

ПРОСТОЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ПУТИ НА ОСНОВЕ ГРАФОВ ДЛЯ АРТИКУЛИРОВАННЫХ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ

И.С. Довгополик

Университет ИТМО

Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. А
E-mail: isdovgopolik@itmo.ru

А. Козина

Университет ИТМО

Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. А
E-mail: akozina@itmo.ru

Ключевые слова: навигация и управление, артикулированный робот-манипулятор, планирование пути, алгоритмы на основе графов, оптимизация энергопотребления.

Аннотация: в условиях растущей роботизации эффективное энергопотребление является экономической и экологической необходимостью. В этой статье предлагается простой подход к снижению энергопотребления шарнирных роботов-манипуляторов, наиболее часто используемых в промышленности. В статье анализируются существующие подходы к оптимизации энергетических затрат на планирование движения робота и предлагается новый метод оптимизации графовых алгоритмов планирования пути.

1. Введение

Существует множество классификаций роботов по различным критериям. Промышленные роботы делятся на мобильные, многозвенных манипуляторов и комбинированных роботов [1]. Мобильный робот – это автоматическое устройство, способная передвигаться. Манипулятор – это устройство, позволяющее взаимодействовать с объектами без прямого физического контакта со стороны оператора. Комбинированные роботы – это роботы, обладающие как функцией перемещения, так и функцией манипулирования объектами внешней среды. Все они очень часто используются в промышленности [1].

Планирование движения мобильных роботов и роботов-манипуляторов различается. Мобильных роботов можно представить в виде материальной точки в рабочем пространстве [1], робота-манипулятора — сложной геометрической фигуры в рабочем пространстве [1]. Поэтому для планирования пути манипулятора используется конфигурационное пространство (С-пространство), где робот в каждой позиции представляет собой точку — набор конфигураций [1]. Существуют универсальные и специальные методы планирования пути и методы оптимизации энергопотребления [1]. Задача снижения энергопотребления наиболее актуальна для мобильных автономных роботов, поскольку время их работы ограничено зарядом аккумулятора. Однако роботам-манипуляторам для своей работы требуется гораздо больше энергии, следовательно, для мобильных роботов низкое энергопотребление означает высокую

эффективность работы, а для многозвенных роботов-манипуляторов снижение энергопотребления означает экономию и сохранение окружающей среды [2].

Энергопотребление мобильных роботов можно снизить несколькими способами. Наиболее популярными являются поиск кратчайшего пути в пространстве к цели [3] и создание траекторий со специальной формой траекторий, позволяющей минимизировать расход энергии [3]. Для роботов-манипуляторов существуют специальные подходы к повышению энергоэффективности [4]. Распространенный подход – использование динамической модели робота для ограничения энергозатратных движений [3]. Другой подход заключается в создании траектории из простых движений с низким расходом энергии [5]. Алгоритмы с естественно заложенной энергетической оптимизацией существуют и универсально подходят для мобильных роботов и манипуляторов [3], например метод потенциальных полей с градиентным спуском [6]. Но метод потенциальных полей имеет различные локальные проблемы [3, 6]. В этой статье рассматриваются существующие подходы планирования движения роботов и энергетической оптимизации траектории, их применимость к артикулированным роботам-манипуляторам и представляется новый подход к оптимизации энергии задачи планирования пути.

2. Энергетически оптимизированные подходы планирования движения

2.1. Методы планирования пути

Существует множество методов планирования пути робота, основными группами подходов являются методы на основе графов, клеточная декомпозиция, методы на основе потенциальных полей и биоинспирированные алгоритмы [7]. Каждая группа включает в себя большое количество подходов [7]. Все они могут использоваться как для мобильных роботов, так и для манипуляторов, но они имеют разную эффективность. Также методы имеют разную эффективность при глобальном планировании (поиск пути во всем пространстве) и локальном планировании (поиск лучшего пути на отдельных участках глобального пути) [8]. Методы на основе потенциальных полей являются энергоэффективными, поскольку оптимизация пути встроена на уровне алгоритма поиска пути [7]. В то же время они имеют множество проблем, таких как локальные минимумы, сложность прохождения узких участков и т. д. [7]. Биоинспирированные алгоритмы основаны на поведении живых организмов или на принципах организации их работы [6]. У них также есть оптимизация планирования пути как часть алгоритма поиска, но их недостатком является сложная вычислительная процедура [6]. Методы, основанные на клеточной декомпозиции, требуют больших ресурсов памяти для обеспечения высокой точности, поскольку они используют сетку, а для высокой точности необходимо огромное количество клеток, которое, в свою очередь, требует много внутренней памяти для хранения данных [9]. Наиболее популярными подходами являются методы на основе графов [1]. Они просты, поскольку используют простую графовую структуру для хранения и работы с данными [1].

2.2. Методы энергетической оптимизации

Самый популярный критерий оптимизации при планировании движения — это кратчайший путь. Такая оптимизация может быть реализована в алгоритме планирования пути (как в случае с потенциальными полями или биологическими алгоритмами) или в алгоритме постобработки планирования пути (как в случае с

методами на основе графов и клеточной декомпозиции). Для роботизированных манипуляторов в пространстве конфигураций минимальная сумма значений смещений/поворотов сочленений гарантирует, что путь не проходит через дальние от цели области пространства. Однако этот подход не учитывает вклад каждого звена в энергетическую стоимость движения.

3. Новый подход энергетической оптимизации планирования пути

В многосвязных робототехнических системах нагрузка на звенья робота распределяется пропорционально. Введем следующие обозначения. Текущая конфигурация робота n-link:

$$q_0 = \{q_{01} \ q_{02} \ \dots \ q_{0i}\}.$$

Новая конфигурация робота n-link:

$$q_1 = \{q_{11} \ q_{12} \ \dots \ q_{1i}\}.$$

Функция стоимости перехода между двумя конфигурациями (стоимость перехода между узлами графа):

$$f(\Delta q) = \sum_{i=1}^n |q_{0i} - q_{1i}|.$$

Рассмотрим трехзвенный робот-манипулятор (см. рис. 1).

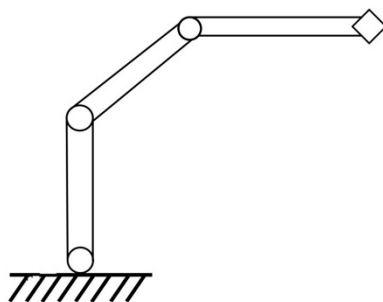


Рис. 1. Трехзвенный манипулятор с вращающимися шарнирами.

Энергия, затрачиваемая электроприводом на перемещение i -го звена, определяется соотношением:

$$E_i = P_i \times t = M_i \times \varpi_i \times t = m_i \times l_i \times \varpi_i \times t,$$

где E_i — энергия, затрачиваемая на вращение i -го звена; P_i — номинальная мощность привода, вращающего i -е звено; M_i — крутящий момент привода, вращающего i -е звено; ϖ_i — угловая скорость привода, вращающего i -е звено; m_i — нагрузка; l_i — плечо.

Максимальный крутящий момент в данном случае имеет двигатель первого звена, так как он должен быть способен перемещать вес всех звеньев и максимальную нагрузку на рабочий орган. Изменим функцию стоимости перехода между состояниями робота путем введения весовых коэффициентов для учета энергетических затрат на каждое движение звена. Весовые коэффициенты определим по формуле (1):

$$(1) \quad k_i = \frac{M_i}{M_{max}}$$

Модернизированная функция стоимости равна:

$$f(\Delta q) = \sum_{i=1}^n (|q_{0i} - q_{1i}| \times k_i).$$

Предполагается, что все электродвигатели работают в номинальном режиме, однако это не всегда справедливо.

Поскольку для определения весовых коэффициентов используются значения каждого электродвигателя звена индивидуально, предложенная функция стоимости учитывает энергетический вклад каждого звена в движение. Блок-схема предлагаемого подхода, встроенного в алгоритм Дейкстры представлена на рис. 2.

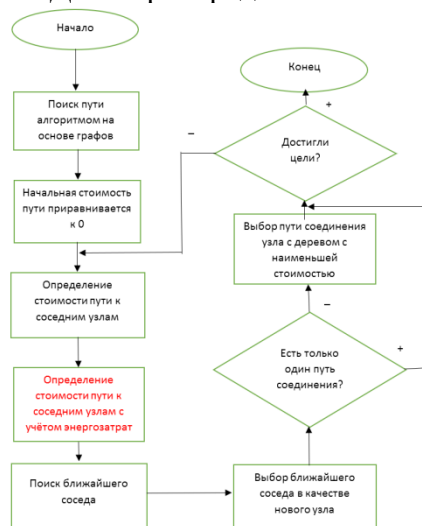


Рис. 2. Блок-схема предлагаемого алгоритма энергетической оптимизации. Отличие от исходного алгоритма Дейкстры заключается в добавлении блока, выделенного красным.

4. Компьютерное моделирование

В рамках работы было проведено компьютерное моделирование. Использовались пакет программного обеспечения Matlab и Corke Robotics Toolbox. Для моделирования был выбран трехзвенный шарнирный манипулятор (см. рис. 1) со следующими параметрами (считаем, что угловая скорость электроприводов одинакова):

$$m_1=5 \text{ кг}; m_2=3 \text{ кг}; m_3=2 \text{ кг}; m_n = 1,5 \text{ кг};$$

$$l_1=l_2=l_3=1 \text{ м};$$

Весовые коэффициенты вычисляются по формуле (1):

$$k_1=1; k_2=0,57; k_3=0,3;$$

Задача робота заключалась в том, чтобы без столкновений переместить рабочий орган в целевую точку. Планирование пути выполнялось 40 раз, 20 раз с использованием оптимизации по кратчайшему пути (исходная функция стоимости) и 20 раз с использованием модифицированной оптимизации (новая функция стоимости).

Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты сравнения работы рассматриваемых алгоритмов оптимизации

Вид оптимизации	Средняя стоимость найденного пути в конфигурационном пространстве, рассчитанная с использованием стандартной функции стоимости	Средняя стоимость найденного пути в конфигурационном пространстве, рассчитанная с использованием предлагаемой функции стоимости

По кратчайшему пути	654	817
Энергетическая	732	563
Относительная разница	+ 10,7 %	-31,1 %

Как видно, новая функция стоимости позволяет снизить затраты энергии в среднем на 31,1% по сравнению со стандартной функцией стоимости для текущего эксперимента, хотя общие затраты по стандартной функции стоимости пути увеличились на 10,7%.

5. Заключение

В данной статье рассматривалась задача энергетической оптимизации планирования пути для артикулированных роботов-манипуляторов. Были рассмотрены существующие методы планирования пути и подходы к энергетической оптимизации пути. Было предложено ввести новую функцию стоимости перехода между узлами графа, учитывающую вклад каждого звена в затраты энергии на общее движение. Проведено компьютерное моделирование, результат которого показывает, что использование новой функции стоимости повышает энергетическую эффективность перемещения шарнирного робота-манипулятора. В методе используются весовые коэффициенты, которые легко рассчитываются из характеристик электроприводов робота.

Список литературы

1. Brahmi H., Ammar B., Alimi A.M. Intelligent path planning algorithm for autonomous robot based on recurrent neural networks // 2013 International Conference on Advanced Logistics and Transport. 2013. P. 199-204. doi:10.1109/ICAdLT.2013.6568459.
2. Chen G., Luo N., Liu D., Zhao Z., Liang C. Path planning for manipulators based on an improved probabilistic roadmap method // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2021. Vol. 72. P. 102196. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102196>.
3. Corke P. Matlab toolboxes: Robotics and vision for students and teachers // Robotics and Automation Magazine. 2008. Vol. 14. P. 16-17. doi:10.1109/M-RA.2007.912004.
4. Debnath S.K., Omar R., Bagchi S., Sabudin E.N., Shee Kandar M.H.A., Foysoyl K., Chakraborty T.K. Different cell decomposition path planning methods for unmanned air vehicles-a review // Z. Md Zain, H. Ahmad, D. Pebrianti, M. Mustafa, N.R.H. Abdullah, R. Samad, M. Mat Noh (Eds.). Proceedings of the 11th National Technical Seminar on Unmanned System Technology. Singapore: Springer, 2019. P. 99-111.
5. Elia Nadira S., Omar R., Hailma C.K.N.. Potential field methods and their inherent approaches for path planning // ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11. P. 10801-10805.
6. Feng Y., Ji Z., Gao Y., Zheng H., Tan J.. An energy-saving optimization method for cyclic pick-and-place tasks based on flexible joint configurations // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2021. Vol. 67. P. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102037>.
7. Fiorini P., Shiller Z. Robot motion planning in dynamic environments // The International Journal of Robotics Research. 1996. P. 1-6. doi:10.1007/978-1-4471-1021-7 27.
8. Henley E.J., Williams R. Graph theory in modern engineering // Mathematics in Science and Engineering. 1973. Vol. 98. P. 161-174. doi: [https://doi.org/10.1016/S0076-5392\(08\)62011-1](https://doi.org/10.1016/S0076-5392(08)62011-1).
9. Hwang Y., Ahuja N. A potential field approach to path planning // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1992. Vol. RA-8, No. 1. P. 23-32. doi:10.1109/70.127236.