование путей для навигации роботов и автономных транспортных средств.

Замечания

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

1. Не ясно, какую размерность имеет карта в предложенной математической модели и какую размерность имеет карта, являющаяся результатом работы предложенного алгоритма: 2D, 2.5D или 3D.

2. При метрической оценке качества локализации учитывается только ошибка определения положения робота, без учета ошибки определения ориентации робота. При этом вычисление ориентации робота тоже играет важную роль для его навигации.

3. При вычислении путевой эффективности графа локаций остается открытым вопрос вычисления расстояния по среде (кратчайшего возможного пути в среде между двумя точками). При аппроксимации среды двумерной сеткой занятости возникают погрешности вычисления расстояний, к тому же, такая аппроксимация не адаптируется для разных размеров и типов роботов.

4. Автор проводит сравнение предложенного им оригинального алгоритма сопоставления сканов только с 3D алгоритмами сопоставления, при этом предложенный алгоритм работает с двумерными проекциями облаков точек. В диссертации не освещено наличие или отсутствие других 2D алгоритмов сопоставления сканов.

Однако, указанные замечания не снижают научной ценности и высокого уровня диссертационного исследования.

Заключение

Основные результаты по теме диссертации изложены в 10 печатных изданиях, в том числе 3 работы опубликованы в изданиях из списка ВАК категории K1 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. Основные результаты работы были доложены на 7 профильных российских и международных научных конференциях. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (технические науки) по пунктам 2, 3, 8, 9. Обоснованность и достоверность полученных результатов и выводов обеспечены использованием надежных и апробированных методов исследования, включая методы математического моделирования, математической статистики, а также результатами численных и натурных экспериментов. Автореферат полностью отражает основное содержание работы.

Таким образом, диссертационная работа К.Ф. Муравьева по своей актуальности, новизне, теоретической и практической значимости, достоверности полученных результатов полностью удовлетворяет Положению о присуждении ученых степеней, утвержденному Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, а ее автор,

Муравьев Кирилл Федорович, заслуживает присуждения ученой степени кандидатов технических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв ведущей организации обсужден и принят на заседании общепрограммного семинара ИПС им. А.К. Айламазяна РАН 30.10.2025г., протокол № 100 (присутствовало: 10 чел. Результаты голосования: за - 9, против - 1, воздержались - 0).

Председатель семинара

Руководитель Исследовательского центра процессов управления

ИПС им. А.К. Айламазяна РАН

д.ф.-м.н., доцент



Сачков Юрий Леонидович

Секретарь семинара

с.н.с. Исследовательского центра процессов управления

ИПС им. А.К. Айламазяна РАН

к.т.н.



Ардентов Андрей Андреевич

Выходные данные организации

152021, Ярославская область, Переславский район, с. Веськово,
ул. Петра Первого, д. 4 «а», ИПС им. А.К. Айламазяна РАН,
тел. +7 (4852) 695-228, e-mail: psi@botik.ru,
адрес официального сайта: <http://www.psi-ras.ru>

Личные подписи Сачкова Ю.Л. и Ардентова А.А. заверяю:

начальник отдела кадров



Игнатъева Е.Л.

