Научная статья
Original article
УДК 623.726
DOI 10.55186/26584964_2022_5_6_30

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЙ МОБИЛЬНОГО РОБОТА В ИЗВЕСТНОЙ СРЕДЕ

STUDY OF THE MOTION PLANNING METHOD FOR A MOBILE ROBOT IN A KNOWN ENVIRONMENT

Орехов Сергей Юрьевич, Старший преподаватель; КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана, E-mail: serg31057@mail.ru;

Багдошвили Роман Александрович, студент, КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана**,** E-mail: bagro02@mail.ru

Копылов Владислав Олегович, студент, КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана, E-mail: vladikkopylov31@gmail.com

Orekhov Sergey Yurievich, Senior Lecturer; KF MSTU im. N. E. Bauman, E-mail: serg31057@mail.ru;

Bagdoshvili Roman Alexandrovich, student, KF MSTU. N. E. Bauman, E-mail: bagro02@mail.ru

Kopylov Vladislav Olegovich, student, KF MSTU. N. E. Bauman, E-mail: vladikkopylov31@gmail.com

Аннотация. Проведя оценку тенденций развития робототехники, можно говорить о расширении областей применения роботов, с усложнением выполняемых ими задач, и о связанной с этим активизации работ,

направленных на придание роботам способности адаптировать поведение к условиям выполнения работ. При разработке подобных робототехнических систем возникает необходимость исследований теоретических и алгоритмических основ систем планирования и систем управления движением роботов. Цель настоящей работы состоит в исследовании алгоритма планирования маршрута мобильного робота, в априорно известной среде, на основе метода декомпозиции задачи на планирование пути в пространстве конфигураций и затем траектории вдоль полученного пути.

Annotation. After assessing the trends in the development of robotics, we can talk about expanding the scope of robots, with the complexity of the tasks they perform, and the associated intensification of work aimed at giving robots the ability to adapt behavior to the conditions of work. When developing such robotic systems, it becomes necessary to study the theoretical and algorithmic foundations of planning systems and robot motion control systems. The purpose of this work is to study the route planning algorithm for a mobile robot, in an a priori known environment, based on the method of decomposition of the problem into path planning in the configuration space and then the trajectory along the resulting path.

Ключевые слова: Мобильные роботы, мобильные платформы, планирование движений.

Key words: Mobile robots, mobile platforms, motion planning.

Исследования возникающих при этом научных задач активно проводились и ведутся в России, и за рубежом [1-2]. Вместе с тем, требование качественного скачка в процессах роботизации производства и непромышленной сферы выдвигает целый ряд сложных теоретических и практических проблем, многие из которых еще ждут научно обоснованных решений. К их числу относится рассматриваемая в настоящей работе и имеющая важное прикладное значение задача планирования движения мобильного робота в заведомо известной среде на основе локальной сенсорной информации. Эта задача включает в основном три аспекта. Во-

первых, спланированный путь должен пролегать от заданной начальной точки к заданной конечной точке. Во-вторых, этот путь должен обеспечивать движение робота с обходом возможных препятствий. В-третьих, путь должен среди всех возможных путей, удовлетворяющих первым двум требованиям, быть в определенном смысле оптимальным[3].

Традиционно планирование движений робота осуществляется в пространстве конфигураций, каждая точка которого определяет местонахождение и ориентацию робота [4-5].

В робототехнике принятые решения в конечном итоге воплощаются в движениях исполнительных механизмов. Рассматриваемая в данной работе задача планирования движения состоит в разработке маршрута для доставки робота в заданную целевую позицию.

В литературе по робототехническому планированию пути рассматривается широкий набор различных методов, специально предназначенных для поиска путей в непрерывных пространствах с большим количеством измерений. Классификация методов планирования пути приведена в Таблице 1. Основные семейства применяемых при этом подходов известны под названиями декомпозиции ячеек и скелетирования [6]. В каждом из этих подходов задача планирования непрерывного пути сводится к задаче поиска в дискретном графе на основе выявления некоторых канонических состояний и путей в свободном пространстве. У разных исследователей варьируются формы графов и алгоритмы нахождения исходного графа. При известном аналитическом описании препятствий траекторию ищут из решения некоторой оптимизационной задачи.

Таблица 1 Методы планирования пути

Методы	**Реальное время**	**Тип окружающей среды**	**Характер пути**
На основе графа или дерева	Хорошо	Статический	Негладкий
На основе клеточной декомпозиции	Хорошо	Статический	Негладкий
Метод потенциальных полей	Лучше	Динамический	Гладкий

Оптимизационный метод	Хорошо	Динамический	Гладкий
Интеллектуальный метод	Плохо	Статический	Негладкий

В данной работе для планирования движений мобильного робота в известной среде с препятствиями будет использоваться метод на основе графов. Также будет рассмотрен метод на основе оптимизации пройденного пути с использованием пакета MatlabOptimizationToolbox[7],[8],[9].

Математическое представление среды робота

Предполагается, что мобильный робот движется в 2Dплоскости, определяем ее как Oxy. Препятствия аппроксимируются окружностями заданного радиуса и считаются неподвижными. Поэтому модель проблемной среды робота в произвольный момент времени включает:

1. Начальное положение робота (его характерной точки) на плоскости определяется координатами x_0, y_0 и курсорным углом θ_0.

2. Текущее положение робота (его характерной точки) на плоскости определяется координатами x, y и курсорным углом θ.

2. Цель (желаемое положение робота) определяется координатами x_f, y_f и курсорным углом θ_f.

3. Препятствие (аппроксимируется окружностью) определяется координатамиx_C, y_C центра окружности и радиусом окружности r_C. Препятствий может быть несколько.

Пример математического представления среды, в которой функционирует робот, приведен на рисунке 1 (препятствия показаны как окружности красного цвета, даны начальное и желаемое положения робота).

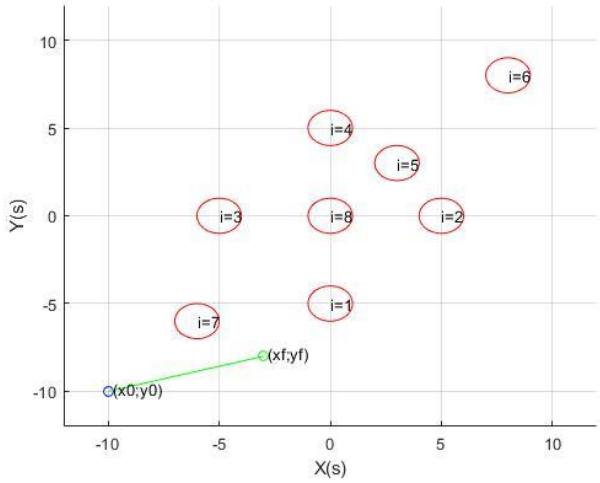


Рисунок 1 – Пример математического представления среды

Метод на основе декомпозиции задачи на планирование пути и траектории

Задача планирования движений для мобильного робота может быть разбита на две подзадачи. Первая задача это планирование геометрического пути, вторая – планирование движений вдоль полученного пути. Для одной и той же траектории можно получить одинаковый путь, но с разными скоростями. Данная задача актуальна, так ее можно применить к различным типам роботом, с разными конструкционными решениями. Однако, если мобильный робот подвергается неголономным ограничениям, то планирование геометрического пути становится сложнее, чем с манипуляторами. Помимо граничных условий (интерполяции из заданных точек и непрерывности желаемой степени полинома) путь должен также удовлетворять неголономным ограничениям во всех точках.

Предположим, что нужно спланировать траекторию$q\ (t)$для t ∈ [t_i, t_f], которая приводит мобильный робот от начальной конфигурации q (t_i) = q_i до конечной конфигурации q (t_f) = q_f при отсутствии препятствий. Траектория q (t) может быть нарушена вниз по геометрическому пути $q\ (s)$, где $dq\ (s)/ds = 0$ для любого значения s, и закон синхронизации $s = s\ (t)$, с параметром s, изменяющимся между $s(t_i) = s_i$ и $s\ (t_f) = s_f$ монотонно, т. е. с $\dot{s}(t) \geq 0$ для $t \in [t_i, t_f]$. Возможно выбор для s – длина дуги вдоль пути; в этом случае это будет $s_i = 0$ и $s_f = L$, где L – длина пути.

Вышеупомянутое разделение пространства и времени подразумевает, дифференцирование по s.

$$\dot{q} = \frac{dq}{dt} = \frac{dq}{ds}\dot{s} = q'\dot{s} \tag{1}$$

Неголономные ограничения могут быть переписаны как:

$$A(q)\dot{q} = A(q)q'\dot{s} = 0 \tag{2}$$

$$A(q)q' = 0 \tag{3}$$

Это условие, которое должно быть проверено во всех точках касательным вектором на конфигурация пространства пути, характеризует понятие допустимости геометрического пути вызванный кинематическим ограничением, которое фактически влияет на обобщенные скорости. Геометрически допустимые пути могут быть определены как решение нелинейной системы

$$q' = G(q)\tilde{u} \tag{4}$$

где u – вектор геометрических входов, который связан с входами скорости u по соотношению $u\ (t) = u\ (s) \cdot s\ (t)$. Как только геометрические входы u(s) назначенные для $s \in [s_i, s_f]$, то сразу определяется путь робота в конфигурационном пространстве Тогда выбор временного закона $s = s\ (t)$ для $t \in [ti, tf]$ будет определять конкретную траекторию на этом пути[10],[11].

Например, в случае двухколесного мобильного робота с кинематикой, подобной одноколесному велосипеду, ограничение влечет за собой следующее условие допустимости пути:

$$[\sin\theta \ -\cos\theta \ \ 0]q' = x'\sin\theta - y'\cos\theta = 0 \tag{5}$$

Оно выражает тот факт, что касательная к декартовой траектории должна быть выровнена по сагиттальной оси робота. Геометрически допустимые пути робота является решение системы:

$$\begin{aligned} x' &= \tilde{v}\cos\theta \\ y' &= \tilde{v}\sin\theta \\ \theta' &= \tilde{\omega} \end{aligned} \tag{6}$$

где линейные и угловые скорости связаны:

$$v(t) = \tilde{v}(s)\dot{s}(t)$$
$$\omega(t) = \tilde{\omega}(s)\dot{s}(t) \quad (7)$$

Проблема может быть решена путем интерполяции начальных значений x_i,y_i и конечных x_f,y_f.$S_i=0$ и $S_f=1$, можно использовать следующие полиномы:

$$x(s) = s^3 x_f - (s-1)^3 x_i + \alpha_x s^2(s-1) + \beta_x s(s-1)^2$$
$$y(s) = s^3 y_f - (s-1)^3 y_i + \alpha_y s^2(s-1) + \beta_y s(s-1)^2 \quad (8)$$

которые автоматически удовлетворяют граничным условиям на x и y. Ориентация в каждой точке, связанной с координатами x и y необходимо наложить дополнительные граничные условия

$$x'(0) = k_i \cos\theta_i \quad x'(1) = k_f \cos\theta_f$$
$$y'(0) = k_i \sin\theta_i \quad y'(1) = k_f \sin\theta_f \quad (9)$$

где $k_i = 0$, $k_f = 0$ – свободные параметры, которые, должны иметь одинаковый знак. Это условие необходимо для гарантии того, робот прибывает в конфигурацию q_f с тем же типом движения (вперед или назад), с которым он покидает конфигурацию q_i;

$$\begin{bmatrix}\alpha_x \\ \alpha_y\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}k\cos\theta_f - 3x_f \\ k\sin\theta_f - 3y_f\end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix}\beta_x \\ \beta_y\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}k\cos\theta_i + 3x_i \\ k\sin\theta_i + 3y_i\end{bmatrix} \quad (10)$$

Коэффициент k влияет на точность получения траектории.

$$\tilde{v}(0) = k_i \quad \tilde{v}(1) = k_f \quad (11)$$

Для иллюстрации рассмотрим численные методы планирования, описанные выше (см. рисунки 2-4).

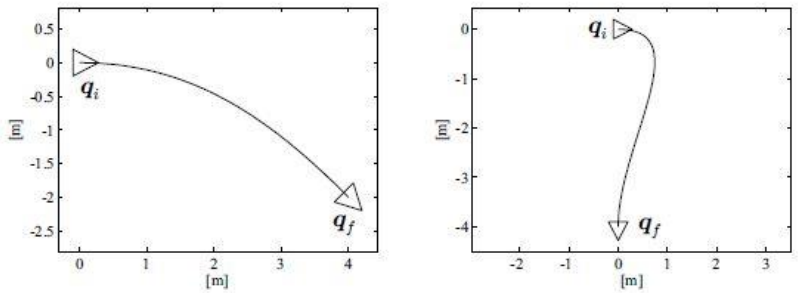


Рисунок 2 – Два парковочных маневра планируются с помощью кубических полиномов; в обоих случаях использовался коэффициент k = 5

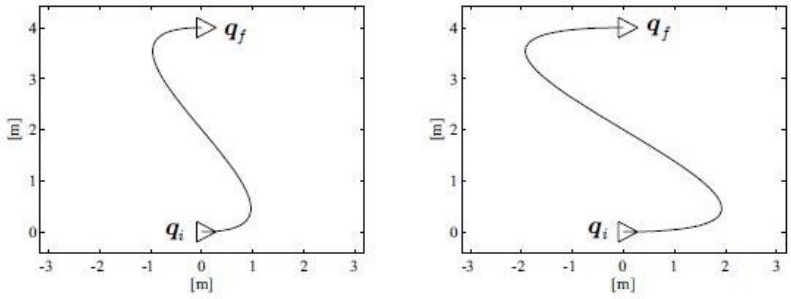


Рисунок 3 – Планирование параллельного парковочного маневра с помощью кубических полиномов; слева: k = 10, справа: k = 20

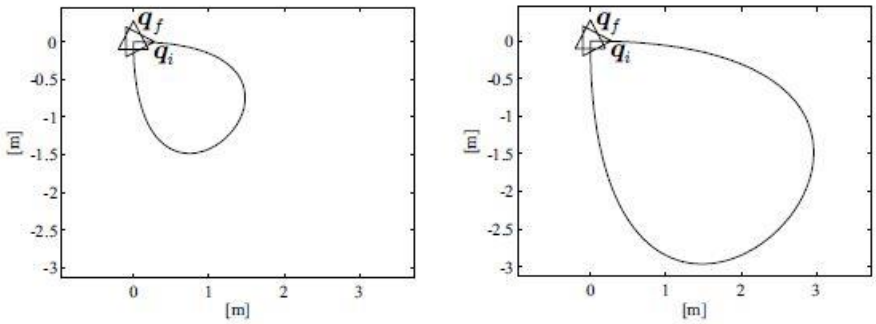


Рисунок 4 – Маневр с переориентацией с помощью кубических декартовых полиномов; слева: k = 10, справа: k = 20

Для того чтобы получить изменения координат и скоростей во времени, при заданном изменении переменной$s(t)$, требуется найти частные производные координат (скоростей) от переменной s. Для (1.3.8) получим:

$$\begin{aligned} x'(s) &= 3s^2 x_f - 3(s-1)^2 x_i + \alpha_x(3s^2-2s) + \beta_x(3s^2-4s+1) \\ y'(s) &= 3s^2 y_f - 3(s-1)^2 y_i + \alpha_y(3s^2-2s) + \beta_y(3s^2-4s+1) \end{aligned} \quad (12)$$

Для угловых скоростей, кроме того, требуются вторые частные производные по s:

$$\begin{aligned} x''(s) &= 6s \cdot x_f - 6(s-1)x_i + \alpha_x(6s-2) + \beta_x(6s-4) \\ x''(s) &= 6s \cdot y_f - 6(s-1)y_i + \alpha_y(6s-2) + \beta_y(6s-4) \end{aligned} \quad (3)$$

Линейная и угловая скорости для модели равны

$$\tilde{V}(s) = \pm\sqrt{(x'(s))^2 + (y'(s))^2} \quad (14)$$

$$\tilde{\omega}(s) = \frac{y''(s)x'(s) - x''(s)y'(s)}{(x'(s))^2 + (y'(s))^2} \quad (15)$$

Откуда угловые скорости левого и правого колес

$$\omega_R = \frac{1}{2r} \cdot (2V + \omega d);$$
$$\omega_L = \frac{1}{2r} \cdot (2V - \omega d); \quad (16)$$

где d – диаметр колеса.

Выводы: Как показывает отечественный и зарубежный опыт разработки и использования мобильных роботов, особенно военного и специального назначения, системы дистанционного управления в настоящее время имеют ряд принципиальных недостатков и ограничений [12]. Поэтому дальнейшее развитие мобильной робототехники связано с повышением автономности мобильных роботов.

Для возможности осуществления автоматического выбора рационального поведения или оптимального действия в каждой текущей ситуации, мобильному роботу требуется решать ряд задач: дистанционное определение геометрических характеристик зоны маневрирования; определение текущих координат и ориентации робота; формирование оперативной (локальной) и тактической (глобальной) моделей проблемной среды; планирование целенаправленных траекторий движения на оперативном и тактическом уровнях; отработка планируемых траекторий движения; контроль и диагностика программно-аппаратных средств СУ и двигательной установки.

В данной работе рассмотрены и решены задачи по разработке алгоритмов планирования движений мобильного робота на плоскости, в среде с препятствиями, при минимальном сенсорном обеспечении. Для решения поставленной задачи был проведен информационный поиск методов решения аналогичных задач в робототехнической литературе. Одним из перспективных поисковых подходов видится метод построения траекторий движений МР на основе метода декомпозиции задачи планирования, который был выбран для исследования и реализации.

В дальнейшем планируется проведение натурной реализации.

Литература

1. Steven M. La Valle. Planning Algorithms. Cambridge University Press, 2005.
2. Каляев И.А., Гайдук А.Р. Однородные нейроподобные структуры в системах выбора действий интеллектуальных роботов. – М.: «Янус-К», 2000. 280 с.
3. Wang Z., Zhang W., Li G., Mu X. G2 path smoothing using non-uniform B-spline. Systems Engineering and E1ectronics, 2011, no. 7, pp. 1539–1543.
4. Walton D. J., Meek D.S., Ali J. M. Planar G2 transition curves composed of cubic Bezier spiral segments. J. of Computational and Applied Mathematics, 2003, vol. 157, no. 2, pp. 453–476.
5. Лю В. Методы планирования пути в среде с препятствиями. Математика и математическое моделирование. 2018, №1, С. 15-58.
6. Рассел С., Норвиг П.. Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд.: Пер. с англ. — М. : Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1408 с.
7. Evgrafov V.V., Pavlovsky V.V., Pavlovsky V.E. Dynamics, control, and simulation of robots with differential drive // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2007. Т. 46. № 5. С. 836-841.
8. Герасимов, В.Н. К вопросу управления движением мобильного робота в динамической среде // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 1(2). С. 44-51.
9. Sicilino B., Vilani L. Robotics. Modeling, planning and control. Springer-Verlag London Limited 2010, pp. 476-554.
10. Охоцимский Д. Е., Павловский В. Е. «Проблемы динамики и управления мобильных колесных роботов», материалы научной школы-конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы», М., МГУ, 2005.
11. Павловский В.Е., Евграфов В.В. «Синтез D2 - гладких траекторий для мобильного робота с дифференциальным приводом», материалы

научной школы-конференции«Мобильные роботы и мехатронные системы», М., МГУ, 2004.:

12. Краснощеченко В.И. Нелинейные системы : геометрические методы анализа и синтеза / В.И. Краснощеченко, А.П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. -520 с.

Literature

1. Steven M. La Valle. planning algorithms. Cambridge University Press, 2005.
2. Kalyaev I.A., Gaiduk A.R. Homogeneous neural-like structures in systems for selecting actions of intelligent robots. - M .: "Janus-K", 2000. 280 p.
3. Wang Z., Zhang W., Li G., Mu X. G2 path smoothing using non-uniform B-spline. Systems Engineering and Electronics, 2011, no. 7, pp. 1539–1543
4. Walton D. J., Meek D.S., Ali J. M. Planar G2 transition curves composed of cubic Bezier spiral segments. J. of Computational and Applied Mathematics, 2003, vol. 157, no. 2, pp. 453–476.
5. Liu V. Methods of path planning in an environment with obstacles. Mathematics and mathematical modeling. 2018, No. 1, pp. 15-58.
6. Russell S., Norvig P. Artificial intelligence: a modern approach, 2nd ed.: Per. from English. - M .: Publishing house "Williams", 2006. - 1408 p.
7. Evgrafov V.V., Pavlovsky V.V., Pavlovsky V.E. Dynamics, control, and simulation of robots with differential drive // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2007. V. 46. No. 5. S. 836-841.
8. Gerasimov, V.N. On the issue of motion control of a mobile robot in a dynamic environment // Robotics and technical cybernetics. 2014. No. 1(2). pp. 44-51.
9. Sicilino B., Vilani L. Robotics. Modeling, planning and control. Springer-Verlag London Limited 2010, pp. 476-554.
10. Okhotsimsky D. E., Pavlovsky V. E. “Problems of dynamics and control of mobile wheeled robots”, materials of the scientific school-conference “Mobile robots and mechatronic systems”, Moscow, Moscow State University, 2005.

11. Pavlovsky V.E., Evgrafov V.V. "Synthesis of D2 - smooth trajectories for a mobile robot with a differential drive", materials of the scientific school-conference "Mobile robots and mechatronic systems", M., Moscow State University, 2004 .:
12. Krasnoshchechenko V.I. Nonlinear systems: geometric methods of analysis and synthesis / V.I. Krasnoshchechenko, A.P. Krishchenko. - M .: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 2005. -520 p.

© Орехов С. Ю., Багдошвили Р. А., Копылов В. О. , 2022 Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №6/2022

Для цитирования: Орехов С. Ю., Багдошвили Р. А., Копылов В. О. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЙ МОБИЛЬНОГО РОБОТА В ИЗВЕСТНОЙ СРЕДЕ // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №6/2022