

А. Аль Бадр, А. А. Андропова, Р. Р. Хусаинов, С. И. Савин
**АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОГО УРОВНЯ
ДЛЯ ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ**

Университет Иннополис
a.andronova@innopolis.university

В статье проводится критическая оценка и обобщение современных методов планирования траекторий, разработанных для шагающих роботов. Сравниваются методы, основанные на оптимизации (в том числе смешанно-целочисленной); нейронных сетях; графах; вариационном исчислении и случайной выборке.

Ключевые слова: шагающие роботы, управление, оптимизация, планирование траектории, робототехника.

A. Al Badr, A. A. Andronova, R. R. Husainov, S. I. Savin
ANALYSIS OF HIGH-LEVEL CONTROL METHODS FOR WALKING ROBOTS
Innopolis University

The review critically evaluates and summarizes state-of-the-art path planning methods designed for walking robots. Methods based on optimization including mixed-integer optimization, neural networks, graphs, calculus of variations, and random sampling are compared.

Keywords: walking robot, control theory, optimization, path planning, robotics.

Введение

Управление шагающими роботами является сложной задачей, решаемой набором систем – от навигации до низкоуровневых контуров управления отдельными приводами робота. В частности, в общей задаче управления шагающим роботом можно выделить две подзадачи: планирование движения высокого уровня и планирование движения низкого уровня [1]. Первая состоит в поиске ответа на вопрос «куда двигаться?», тогда как вторая отвечает на вопрос «как двигаться?» в направлении, определенном первой задачей. Классическим примером такого разделения является задание скорости робота в качестве внешней команды (решение первой задачи) и использование планировщика шагов в сочетании с предиктивным управлением (решение второй задачи) [2].

Значительный объем научной литературы, посвященной вопросам управления шагающими роботами, выпущенный в течение последних нескольких лет, направлен в своем большинстве именно на решение задачи планиро-

вания движения низкого уровня. Многочисленные методики планирования шагов [3], [4], ориентации стоп и корпуса [5], методы планирования движения при ударе или потере вертикальной устойчивости, различные виды формулировки предиктивного управления и многое другое – все это составляет подходы к решению указанной подзадачи. При этом подзадача планирования движения высокого уровня остается затронутой лишь в небольшом числе работ [6]. Причиной того является новизна предмета исследований – решать задачу планирования движения высокого уровня не представляло инженерного смысла до того, как было разработано робастное планирование движения низкого уровня [7]. Кроме того, сама концепция разделения планирования движения на уровни не является очевидной, скрывающая пробелы исследований в данной научной области.

Цель данной статьи – заполнить информационные пробелы в указанной области, показав актуальное состояние исследований.

Вероятностные методы планирования траекторий

Вероятностные методы планирования траекторий в дискретном пространстве в робототехнике включают в себя две главные категории: планировщик многократных и единичных запросов. Планировщики множественных запросов создают многоразовую дорожную карту, учитывающую множество начальных и целевых состояний, в то время как планировщики одиночных запросов решают конкретные задачи с одним начальным и целевым состоянием.

К числу основных методов относятся метод вероятностной дорожной карты (ВДК) и его асимптотически оптимальный аналог ВДК*, который строит дорожные карты путем случайной выборки узлов и их соединения. Планировщики с одиночным запросом, такие как метод быстрого изучения случайных деревьев и его модифицированная версия, выполняют выборку состояний и итеративно строят деревья, избегая коллизий и ограничений [8]. В практических многомерных робототехнических системах распространенной стратегией является интеграция планировщиков на основе выборки в иерархическую структуру, объединяющую глобальный и локальный уровни планирования [9].

Алгоритмы на основе выборки обычно используют для планирования в реальном времени в сложных, многомерных пространствах. Однако недостаточная выборка может привести к неоптимальным траекториям или даже к невозможности найти выполнимый путь в сложных условиях [10].

Методы на основе графов

Планирование траектории на основе графов является одним из фундаментальных подходов, используемых для навигации шагающих роботов, особенно в сложных средах. Данный метод предполагает представление окружения робота в виде графа, в котором узлы являются ключевыми позициями или конфигурациями, а ребра определяют возможные связи между этими точками [11].

В [3] авторы подчеркивают необходимость расширения возможностей автономной навигации для гуманоидных роботов (в частности, выбора положения ног для обхода препятствий при ходьбе). Для решения данной проблемы авторы разработали планировщик шагов для ро-

бота *Honda ASIMO*. При планировании использовался алгоритм поиска A^* . Этот метод определяет серию положений шагов в зависимости от текущего состояния робота для навигации к заданной цели, избегая при этом препятствий. Авторы [12] предлагают новый подход к планированию траектории движения в сложных подземных условиях, объединяющий воздушных и шагающих роботов. Их работа подчеркивает важность таких свойств планирования пути на основе графов, как адаптивность в рамках применения шагающих роботов для исследования подземных пространств.

Алгоритмы на основе графов эффективны для получения оптимального пути в двумерных пространствах с большим количеством препятствий. С другой стороны, они могут оказаться непригодными для сред со сложной геометрией или с препятствиями неправильной формы [2], [11]. Подход на основе теории графов для планирования траектории обычно требует большой вычислительной мощности [13].

Методы на основе вариационного исчисления

Вариационное исчисление – это численный метод, основанный на итерации кусочно-линейной аппроксимации траектории движения точки в обход препятствия средствами аналитической геометрии [13], [14]. В случае пересечения траектории с препятствием производится введение дополнительного промежуточного состояния путем смещения наихудшей точки траектории по направлению от центра препятствия. В [13] был проведен анализ гибкости метода, в результате которого было показано, что данный метод может быть использован для генерации траектории движения с различным количеством промежуточных точек, что при дальнейшем развитии метода позволит проводить оптимизацию планирования траектории по различным критериям.

В статье [15] автор разделяет планирование на три этапа и решает три вариационные подзадачи с граничными условиями. Важно отметить, что предложенный метод демонстрирует меньшую вычислительную сложность по сравнению с методами, основанными на графах. Однако следует отметить, что данный метод оптимально применим только для управления шагающим роботом в среде с препятствиями, удаленными друг от друга.

Методы на основе искусственных нейронных сетей

Парадигма искусственных нейронных сетей (ИНС) представляет собой вычислительную структуру, вдохновленную сложными нейронными структурами, наблюдаемыми в биологических организмах [16]. Выбор графовых сверточных нейронных сетей (ГСНС) в [17] обусловлен их явными преимуществами при работе с данными в виде графов, которые описывают маневренные или внедорожные навигационные сценарии. Методы, основанные на глубоком обучении с подкреплением, позволяют роботам обучаться и принимать решения автономно, взаимодействуя с окружающей средой, что очень важно для сценариев с динамическими изменениями и отсутствием предварительных знаний об окружающей среде [18].

Несмотря на свои вычислительные возможности, ИНС не лишены недостатков. Одним из существенных ограничений является их зависимость от предыдущих данных при обучении, поэтому вариации в обучающих данных могут приводить к вариациям в производительности. Такая зависимость от данных может создавать проблемы при использовании робота в меняющихся условиях [19].

Кроме того, шагающие роботы часто работают в условиях, где возможность работать на разных поверхностях имеет важное значение. ИНС не могут гарантировать траекторию движения при любых условиях из-за варьирования точности обучения и зависимости от выборки данных [20]. Поэтому, несмотря на большие перспективы ИНС, тщательный учет их ограничений имеет первостепенное значение для поиска эффективных решений по планированию траектории движения для шагающих роботов в сложных и динамичных средах.

Алгоритмы на основе оптимизации

Оптимальное управление – это область исследований, направленная на поиск оптимальных управляющих входов для динамической системы с целью минимизации заданной целевой функции [21].

Одним из подходов оптимального управления является постановка задачи с помощью дифференциальных уравнений в частных производных и численной оптимизации, например, постановка уравнения Гамильтона – Якоби – Беллмана, в котором учитывается целевая функция [22]. Однако следует отметить, что эти алгоритмы, как правило, с трудом справляются

с ограничениями в виде разрывов или при инициализации вдали от оптимального решения [23].

Другим направлением в данной области стало использование алгоритмического дифференцирования с синтаксисом, напоминающим синтаксис системы компьютерной алгебры (CAS). CAS демонстрирует отличную масштабируемость при решении задач повышенной размерности и задач с начальными значениями в обыкновенных дифференциальных или дифференциально-алгебраических уравнениях [24]. Однако это не относится к невыпуклой оптимизации в общем случае, где нахождение глобально оптимального решения является гораздо более сложной задачей и не может быть гарантировано [25].

В [26] авторы предложили новую методику онлайн-планирования движения для четвероногих роботов, позволяющую им выполнять динамические походки с плавными переходами. Метод предполагает использование последовательного квадратичного программирования (SQP) в рамках решения нелинейных ограничений в точке нулевого момента (ZMP) при оптимизации планирования движения и опоры. Хотя SQP способны быстро находить локально оптимальное решение, их основной недостаток заключается в том, что они могут застрять в локальных минимумах, далеких от глобального оптимума [27].

Оптимальное планирование на основе смешанно-целочисленной оптимизации

С течением времени методы оптимального управления развивались и расширялись, что привело к появлению смешанно-целочисленного программирования (MIP) как мощного инструмента для решения сложных задач оптимального управления [28]. Многие исследователи применяют MIP для решения задач робототехники, включая планирование траектории движения и шагающих роботов [4].

Целочисленные переменные вносят невыпуклость в оптимизационные задачи. Преимущество смешанно-целочисленных задач состоит в том, что они имеют выпуклую подструктуру, т. е. выпуклые задачи возникают, когда целочисленным переменным разрешается принимать вещественные значения. Такие выпуклые релаксации лежат в основе большинства конкурентоспособных алгоритмов смешанно-целочисленной оптимизации. MIP позволяет интегрировать дискретные решения, такие как

выбор подходящего места для постановки шага или переключение между различными походками, в непрерывную оптимизационную задачу. В [4] авторы использовали *MIP* для оптимизации расположения шагов с учетом невыпуклых ограничений. Для определения ориентации шагов тригонометрические функции были аппроксимированы кусочно-линейными функциями, что позволило получить непрерывное представление.

Недостатком подхода *MIP* может являться проблема высокой размерности задачи, но одним из потенциальных решений может быть инициализация алгоритма методами декомпозиции, кластеризации и скользящего горизонта [29]. Аналогично, распространенной тактикой является использование низкоразмерной модели робота (например, четвероногого с ограниченной левой и правой ногами). Этот метод позволяет повысить эффективность вычислений без ущерба для способности робота двигаться в плоскости сагиттального сечения [30, 31].

Заключение

Данный обзор охватывает разнообразные методологии и подходы в области планирования траекторий для шагающих роботов. Планирование движения шагающих роботов представляет собой сложную область, которая включает в себя широкий спектр стратегий и методов. Классификация и изучение этих методов позволяют выявить их преимущества и ограничения.

Выбор между алгоритмами на основе выборки и *MIP*-алгоритмами зависит от конкретных требований задачи, таких как размерность пространства поиска, необходимость гарантии оптимальности, доступные вычислительные ресурсы и наличие определенных ограничений. Алгоритмы на основе выборки часто применяются для планирования в реальном времени в многомерных пространствах, в то время как *MIP*-алгоритмы предпочтительны в случаях, когда важны гарантии оптимальности, сложные ограничения или явная математическая формулировка.

Методы на основе графов имеют высокую вычислительную сложность и лучше подходят для статических окружающих сред, чем для динамических. Задачи *MIP* не страдают от проблем локальных минимумов, что отличает их от методов, основанных на искусственных нейронных сетях, которые зависят от выборки данных и не гарантируют нахождение глобаль-

ного оптимума. Алгоритмы, основанные на смешанных целочисленных вычислениях, обладают большей гибкостью и могут применяться в различных условиях по сравнению с методами вариационного исчисления.

В заключение непрерывное развитие методик планирования траекторий обещает дальнейшее расширение возможностей шагающих роботов, и глубокое понимание этих методов будет играть ключевую роль в развитии технологии шагающих роботов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cononovici, S. B. An approach to walking robots planning and control / S. B. Cononovici, A. Curaj // Proc. of the Romanian Acad., Ser. A. – 2010. – Vol. 11. – Pp. 75–82.
2. Cupec, R. Step sequence planning for a biped robot by means of a cylindrical shape model and a high-resolution 2.5D map. / R. Cupec, I. Aleksi, G. Schmidt // Robot. and Auton. Syst. – 2011. – Vol. 59. – P. 84.
3. Chestnutt, J. Footstep planning on the honda asimo humanoid. / J. Chestnutt, M. Lau, G. Cheung et al. // Proc. 2005 IEEE Int. Conf. Robot. and Automat. – 2005. – Pp. 629–634.
4. Deits, R. Footstep planning on uneven terrain with mixed-integer convex optimization / R. Deits, R. Tedrake // 2014 IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robots. – 2014. – Pp. 279–286.
5. Kim, J. Y. Walking control algorithm of biped humanoid robot on uneven and inclined floor / J.Y. Kim, I.W. Park, J.H. Oh // J. Intell. Robot. Syst. – 2007. – Vol. 48. – Pp. 457–484.
6. Lin, C. Formulation and optimization of cubic polynomial joint trajectories for industrial robots / C. Lin, P. Chang, J. Luh // IEEE Trans. on Autom. Control. – 1983. – Vol. 28. – Pp. 1066–1074.
7. Kagami, S. Humanoid HRP2-DHRC for Autonomous and Interactive Behavior / S. Kagami, K. Nishiwaki, J. Kuffner, et al. // Robot. Research. Springer Tracts in Advanced Robot. – 2007. – Vol. 28. – Pp. 103–117.
8. Liu, L. Path planning techniques for mobile robots: Review and prospect / L. Liu, X. Wang, X. Yang, et al. // Expert Syst. with Appl. – 2023. – Vol. 227. – P. 120254.
9. Reid, W. Sampling-based hierarchical motion planning for a reconfigurable wheel-on-leg planetary analogue exploration rover / W. Reid, R. Fitch, A. H. Göktoğan, et al. // J. of Field Robot. – 2020. – Vol. 37. – № 5. – Pp. 786–811.
10. Karaman, S. Sampling-based algorithms for optimal motion planning / S. Karaman, E. Frazzoli // Int. J. Robot. Res. – 2011. – Vol. 30. – № 7. – Pp. 846–894.
11. Karur, K. A Survey of Path Planning Algorithms for Mobile Robots / K. Karur, N. Sharma, C. Dharmatti, et al. // Vehicles. – 2021. – Vol. 3. – № 3. – Pp. 448–468.
12. Dang, T. Graph-based subterranean exploration path planning using aerial and legged robots / T. Dang, M. Tranzatto, S. Khattak, et al // J. of Field Robot. – 2020. – Vol. 37. – № 8. – Pp. 1363–1388.
13. Метод планирования траектории движения точки в пространстве с препятствием на основе итеративной кусочно-линейной аппроксимации / В. О. Антонов, М. М. Гурчинский, В. И. Петренко, Ф. Б. Тебуева // Системы управления, связи и безопасности. – 2018. – № 1. – С. 168–182.
14. Малолетов, А. В. Оптимизация структуры, параметров и режимов движения шагающих машин со сдвоен-

ными движителями : Монография / А. В. Малолетов, Е. С. Брискин ; ВолГТУ. – Волгоград, 2015. – 175 с.

15. Леонард, А. В. Планирование движения робота с обходом статичного препятствия на основе решения вариационной задачи при заданных начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени / А. В. Леонард // Известия ВолГТУ : научный журнал – № 9 (280) / ВолГТУ. – Волгоград, 2023. – С. 40–46.

16. Yu, J. The path planning of mobile robot by neural networks and hierarchical reinforcement learning / J. Yu, Y. Su, Y. Liao // Frontiers in Neurorobotics. – 2020. – Vol. 14. – № 8. – P. 63.

17. Osanlou, K. Optimal solving of constrained path-planning problems with graph convolutional networks and optimized tree search / K. Osanlou, A. Bursuc, C. Guettier, et al. // 2019 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Syst. (IROS). – 2019. – Pp. 3519–3525.

18. Sun, H. Motion planning for mobile robots – focusing on deep reinforcement learning : A systematic review / H. Sun, W. Zhang, R. Yu, et al. // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – Pp. 69 061–69 081.

19. Liu, C. Neural Networks Trained via Reinforcement Learning Stabilize Walking of a Three-Dimensional Biped Model With Exoskeleton Applications. / C. Liu, M. L. Audu, R.J. Triolo, et al. // Front. Robot. – 2021. – Vol. 8.

20. Савин, С. И. Использование нейронных сетей для прогнозирования нормальных реакций шагающего робота / С. И. Савин, Л. Ю. Ворочаева // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2019. – Том 23. – № 4. – С. 8–18.

21. Sethi S. P. What is optimal control theory? / S. P. Sethi // Springer – 2019.

22. Sánchez-Ibáñez, J.R. Path Planning for Autonomous Mobile Robots: A Review. / J. R. Sánchez-Ibáñez, C. J. Pérez-

del-Pulgar, A. García-Cerezo // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – № 23. – P. 7898.

23. Carius, J. Trajectory optimization for legged robots with slipping motions / J. Carius, R. Ranftl, V. Koltun, et al. // IEEE Robot. and Automat. Lett. – 2019. – Vol. 4. – № 3. – Pp. 3013–3020.

24. Andersson, J. A. Casadi: a software framework for nonlinear optimization and optimal control / J. A. Andersson, J. Gillis, G. Horn, et al. // Math. Program. Computation. – 2019. – Vol. 11. – Pp. 1–36.

25. Lubin, M. Mixed-integer convex optimization: outer approximation algorithms and modeling power / M. Lubin // Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2017.

26. Bellicoso, C. D. Dynamic locomotion through online nonlinear motion optimization for quadrupedal robots / C. D. Bellicoso, F. Jenelten, C. Gehring, et al. // IEEE Robot. and Automat. Lett. – 2018. – Vol. 3. – № 3. – Pp. 2261–2268.

27. Gilpin, Y. A smooth robustness measure of signal temporal logic for symbolic control / Y. Gilpin, V. Kurtz, H. Lin // IEEE Control Syst. Lett. – 2020. – Vol. 5. – № 1. – Pp. 241–246.

28. Diehl, M. Numerical optimal control / M. Diehl, S. Gros // Optim. in Eng. Center (OPTEC). – 2011.

29. Urbanucci, L. Limits and potentials of mixed integer linear programming methods for optimization of polygeneration energy systems / L. Urbanucci // Energy Procedia. – 2018. – Vol. 148. – Pp. 1199–1205.

30. Nguyen, Q. Optimized jumping on the mit cheetah 3 robot / Q. Nguyen, M. J. Powell, B. Katz, et al. // 2019 Int. Conf. on Robot. and Automat. (ICRA). – 2019. – Pp. 7448–7454.

31. Kim, D. Vision aided dynamic exploration of unstructured terrain with a small-scale quadruped robot / D. Kim, D. Carballo, J. Di Carlo, et al. // 2020 IEEE Int. Conf. on Robot. and Automat. (ICRA). – 2020. – Pp. 2464–2470.