

СТРАТЕГИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

Кожин М.А.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

Ключевые слова: стратегия потенциального управления, мобильные роботы, динамическая среда, методы потенциальных полей, задача обхода препятствий.

Аннотация. Рассматривается задача управления мобильным роботом в частично известной динамической среде. Предлагается стратегия управления потенциального управления движением робота с обходом препятствий на основе модифицированного метода жука. Представлены результаты компьютерной апробации метода в среде моделирования CoppeliaSim на языке Python.

STRATEGY FOR POTENTIAL CONTROL OF A MOBILE ROBOT IN A DYNAMIC ENVIRONMENT

Kozhin M.A.

Lomonosov Moscow State University, Moscow

Keywords: potential control strategy, mobile robots, dynamic environment, artificial potential fields, obstacle avoidance problem.

Abstract. The problem of controlling a mobile robot in a partially known dynamic environment is considered. A strategy of potential control motion control of a robot with obstacle avoidance based on a modified beetle method is proposed. The results of computer testing of the method in the CoppeliaSim modeling environment in the python language are presented.

Введение

Задача управления движением мобильного робота (МР) является одной из ключевых в современной робототехнике. Существует множество работ по управлению МР в статической среде. Однако часто среда содержит динамические препятствия (ДП). В настоящее время существует ряд подходов к управлению МР в среде с ДП (см., например, [1-8]). При этом одним из активно развивающихся подходов к управлению движением МР в среде с препятствиями являются методы потенциальных полей [9, 10]. Согласно данным методам, предполагается, что цель движения МР имеет некоторый положительный заряд, создающий виртуальные силы «притяжения», а препятствия – отрицательный заряд, создающий виртуальные силы «отталкивания». В результате, в процессе движения МР под действием сил, присущих потенциальным полям, будет притягиваться к цели и отталкиваться от препятствий. Основным недостатком методов потенциальных полей является наличие локальных минимумов, для выхода из которых весьма перспективным является использование модифицированного метода жука, предложенного в работе [9] и получившего развитие в работе [11]. Данный метод объединяет идеи классических методов жука [12] и методов потенциальных полей. В настоящей работе предлагается стратегия потенциального управления МР в динамической среде на основе

модифицированного метода жука, позволяющая роботу избегать столкновений с ДП при движении к целевому состоянию.

Математическая модель динамики МР

Рассматривается двухколесный МР, помещенный в частично известную динамическую среду, который оснащен ультразвуковыми датчиками расстояния, обладающими заданным радиусом видимости препятствий ρ_s .

Динамика МР описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x} = V \cos \theta, \\ \dot{y} = V \sin \theta, \\ \dot{\theta} = \Omega, \\ m\dot{V} = m_p a \Omega^2 + \frac{u_1 + u_2}{R}, \\ J\dot{\Omega} = m_p a \Omega V + u_1 - u_2. \end{cases}$$

Здесь x, y – координаты центра масс робота на плоскости, а θ – угол между направлением его движения и осью Ox ; u_1, u_2 – управляющие переменные, имеющие смысл крутящих моментов, подаваемых на правое и левое колеса робота соответственно; R – радиус колес, V – модуль скорости, m – полная масса робота, Ω – угловая скорость, J – момент инерции робота при вращении вокруг вертикальной оси, проходящей через его центр.

Модифицированный метод жука

Модифицированный метод жука объединяет идеи классических методов жука (*Bug1, Bug2*) [12] методов потенциальных полей [9, 10]:

- в свободном пространстве робот движется к цели по прямой линии;
- скорость движения в каждой точке определяется суперпозицией виртуальных потенциальных полей, создаваемых препятствиями и целью.

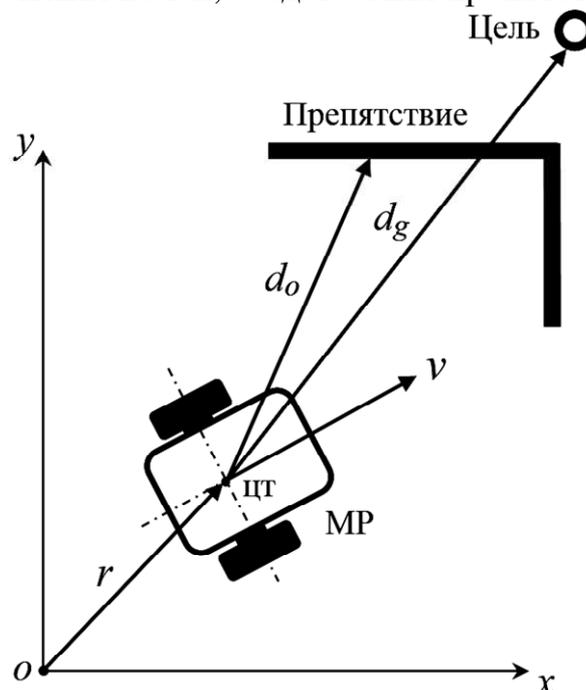


Рис. 1. Пример рабочей среды функционирования МР

Обозначим через \mathbf{r} радиус-вектор робота, который подчиняется следующему уравнению: $\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{k}\mathbf{u}(\mathbf{r})$, а через \mathbf{d}_0 и \mathbf{d}_g – векторы, соединяющие центр тяжести робота с ближайшей точкой препятствия и с целью соответственно (рис. 1).

В модифицированном методе жука выделяются два режима движения МР: режим свободного движения и режим обхода препятствия. Робот начинает обход препятствия, если в радиусе ρ_0^+ от робота найдено препятствие в направлении движения к цели. При этом робот отходит от препятствия в следующих случаях:

- робот приблизился к цели;
- на пути к цели нет препятствий в радиусе ρ_0^- от робота;
- угол между векторами \mathbf{d}_g и \mathbf{d}_0 не острый.

Также МР завершает обход препятствия, если оно не обнаружено в радиусе ρ_0^- .

Виртуальные силы притяжения к цели $\mathbf{F}_{att}(\mathbf{r})$ и отталкивания от препятствий $\mathbf{F}_{rep}(\mathbf{r})$ имеют следующий вид:

$$\mathbf{F}_{att}(\mathbf{r}) = k_a \frac{\mathbf{d}_g(\mathbf{r})}{\|\mathbf{d}_g(\mathbf{r})\|},$$

$$\mathbf{F}_{rep}(\mathbf{r}) = \begin{cases} -k_r \left(\frac{1}{\|\mathbf{d}_0(\mathbf{r})\|} - \frac{1}{\rho_r} \right) \frac{\mathbf{d}_0(\mathbf{r})}{\|\mathbf{d}_0(\mathbf{r})\|^3}, & \|\mathbf{d}_0(\mathbf{r})\| \leq \rho_r, \\ 0, & \|\mathbf{d}_0(\mathbf{r})\| > \rho_r. \end{cases}$$

где k_a, k_r – положительные константы, $\rho_r > 0$ – ширина зоны действия отталкивающей силы.

Виртуальная тангенциальная сила, способствующая обходу препятствий, имеет вид

$$\mathbf{F}_{tan}(\mathbf{r}) = \frac{k_a}{\|\mathbf{d}_0(\mathbf{r})\|} (\pm d_{0_2}, \mp d_{0_1}).$$

Виртуальное поле задается следующим образом:

- в режиме свободного движения: $\mathbf{u}(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{F}_{att}(\mathbf{r})}{\|\mathbf{F}_{att}(\mathbf{r})\|}$;
- в режиме обхода препятствий: $\mathbf{u}(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{F}_{tan}(\mathbf{r}) + \mathbf{F}_{rep}(\mathbf{r})}{\|\mathbf{F}_{tan}(\mathbf{r}) + \mathbf{F}_{rep}(\mathbf{r})\|}$.

Стратегия потенциального управления МР в динамической среде

Выделим два режима движения робота: режим движения робота при отсутствии и при наличии ДП в радиусе видимости.

Режим движения МР при отсутствии ДП в радиусе видимости характеризуется наличием статических препятствий и отсутствием ДП в зоне видимости. В данном режиме робот движется к целевой точке по опорной траектории, рассчитанной на основе модифицированного метода жука.

Режим движения МР при наличии ДП в радиусе видимости характеризуется наличием как статических препятствий, так и ДП в зоне видимости. В данном режиме осуществляется прогноз с глубиной T с. возможности столкновения МР с ДП на основе показаний датчиков расстояния. Здесь движение робота осуществляется в соответствии с алгоритмом упреждающего управления в режиме наличия ДП в радиусе видимости.

Алгоритм упреждающего управления МР в режиме наличия ДП в радиусе видимости

Выделим три ключевых элемента:

- предсказание встречи робота с ДП;
 - выбор точки притяжения робота для исключения встречи с ДП;
 - движение робота с коррекцией опорной траектории для ухода от ДП.
- Обсудим особенности данных элементов алгоритма управления МР.

Предсказание встречи МР с ДП осуществляется с помощью определения скорости ДП v_o на основе показаний датчиков расстояния:

$$v_o = \frac{d_2 - d_1}{\Delta t} + v,$$

где d_1, d_2 – векторы, соединяющие центр МР с ближайшей точкой ДП в моменты времени, разделенные малым Δt , а v – вектор скорости МР (рис. 2).

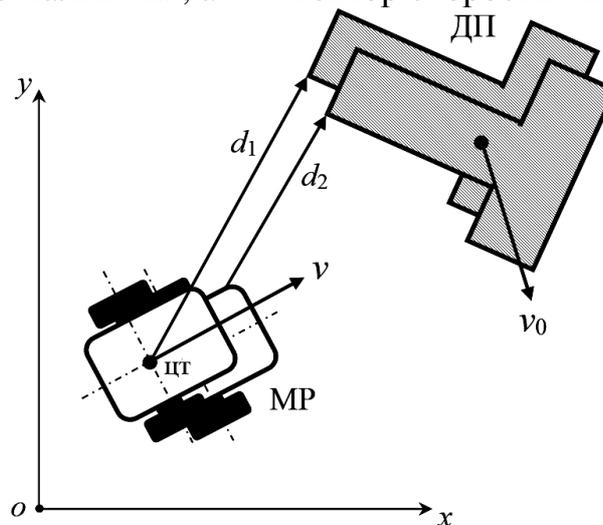


Рис. 2. Пример движения МР и ДП

Встреча считается предсказанной в следующие T с., если $\exists t \in [0, T]$:

$$\|d_2 + (v_o - v)t\| < \rho_s,$$

где ρ_s – минимальная допустимая дистанция от центра робота до ближайшей точки препятствия.

Выбор точки притяжения МР для исключения встречи с ДП осуществляется последовательным выбором точек опорной траектории, начиная с точки, в которой робот ее покинул. Точки выбираются до тех пор, пока каждая следующая точка окажется ближе к роботу, чем предыдущая. Для первой выбранной точки вычисляется и запоминается вектор d_t от центра тяжести робота. Для следующей точки опорной траектории снова вычисляется вектор d'_t

от центра тяжести робота (рис. 3). Если для нее $\|\mathbf{d}'_t\| \leq \|\mathbf{d}_t\|$, то выбираем и запоминаем эту точку $\mathbf{d}_t = \mathbf{d}'_t$. Повторяем до тех пор, пока условие $\|\mathbf{d}'_t\| \leq \|\mathbf{d}_t\|$ ни выполнится. Последняя выбранная точка и будет являться *точкой притяжения МР* при обходе ДП.

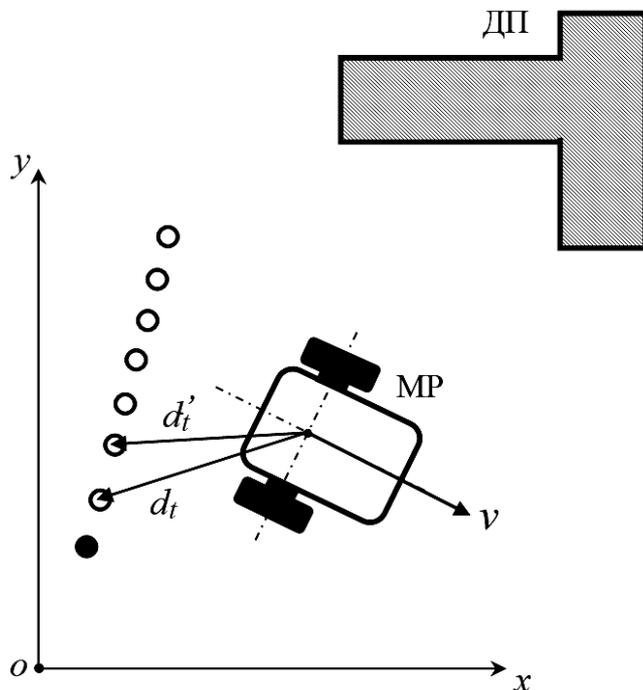


Рис. 3. Сход МР с опорной траектории

Движение МР с коррекцией опорной траектории для ухода от ДП осуществляется с помощью действия на робота виртуальной силы притяжения от выбранной точки притяжения, виртуальных сил отталкивания от препятствий и виртуальной тангенциальной силы, формирующей равнодействующую силу, под действием которой осуществляется движение робота. Выделим условия возникновения виртуальных тангенциальной и отталкивающей сил, приведенных выше.

1. Если выполнено хотя бы одно из следующих условий:

- возможность столкновения предсказана,
- ДП находится в направлении притягивающей точки:

$$\angle(\mathbf{d}_2, \mathbf{d}_t) \in \left[-\frac{\pi}{4}; \frac{\pi}{4} \right],$$

- МР движется от притягивающей точки:

$$\angle(\mathbf{v}, \mathbf{d}_t) \in \left[\frac{\pi}{2}; \frac{3\pi}{2} \right],$$

2. Если выполнено хотя бы одно из следующих условий:

- возможность столкновения предсказана,
- МР движется в направлении статического препятствия:

$$\angle(\mathbf{v}, \mathbf{d}_0) \in \left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2} \right],$$

- статическое препятствие находится в направлении точки притяжения МР и на

пути к ней: $\angle(\mathbf{d}_0, \mathbf{d}_t) \in \left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right]$ и $\|\mathbf{d}_0\| < \|np_{\mathbf{d}_0} \mathbf{d}_t\|$.

Компьютерная апробация движения МР в динамической среде с препятствиями с использованием симулятора CoppeliaSim

С целью исследования эффективности предложенной стратегии потенциального управления МР в динамической среде была создана сцена моделирования его движения в среде симулятора CoppeliaSim. Моделирование производилось для двухколесной динамической модели робота Pioneer3DX с помощью скриптов на языке Python.

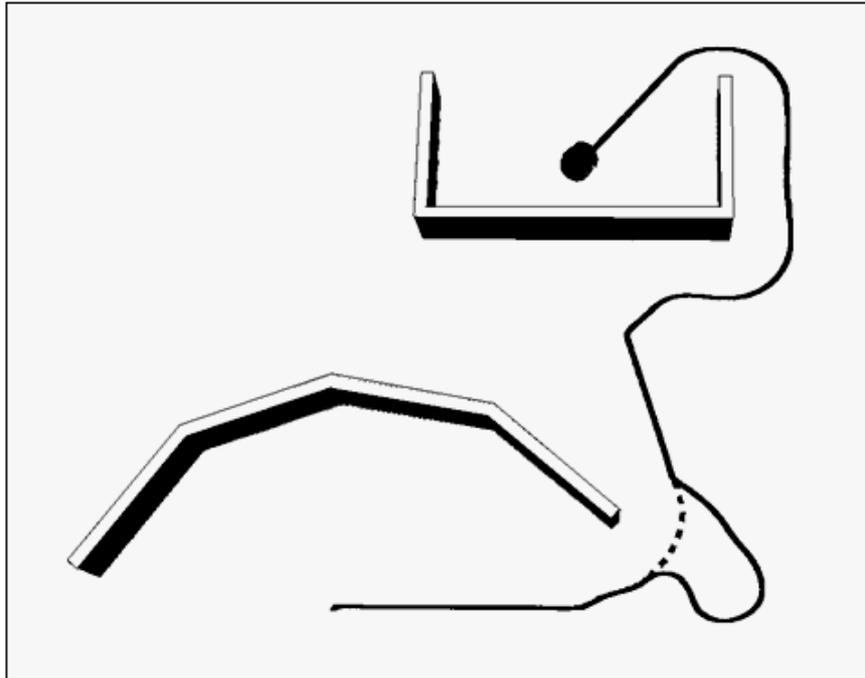


Рис. 4. Скорректированная опорная траектория

На рисунке 4 пунктиром обозначен участок опорной траектории МР, в которой он с нее сошел, а непрерывной линией – его реальная траектория, учитывающая уклонение от ДП.

Список литературы

1. Hao Y.L., Zu W, Zhao Y.X. Real-time obstacle avoidance method based on polar coordination particle swarm optimization in dynamic environment // Proc. of the IEEE international conference on industrial electronics and applications, Harbin, China. 2007, New York: IEEE, pp.1612-1617.
2. Seder M., Petrovic I. Dynamic window based approach to mobile robot motion control in the presence of moving obstacles // Proc. of the 2007 IEEE Internat. Conf. on Robotics & Automation. 2007, pp. 1986-1991.
3. Li G.H., Tong S.G., Cong F.Y., et al. Improved artificial potential field-based simultaneous forward search method for robot path planning in complex environment // Proc. of the IEEE/SICE international symposium on system integration (SII), Nagoya, Japan, 11-13 December 2015, New York: IEEE, pp. 760-765.
4. Lazarowska A. Ship's trajectory planning for collision avoidance at sea based on ant colony optimization // The Journal of Navigation. 2015, 68(2), pp. 291-307.
5. Герасимов В.Н. К вопросу управления движением мобильного робота в динамической среде // Робототехника и техническая кибернетика. – 2014. – №1(2). – С. 44-51.

6. Попов С.Г., Моторин Д.Е. Исследование алгоритмов индивидуальной и групповой стратегий движения автономных мобильных роботов на динамической карте // Информатика, телекоммуникации и управление. – 2016. – №2 (241). – С. 45-57.
7. Алхалили А.С., Лукьянов Е.А. Управление движением колесного мобильного робота на основе имитационного моделирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2022. – №8. – С. 112-121.
8. Яковлев К.С., Белинская Ю.С., Макаров Д.А., Андрейчук А.А. Безопасно-интервальное планирование и метод накрытий для управления движением мобильного робота в среде со статическими и динамическими препятствиями // Автоматика и телемеханика. – 2022. – № 6. – С. 96-117.
9. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Вопросы управления движением мобильных роботов методом потенциального наведения // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20, №11. – С. 677-685.
10. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Конструктивные аспекты метода потенциальных полей в мобильной робототехнике // Автометрия. – 2021. – Т. 57, №4. – С. 45-53.
11. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б., Кожин М.А. Анализ модифицированного метода жука в задачах локальной навигации мобильных роботов // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2021. – №7. – С. 4-8.
12. Ng J., Braunl Th. Performance Comparison of Bug Navigation Algorithms // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2007, vol. 50, iss. 1, pp. 73-84.

Сведения об авторе:

Кожин Михаил Александрович – аспирант.