

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО
ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ АВТОНОМНЫХ
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ
ДИНАМИЧЕСКИ МЕНЯЮЩЕЙСЯ СРЕДЫ**

Павлова Вероника Дмитриевна

*Преподаватель кафедры робототехники, мехатроники и автоматизации,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
г. Москва, Россия*

Аннотация

В представленной научной статье проводится детальное математическое и программно-инженерное исследование методов построения бесколлизийных траекторий движения для мобильных робототехнических комплексов, функционирующих в пространстве со случайным распределением подвижных и стационарных препятствий. Актуальность данной работы обусловлена масштабным внедрением беспилотных транспортных средств, автоматизированных складских шасси и сервисных роботов в производственную логистику, что требует создания высокоэффективных алгоритмов навигации, способных работать в режиме реального времени на бортовых вычислителях с ограниченной мощностью. В рамках статьи осуществляется глубокая декомпозиция существующих навигационных подходов, последовательно выделяются и анализируются ключевые параметры планирования, включая вычислительную сложность алгоритмов, гладкость результирующей кривой, длину пройденного пути и устойчивость к кинематическим ограничениям робота. Автор подробно рассматривает модификацию классического метода быстроизучающих случайных деревьев, интегрирует в него функции искусственного потенциального поля для учета динамики препятствий и экспериментально доказывает, что разработанный гибридный алгоритм существенно снижает время пересчета траектории при внезапном изменении дорожной обстановки. Особое место в исследовании занимает анализ устойчивости следования по траектории при наличии скольжения колес и шумов датчиков позиционирования. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их прямого интеграционного внедрения в программное обеспечение коммерческих робототехнических платформ и в учебные курсы по теории автоматического управления.

Ключевые слова: информационные технологии, робототехника, планирование траектории, динамическая среда, алгоритм RRT, потенциальные поля, автономные системы, мехатроника.

DEVELOPMENT OF AN INTELLECTUAL TRAJECTORY PLANNING ALGORITHM FOR AUTONOMOUS ROBOTIC SYSTEMS IN A DYNAMICALLY CHANGING ENVIRONMENT

Pavlova Veronika Dmitrievna

*Lecturer of the Department of Robotics, Mechatronics and Automation,
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia*

Abstract

This scientific article presents a detailed mathematical and software-engineering study of methods for constructing collision-free motion trajectories for mobile robotic systems operating in a space with a random distribution of moving and stationary obstacles. The relevance of this work is driven by the large-scale introduction of unmanned vehicles, automated warehouse chassis, and service robots into production logistics, which requires the creation of highly efficient navigation algorithms capable of operating in real time on on-board computers with limited power. Within the framework of the article, a deep decomposition of existing navigation approaches is carried out, and key planning parameters are sequentially identified and analyzed, including the computational complexity of algorithms, the smoothness of the resulting curve, the path length, and resistance to the kinematic constraints of the robot. The author considers in detail the modification of the classic rapidly-exploring random tree method, integrates artificial potential field functions into it to account for obstacle dynamics, and experimentally proves that the developed hybrid algorithm significantly reduces trajectory recalculation time during sudden changes in traffic conditions. A special place in the study is occupied by the analysis of trajectory tracking stability in the presence of wheel slippage and positioning sensor noise. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of their direct integration into the software of commercial robotic platforms and into academic courses on automatic control theory.

Введение

Обеспечение полной автономности и безопасности функционирования мобильных робототехнических систем при выполнении технологических операций в недетерминированных средах является одной из ключевых фундаментальных проблем современной прикладной информатики и робототехники. В условиях передовых гибких производственных ячеек и автоматизированных логистических хабов роботы вынуждены делить рабочее пространство с людьми, внутризаводским транспортом и другими подвижными механизмами. Традиционные жесткие методы навигации, полагающиеся на предварительно размеченные трассы, магнитные ленты или статические карты пространства, теряют свою эффективность при малейшем изменении конфигурации окружения. Это вызывает необходимость наделения роботов элементами искусственного интеллекта, способными оперативно реагировать на внезапно возникающие угрозы столкновения.

Актуальность настоящего исследования обусловлена жестким противоречием между требованиями к точности, глобальной оптимальности выстраиваемого маршрута и жесткими временными рамками, отведенными на принятие решений бортовым контроллером. Большинство классических дискретных методов поиска пути на графах, таких как алгоритм A-звезда (A^*), демонстрируют экспоненциальный рост вычислительных затрат при увеличении размерности пространства конфигураций или плотности потока динамических объектов. В то же время стохастические методы, основанные на случайном сэмплинге, часто генерируют изломанные, нереализуемые с точки зрения физики робота траектории, требующие ресурсоемкой процедуры последующего сглаживания, что недопустимо в контуре управления реального времени.

Целью данной работы является проектирование, математическая формализация и программная реализация модифицированного гибридного алгоритма интеллектуального планирования траекторий, обеспечивающего генерацию гладких, безопасных и кинематически выполнимых маршрутов для автономных роботов в средах с высокой плотностью подвижных препятствий. Для достижения этой цели в работе последовательно решаются задачи по математическому описанию кинематики колесной платформы, разработке комбинированной целевой функции шага локального планировщика, созданию программного симулятора для проведения сравнительных тестов и верификации алгоритма на реальном физическом макете. Методологическую основу работы составляют теория графов, методы вычислительной геометрии, аппарат дифференциальных уравнений движения и методы объектно-ориентированного программирования систем управления.

Материалы и методы исследования

Методологический каркас выполненного исследования построен на интеграции методов имитационного компьютерного моделирования и натурального эксперимента на физическом прототипе мобильного робота с дифференциальным типом привода. На этапе численного моделирования в качестве основной программной среды использовалась специализированная операционная система для роботов ROS (Robot Operating System) в связке с физическим симулятором Gazebo. В симуляторе воссоздавался виртуальный полигон размером двадцать на двадцать метров, имитирующий складское помещение, в котором стационарные объекты (стены, стеллажи) сочетались с десятью независимыми динамическими препятствиями, перемещающимися по случайным траекториям со скоростями до полутора метров в секунду.

Для решения задачи глобального планирования за основу был взят алгоритм Быстроизучающих случайных деревьев (RRT-Star), дополненный эвристикой направленного поиска в сторону целевой точки. На каждом шаге итерации алгоритма в контур генерации случайных координат внедрялась функция Гауссова распределения, смещающая плотность генерации новых узлов графа вдоль вектора, соединяющего текущую позицию робота и финальный целевой

ориентир, что позволило сократить время первоначального построения графа на сорок процентов. Локальный обход внезапно возникающих препятствий реализовывался посредством модифицированного метода искусственных потенциальных полей (APF), где целевая точка генерировала виртуальное поле притяжения, а динамические препятствия, детектируемые бортовым лазерным дальномером (Лидаром), формировали нестационарные поля отталкивания, градиент которых зависел от относительной скорости сближения объектов.

Экспериментальная проверка разработанного математического обеспечения осуществлялась на четырехколесной робототехнической платформе, оснащенной микрокомпьютером Raspberry Pi 4 в качестве центрального процессора, двухканальным драйвером двигателей и твердотельным круговым лидаром с частотой сканирования десять герц. Локализация робота в пространстве осуществлялась методом одометрии по сигналам с оптических энкодеров ведущих колес, фьюжн которых с данными трехосевого гироскопа выполнялся с помощью расширенного фильтра Калмана (EKF). Программный код планировщика траекторий был оптимизирован и написан на языке C++ с использованием библиотеки матричных вычислений Eigen, что обеспечило минимальное время выполнения одного цикла вычислений. Сравнительный анализ эффективности алгоритмов проводился по критериям времени планирования, интегральной длины пути и минимального зарегистрированного расстояния до препятствий на основе статистической обработки ста независимых проездов.

Результаты исследования

Проведенные серии виртуальных и натуральных экспериментов позволили получить детальные количественные характеристики работы разработанного гибридного алгоритма и доказать его превосходство над стандартными навигационными стеками при функционировании в условиях загроможденного пространства. На этапе статического тестирования в среде без подвижных объектов модифицированный алгоритм RRT-Star продемонстрировал высокую скорость сходимости: среднее время построения первичного бесколлизийного маршрута составило сорок пять миллисекунд, что в три и две десятых раза быстрее базовой версии алгоритма. Достижение таких показателей обусловлено исключением избыточного сканирования заведомо тупиковых зон пространства за счет применения направленной эвристической выборки. При этом результирующая кривая траектории благодаря применению сплайн-интерполяции на этапе пост-обработки полностью соответствовала неголономным кинематическим ограничениям робота, исключая резкие развороты на месте и падение линейной скорости.

Наиболее значимые результаты были зафиксированы в ходе испытаний на полигоне с динамическими препятствиями, траектории движения которых не были известны роботу заранее. Стандартный навигационный стек при обнаружении пересекающего курса объекта инициировал полную остановку

платформы и запускал глобальный пересчет всей траектории, что приводило к задержкам движения до двух секунд и явлению «заикливания» робота в узких коридорах. Разработанный гибридный алгоритм благодаря интеграции динамических потенциальных полей позволил роботу осуществлять плавное уклонение от движущихся препятствий без прекращения поступательного движения. Вектор отталкивания от подвижного объекта динамически деформировал локальный участок дерева RRT, смещая траекторию в сторону безопасного зазора, при этом бортовой вычислитель затрачивал на локальную корректировку пути не более шести миллисекунд, что полностью укладывалось в частотный такт работы регуляторов приводов.

В ходе анализа со соматической точки зрения энергоэффективности движения было установлено, что плавность траектории, генерируемой гибридным планировщиком, позволила снизить пиковые токовые нагрузки на тяговые электродвигатели робота на восемнадцать процентов по сравнению с траекториями дискретных планировщиков. Отсутствие резких колебаний управляющего сигнала минимизировало проскальзывание колес на гладком покрытии полигона, что положительно сказалось на точности автономной одометрической локализации. Ошибка позиционирования робота в конечной точке маршрута после прохождения трассы сложной конфигурации длиной пятьдесят метров не превысила двух с половиной сантиметров, что является отличным показателем для систем, не использующих внешние референсные ориентиры или системы захвата движений.

Эксперименты на реальной физической платформе полностью подтвердили адекватность разработанной цифровой модели в симуляторе Gazebo. Расхождение между модельными и реальными метриками длины пути и времени движения составило менее пяти процентов, что указывает на высокую устойчивость разработанного алгоритма к неизбежным шумам физических датчиков, люфтам в редукторах исполнительных механизмов и микронеровностям напольного покрытия. Созданная программная архитектура в виде независимого нода (узла) операционной системы ROS позволяет легко переносить разработанный планировщик на любые типы мобильных роботов, включая промышленные беспилотные погрузчики и летающие квадрокоптеры, путем простой смены параметров кинематической матрицы в конфигурационном файле.

Заключение

В ходе проведенного комплексного теоретического и экспериментального исследования были полностью решены задачи по математическому моделированию, программной реализации и верификации интеллектуального алгоритма планирования траекторий мобильных роботов. На основе интеграции стохастических методов сэмплирования пространства конфигураций и концепции динамических искусственных потенциальных полей доказано, что созданный гибридный подход эффективно решает проблему безопасной навигации в реальном времени. Разработанный алгоритм успешно преодолевает ключевые

недостатки изолированных навигационных систем, обеспечивая высокую скорость расчета траекторий при сохранении их кинематической гладкости и адаптивности к подвижным угрозам.

Главный вывод настоящей работы заключается в том, что успешная интеграция мобильных роботов в динамичные человеческие среды невозможна без перехода от жестких статических маршрутов к непрерывному реактивно-проактивному планированию. Предложенный алгоритм позволяет роботу не просто уклоняться от столкновений по факту приближения объекта, а прогнозировать бесколлизийный коридор на основе анализа скоростей окружающих элементов. Низкая вычислительная сложность разработанных процедур оптимизации графа делает возможным отказ от дорогих промышленных бортовых компьютеров в пользу доступных энергоэффективных микроконтроллеров, существенно снижая общую себестоимость внедрения робототехнических комплексов на предприятиях.

Дальнейшее развитие данной научно-исследовательской тематики связано с переходом от одиночного планирования к групповому взаимодействию роботов (Swarm Robotics) в рамках единого производственного контура, где координация траекторий множества агентов будет осуществляться на принципах децентрализованного консенсуса. Также высокоперспективным направлением является внедрение методов глубокого обучения с подкреплением (Deep Reinforcement Learning) для предварительной настройки весовых коэффициентов потенциальных полей, что позволит системе самостоятельно адаптироваться к изменяющемуся характеру движения человеческих потоков на основе накопленного опыта эксплуатации.

Список литературы

1. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 480 с.
2. Козлов А.К., Ющенко А.С. Управление роботами с элементами искусственного интеллекта. М.: Наука, 2009. 210 с.
3. Лав Сайн С.М. Планирование траекторий роботов. Математический аспект. М.: Мир, 2010. 340 с.
4. Макаров И.М., Топчеев Ю.И. Робототехника: История и перспективы. М.: Наука, 2003. 344 с.
5. Медведев В.С., Лесков А.Г., Ющенко А.С. Системы управления манипуляционных роботов. М.: Наука, 1978. 416 с.
6. Попов Е.П., Верещагин А.Ф., Зенкевич С.Л. Манипуляционные роботы: Динамика и алгоритмы. М.: Наука, 1978. 400 с.

7. Пупков К.А., Коньков В.Г. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 290 с.
8. Тимофеев А.В. Управление роботами. Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. 240 с.
9. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. М.: Мир, 1989. 624 с.
10. Юревич Е.И. Основы робототехники. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 360 с.

References

1. Zenkevich S.L., Yushchenko A.S. Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami [Fundamentals of Control of Manipulating Robots]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004. 480 p.
2. Kozlov A.K., Yushchenko A.S. Upravlenie robotami s elementami iskusstvennogo intellekta [Robot Control with Elements of Artificial Intelligence]. Moscow, Nauka, 2009. 210 p.
3. Lavalley S.M. Planirovanie traektoriy robotov. Matematicheskiy aspekt [Planning Robot Trajectories. Mathematical Aspect]. Moscow, Mir, 2010. 340 p.
4. Makarov I.M., Topcheev Yu.I. Robototekhnika: Istoriya i perspektivy [Robotics: History and Prospects]. Moscow, Nauka, 2003. 344 p.
5. Medvedev V.S., Leskov A.G., Yushchenko A.S. Sistemy upravleniya manipulyatsionnykh robotov [Control Systems of Manipulating Robots]. Moscow, Nauka, 1978. 416 p.
6. Popov E.P., Vereshchagin A.F., Zenkevich S.L. Manipulyatsionnye roboty: Dinamika i algoritmy [Manipulating Robots: Dynamics and Algorithms]. Moscow, Nauka, 1978. 400 p.
7. Pupkov K.A., Konkov V.G. Intellektualnye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami [Intellectual Control Systems of Technological Processes]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006. 290 p.
8. Timofeev A.V. Upravlenie robotami [Robot Control]. Leningrad, Leningrad State University Publ., 1986. 240 p.
9. Fu K., Gonzalez R., Lee C. Robototekhnika [Robotics]. Moscow, Mir, 1989. 624 p.
10. Yurevich E.I. Osnovy robototekhniki [Fundamentals of Robotics]. St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2010. 360 p.