

## 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  $\rho_s$ .

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  $\theta$  – 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,  $\Omega$  – 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.

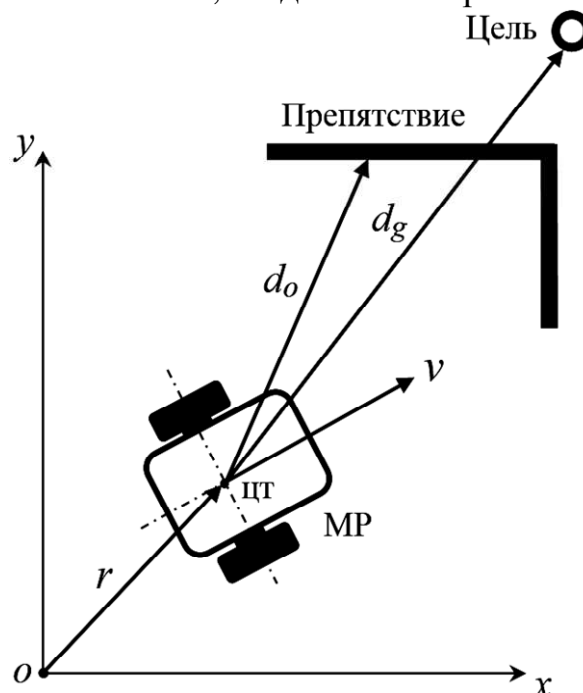


Рис. 1. Пример рабочей среды функционирования МР

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  $\rho_0^+$  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  $\rho_0^-$  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  $\rho_0^-$ .

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  $\Delta t$ , а  $v$  – вектор скорости МР (рис. 2).

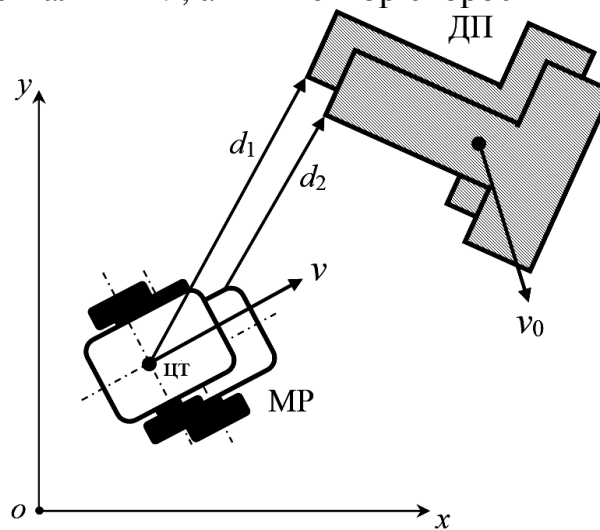


Рис. 2. Пример движения МР и ДП

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

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

где  $\rho_s$  – 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.

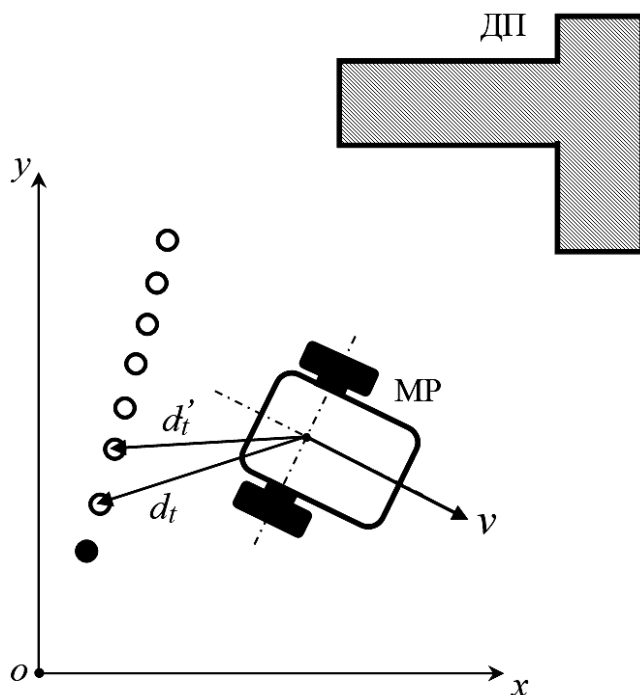


Рис. 3. Сход МР с опорной траектории

**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.

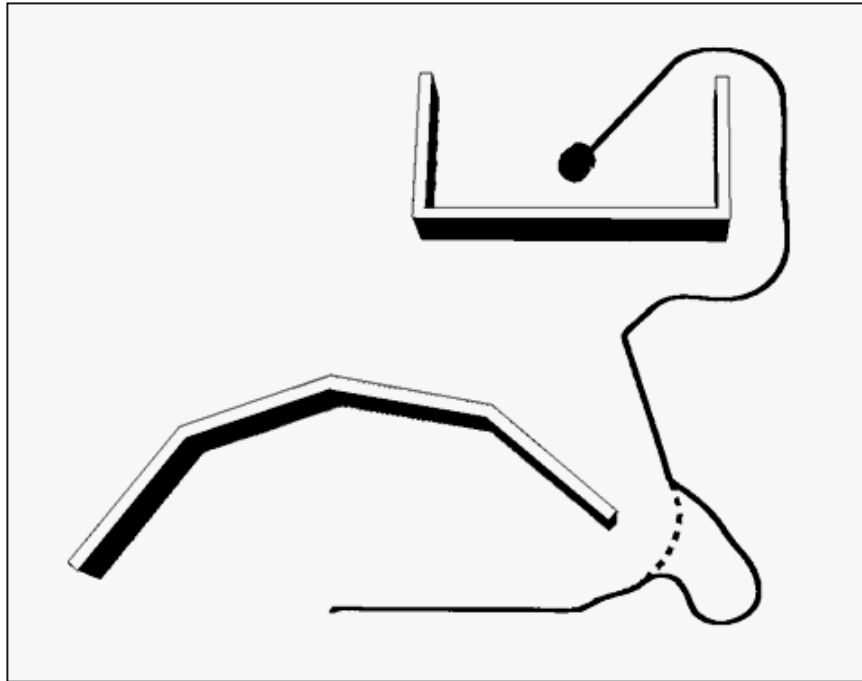


Рис. 4. Скорректированная опорная траектория

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.