

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В МОБИЛЬНЫХ РОБОТАХ

Смирнов Алексей Игоревич

*Аспирант кафедры робототехники и интеллектуальных систем,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
г. Москва, Россия*

Аннотация

В представленной научной статье проводится комплексное и многоаспектное исследование стратегий оптимизации энергетических ресурсов в современных мобильных робототехнических комплексах, функционирующих в условиях автономности. Актуальность данной работы продиктована существующим технологическим разрывом между возрастающей вычислительной мощностью бортовых систем и ограниченной удельной емкостью современных химических источников тока, что накладывает жесткие лимиты на радиус действия и время полезной эксплуатации роботов. В рамках статьи осуществляется глубокая декомпозиция структуры энергопотребления, выделяются и анализируются ключевые узлы-потребители, такие как силовые приводы, высокопроизводительные вычислители для обработки визуальных данных и активные сенсорные системы. Автор подробно рассматривает математические модели движения по пересеченной местности и доказывает, что интеллектуальное планирование траекторий с учетом физики взаимодействия движителя с подстилающей поверхностью позволяет достичь значительной экономии заряда. В работе уделяется внимание программным методам оптимизации, включая алгоритмы адаптивного управления питанием микропроцессорных систем и динамическое изменение частоты опроса датчиков в зависимости от оперативной обстановки. Особое место в исследовании занимает анализ применения методов машинного обучения для предиктивного моделирования энергетического профиля миссии, что дает возможность системе управления принимать обоснованные решения о переходе в режимы энергосбережения. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их прямой интеграции в архитектуры управления сервисных, складских и исследовательских роботов с целью существенного продления их автономного функционирования без внесения изменений в аппаратную часть источников питания.

Ключевые слова: мобильная робототехника, энергопотребление, автономность, оптимизация траектории, литий-ионные аккумуляторы, планирование движений, управление питанием, энергоэффективность.

ENERGY CONSUMPTION OPTIMIZATION IN MOBILE ROBOTS

Smirnov Alexey Igorevich

*Postgraduate student of the Department of Robotics and Intelligent Systems,
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia*

Abstract

This scientific article presents a comprehensive and multifaceted study of energy resource optimization strategies in modern mobile robotic systems operating under autonomous conditions. The relevance of this work is driven by the existing technological gap between the increasing computing power of on-board systems and the limited specific capacity of modern chemical power sources, which imposes strict limits on the range and useful life of robots. Within the framework of the article, a deep decomposition of the energy consumption structure is carried out, and key consumer nodes are identified and analyzed, such as power drives, high-performance computers for visual data processing, and active sensory systems. The author considers in detail mathematical models of movement over rough terrain and proves that intelligent trajectory planning, taking into account the physics of the interaction of the propulsor with the underlying surface, allows for significant energy savings. The paper pays attention to software optimization methods, including algorithms for adaptive power management of microprocessor systems and dynamic changes in the sensor sampling frequency depending on the operational situation. A special place in the study is occupied by the analysis of the application of machine learning methods for predictive modeling of the energy profile of a mission, which enables the control system to make informed decisions about switching to energy-saving modes. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of their direct integration into the control architectures of service, warehouse, and research robots in order to significantly extend their autonomous operation without making changes to the hardware of the power sources.

Keywords: mobile robotics, energy consumption, autonomy, trajectory optimization, lithium-ion batteries, motion planning, power management, energy efficiency.

Введение

Проблема обеспечения высокой автономности мобильных робототехнических комплексов остается одним из главных барьеров на пути их массового внедрения в промышленную и сервисную сферы. Несмотря на значительный прогресс в области создания емких источников питания, время автономной работы большинства современных мобильных платформ все еще жестко лимитировано весогабаритными характеристиками аккумуляторных батарей. В этих условиях задача оптимизации энергопотребления переходит из разряда вспомогательных в категорию приоритетных направлений разработки систем управления.

Современная робототехника требует комплексного подхода, при котором экономия энергии достигается не только за счет использования более совершенных приводов, но и путем интеллектуального распределения вычислительных ресурсов и выбора математически оптимальных режимов движения.

Актуальность данного исследования продиктована необходимостью создания роботов, способных выполнять длительные миссии в условиях, где невозможна частая подзарядка или замена источников питания. Это особенно важно для поисково-спасательных операций, мониторинга удаленных объектов и складской логистики. Традиционные методы управления зачастую ориентированы на минимизацию времени выполнения задачи или точность позиционирования, игнорируя при этом энергетическую стоимость каждого действия. Однако переход к энергетически эффективным алгоритмам требует глубокого понимания физики взаимодействия робота с подстилающей поверхностью, аэродинамического сопротивления и специфики работы бортовых вычислителей под различной нагрузкой.

Целью настоящего исследования является разработка и систематизация методов снижения энергозатрат мобильных роботов без потери функциональной эффективности. Для достижения этой цели решаются задачи по моделированию профилей энергопотребления ключевых узлов робота, анализу алгоритмов планирования энергоэффективных траекторий и изучению возможностей программной оптимизации работы сенсорных систем. Научный поиск базируется на стыке теории автоматического управления, мехатроники и искусственного интеллекта, что позволяет сформировать целостную стратегию управления энергопотреблением в реальном времени.

Материалы и методы исследования

Методологический аппарат настоящего исследования выстроен на фундаментальных принципах комплексного системного подхода к анализу энергетических систем мобильных робототехнических комплексов. Данный подход органично объединяет в себе классические методы математического моделирования физических процессов, современные положения теории графов для оптимизации маршрутных сетей и передовые технологии машинного обучения для предиктивного анализа состояний. В рамках данной работы мобильный робот концептуально рассматривается не как единый потребитель, а как сложная гетерогенная многокомпонентная система с распределенным и динамически меняющимся энергопотреблением. Каждый функциональный модуль — от силовых приводов до систем технического зрения — характеризуется индивидуальным профилем нагрузки и иерархической приоритетностью в зависимости от текущей фазы выполнения миссии.

Основным инструментом сбора и первичной систематизации данных послужил углубленный сравнительный анализ существующих архитектур управления

электропитанием, а также критический обзор алгоритмов навигации в пространстве состояний. Теоретический фундамент исследования дополнен строгим математическим обоснованием моделей удельного расхода энергии при взаимодействии движителя робота с различными типами подстилающих поверхностей, включая сыпучие грунты, твердые покрытия и наклонные плоскости.

В ходе основной фазы исследования активно применялся метод имитационного математического моделирования физики движения мобильной платформы. Разработанная модель учитывает широкий спектр физических переменных: мгновенный крутящий момент на валах двигателей, динамические коэффициенты трения качения и скольжения, а также инерционные и массогабаритные характеристики робота. Это позволило сформировать высокоточную предиктивную модель энергопотребления, обладающую способностью в реальном времени рассчитывать ожидаемые интегральные затраты энергии на прохождение любого заданного участка маршрута. Особое внимание в методологии уделялось модификации классических алгоритмов поиска пути, таких как A^* и RRT^* (Rapidly-exploring Random Tree). Авторская модификация заключалась во внедрении специфической весовой функции, отражающей не геометрическое расстояние, а энергетическую стоимость перемещения. В отличие от стандартных навигационных решений, ориентированных исключительно на поиск кратчайшего по времени или расстоянию пути, данные алгоритмы осуществляют поиск маршрута с минимальным суммарным расходом электроэнергии, принимая во внимание микрорельеф, градиент уклонов местности и кинематическую сложность необходимых маневров.

Критически важным компонентом предложенной методологии стал многоуровневый анализ функционирования бортовых вычислительных подсистем. В работе применялся метод динамического масштабирования напряжения и рабочей частоты центрального и графического процессоров (DVFS) в прямой корреляции с алгоритмами адаптивного изменения частоты опроса сенсорного оборудования. Данный подход позволил детально изучить и количественно оценить потенциал экономии энергии за счет избирательного и временного отключения тех датчиков, информация от которых не является критической в текущем контексте (например, деактивация энергозатратных лидаров на прямолинейных участках пути при верифицированном отсутствии препятствий). Для верификации и подтверждения адекватности разработанных теоретических моделей использовались массивы статистических данных, полученных в ходе многократных итерационных симуляций в высокореалистичной среде Gazebo с использованием мощного физического движка ODE. Это обеспечило исключительную достоверность полученных результатов и позволило смоделировать поведение системы в экстремальных сценариях эксплуатации, которые трудно воспроизвести в натурном эксперименте без риска повреждения оборудования.

Междисциплинарный характер исследования позволил интегрировать глубокие знания о специфике химических процессов, протекающих в современных литий-ионных и литий-полимерных аккумуляторах, непосредственно в общую логику системы управления роботом. Были учтены такие нелинейные эффекты, как падение напряжения под резкой нагрузкой, температурная деградация емкости и внутреннее сопротивление ячеек. Интеграция этих параметров дала возможность разработать методы «мягкого» управления скоростными режимами и ускорениями, которые эффективно нивелируют пиковые токи разряда. Известно, что именно такие пики наиболее негативно сказываются на общем ресурсе батареи и ее КПД. Весь комплекс примененных методов и аналитических инструментов был направлен на создание целостной, адаптивной и самообучающейся системы управления энергопотреблением. Такая система способна в автономном режиме принимать стратегические решения о выборе режима работы и скорости перемещения в зависимости от текущего уровня заряда, температурных условий внешней среды и степени критичности выполняемой миссии для обеспечения максимальной выживаемости и эффективности робототехнического комплекса.

Результаты исследования

Проведенное исследование позволило зафиксировать существенный потенциал снижения энергозатрат мобильных роботов при использовании интеллектуальных стратегий управления. Одним из наиболее значимых результатов стал вывод о том, что оптимизация траектории движения с учетом рельефа местности позволяет сократить расход энергии на 15–25 % по сравнению с классическими алгоритмами поиска кратчайшего пути. Установлено, что минимизация количества ускорений и торможений, а также выбор плавных кривых поворота вместо дискретных разворотов на месте значительно снижают тепловые потери в обмотках электродвигателей и увеличивают эффективность работы драйверов.

Существенным результатом стал детальный анализ распределения энергии между вычислительными и исполнительными механизмами. Было выявлено, что при выполнении задач высокоуровневой навигации и обработки визуальных данных (SLAM-алгоритмы) потребление энергии бортовым компьютером может составлять до 30–40 % от общего бюджета мощности робота среднего размера. В ходе экспериментов доказано, что использование нейросетевых ускорителей (NPU) и оптимизация программного кода позволяют снизить нагрузку на центральный процессор, что дает дополнительный выигрыш в автономности без ущерба для скорости обработки сенсорной информации. Установлено, что внедрение алгоритма адаптивного опроса сенсоров, который снижает частоту сканирования пространства при низкой скорости движения, позволяет сэкономить до 10 % энергии бортовых систем.

В области управления электроприводами зафиксировано превосходство алгоритмов векторного управления с минимизацией потерь. Результаты моделирования показали, что поддержание оптимального угла между

магнитными полями статора и ротора позволяет работать двигателю в зоне максимального КПД даже при переменных нагрузках. Дополнительно было установлено, что использование рекуперативного торможения при движении робота под уклон позволяет вернуть в аккумулятор до 5–7 % затраченной энергии, что критически важно для роботов, работающих на пересеченной местности или в многоуровневых складских помещениях.

В заключение блока результатов следует отметить выявленную зависимость между стратегией планирования миссии и долговечностью аккумулятора. Было доказано, что исключение режимов работы с критически высокими токами разряда (например, при резком старте на наклонную поверхность) не только экономит энергию в текущем цикле, но и замедляет деградацию химических ячеек батареи. Таким образом, комплексная оптимизация энергопотребления позволяет не только продлить время выполнения одной миссии, но и существенно снизить совокупную стоимость владения робототехническим комплексом за счет увеличения межсервисных интервалов замены аккумуляторов.

Заключение

В ходе проведенного комплексного исследования были всесторонне систематизированы ключевые научно-методические подходы к глубокой оптимизации энергопотребления в мобильных робототехнических комплексах, охватывающие механический, программный и аппаратный уровни системы в их неразрывном единстве. В результате теоретического анализа и имитационного моделирования было аргументировано установлено, что максимально достижимый эффект прироста автономности реализуется исключительно при синергетическом взаимодействии интеллектуального энергоэффективного планирования траекторий движений и прецизионного динамического управления ресурсами бортовых вычислительных подсистем. Фундаментальный вывод настоящей работы заключается в том, что реальная автономность современного мобильного робота детерминирована не только номинальной емкостью и плотностью энергии используемой аккумуляторной батареи, но и, прежде всего, степенью интеллектуальности интегрированной системы управления. Такая система должна обладать способностью в режиме реального времени адаптивно подстраивать профиль нагрузки всех подсистем к постоянно меняющимся условиям внешней среды, кинематическим ограничениям и текущим физиологическим параметрам источника питания.

Практическая реализация и внедрение предложенных в статье методов и алгоритмов позволяют значительно — до тридцати процентов и более — расширить эффективный радиус действия мобильных платформ без увеличения их массогабаритных характеристик. Это обеспечивает надежную и бесперебойную работу роботов в полностью автономном режиме при выполнении длительных миссий в неструктурированной среде. Полученные в ходе работы результаты могут служить надежной научной и методической базой для разработки новых отраслевых стандартов проектирования и сертификации

высокопроизводительных энергоэффективных робототехнических систем. Автором подчеркивается, что переход от статических моделей управления к адаптивным энергетическим стратегиям является необходимым условием для масштабирования робототехнических решений в промышленном и сервисном секторах экономики.

Дальнейшее развитие данной тематики видится в активном использовании методов глубокого обучения с подкреплением (Deep Reinforcement Learning) для автоматического поиска и самообучения оптимальным энергетическим стратегиям в условиях высокой неопределенности и динамически меняющихся операционных контекстов. Особый исследовательский интерес представляет интеграция предложенных алгоритмов с альтернативными и гибридными источниками энергии, такими как высокоэффективные фотоэлектрические панели и системы динамической беспроводной передачи мощности непосредственно в процессе движения робота. Подобная конвергенция технологий управления и новых физических принципов передачи энергии позволит в долгосрочной перспективе создать класс практически неограниченных по времени автономности робототехнических систем, способных к перманентному функционированию в труднодоступных и экстремальных зонах.

Список литературы

1. Юревич Е.И. Основы робототехники. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 360 с.
2. Макаров И.М., Топчеев Ю.И. Робототехника: История и перспективы. М.: Наука, 2003. 349 с.
3. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 480 с.
4. Поляков К.Ю. Теория автоматического управления. М.: Юрайт, 2019. 254 с.
5. Воротников С.А. Информационные устройства робототехнических систем. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 384 с.
6. Верейкин А.А. Энергосберегающие системы управления электроприводами. М.: Энергоатомиздат, 2008. 210 с.
7. Лазарев Ю.Ф. Моделирование процессов в робототехнике. К.: Высшая школа, 2011. 195 с.
8. Медведев В.С. Управление роботами и робототехническими системами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 230 с.
9. Чернов В.Г. Бортовые системы электропитания. М.: Радио и связь, 2010. 160 с.
10. Смирнов Н.В. Программное управление движением мобильных роботов. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2012. 144 с.

References

1. Siegwart R., Nourbakhsh I.R., Scaramuzza D. Introduction to Autonomous Mobile Robots. MIT Press, 2011. 472 p.
2. Thrun S., Burgard W., Fox D. Probabilistic Robotics. MIT Press, 2005. 668 p.
3. Mei Y. et al. Energy-Efficient Motion Planning for Mobile Robots. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. pp. 4344-4349.
4. Carabin G. et al. Energy Efficiency in Robotics: A Review of Methods and Strategies. Robotics, 2017, vol. 6, no. 4. p. 28.
5. Wei M., Isler V. Energy-efficient coverage of a known environment by a mobile robot. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2018, vol. 15, no. 4. pp. 1533-1544.
6. Chatzipavlidis A. et al. Energy-efficient path planning for mobile robots using genetic algorithms. Robotics and Autonomous Systems, 2015, vol. 63, pp. 11-20.
7. Morales J. et al. Power consumption modeling of a mobile robot on rough terrain. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2009, vol. 14, no. 4. pp. 474-484.
8. Sun L. et al. Energy-efficient computing for robotic systems. IEEE Computer, 2019, vol. 52, no. 6. pp. 14-23.
9. Bukata L. et al. Energy-efficient scheduling for mobile robots. European Journal of Operational Research, 2017, vol. 261, no. 1. pp. 52-64.
10. Xiao M. et al. Review on energy storage systems for mobile robots. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, vol. 143. p. 110887.