

Новый подход к использованию метода потенциальных полей в мобильной робототехнике

А. Б. Филимонов

МИРЭА - Российский технологический университет;
Московский авиационный институт (НИУ)
e-mail: filimon_ab@mail.ru

Н. Б. Филимонов

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова
e-mail: nbfilimonov@mail.ru

Аннотация. В известных работах, посвященных методу потенциальных полей в мобильной робототехнике, ключевое значение придается механизму силового воздействия на движение робота, определяющему закон изменения скорости его движения. В настоящей статье предлагается новая методология использования виртуальных полей: силовой аспект исключается, а линии напряженности создаваемого поля задают лишь желаемые траектории движения робота, причем следование по заданной траектории осуществляется двухконтурной системой управления направлением и скоростью движения робота. Обсуждается вопрос конструирования притягивающего и отталкивающего потенциалов. Приводятся результаты имитационного моделирования траекторного управления движением двухколесного робота.

Ключевые слова: мобильные роботы; искусственные потен-циальные поля; силовые линии поля; траекторное управление

I. ВВЕДЕНИЕ

Одним из широко распространенных в задачах локальной навигации мобильных роботов (МР) является метод виртуальных потенциальных полей (ПП) [1–9]. Идея данного метода состоит в построении виртуального силового поля в рабочем пространстве МР и организации его управляемого движения вдоль силовых линий данного поля. Потенциальная функция поля должна отражать цель движения, а также конфигурацию и форму препятствий.

Виртуальное поле рассчитывается исходя из имеющейся математической модели рабочего пространства МР, отображающей пространственные объекты – их положение и форму. Объекты внешней среды могут служить препятствиями при движении МР к целевому положению.

Для описания виртуальных полей удобно придерживаться аналогии с электростатическими полями. Такое поле создается виртуальными положительными и отрицательными зарядами. Будем считать, что МР приписан положительный заряд. Тогда векторное поле разделяется на две составляющие: цель движения представляется притягивающим векторным полем, в то время как препятствия – отталкивающим полем. Сложение двух полей позволяет решать задачи движения МР к заданной целевой точке и обхода препятствий на маршруте следования.

Пусть задано целевое положение робота

$$P^* : \mathbf{r}^* = (x^*, y^*, z^*) \in D.$$

Помещенный в цель P^* некоторый точечный отрицательный заряд создает притягивающее потенциальное силовое поле $U_{att} = U_{att}(\mathbf{r})$, а привязанные к препятствиям положительные заряды будут создавать отталкивающее поле $U_{rep} = U_{rep}(\mathbf{r})$.

Потенциальное поле $U(\mathbf{r})$ образуется суперпозицией притягивающего и отталкивающего полей:

$$U(\mathbf{r}) = U_{att}(\mathbf{r}) + U_{rep}(\mathbf{r}). \quad (1)$$

Вектор напряженности поля в точке $\mathbf{r} = (x, y, z)$ определяется как антиградиент потенциала:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -\nabla U(\mathbf{r}). \quad (2)$$

Здесь

$$\nabla U = \frac{\partial U}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial U}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial U}{\partial z} \mathbf{k}, \quad \mathbf{E} = E_x \mathbf{i} + E_y \mathbf{j} + E_z \mathbf{k},$$

где \mathbf{i} , \mathbf{j} , \mathbf{k} – орты декартовой системы координат; E_x , E_y , E_z – проекции вектора напряженности на координатные оси.

В соответствии с (1) и (2) напряженность поля также можно разложить на две составляющие – притягивающую и отталкивающую:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_{att}(\mathbf{r}) + \mathbf{E}_{rep}(\mathbf{r}), \quad (3)$$

где

$$\mathbf{E}_{att}(\mathbf{r}) = -\nabla U_{att}(\mathbf{r}), \quad \mathbf{E}_{rep}(\mathbf{r}) = -\nabla U_{rep}(\mathbf{r}).$$

II. КОНСТРУИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ПОЛЯ

В качестве притягивающего потенциала обычно принимают параболическую функцию [10]:

$$U_{att}(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} k_a d(\mathbf{r})^2, \quad (4)$$

где $k_a > 0$ – константа, $d(\mathbf{r})$ – евклидово расстояние МР до цели P^* : $d(\mathbf{r}) = \|\mathbf{r} - \mathbf{r}^*\|$.

Отталкивающий потенциал создается лишь в узкой зоне на границе каждого препятствия, причем он должен быть большим вблизи препятствия и не должен влиять на движение МР вдали от него. Весьма распространен следующий способ задания отталкивающих потенциалов:

$$U_{rep}(\mathbf{r}) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_r \left(\frac{1}{\rho(\mathbf{r})} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2, & \rho(\mathbf{r}) \leq \rho_0; \\ 0, & \rho(\mathbf{r}) > \rho_0, \end{cases} \quad (5)$$

где $k_r > 0$, $\rho(\mathbf{r})$ – расстояние до препятствия, ρ_0 – ширина зоны действия сил отталкивания, именуемая *радиусом безопасности препятствия*. Таким образом, данное поле создает «потенциальный барьер» вокруг препятствия ширины ρ_0 , потенциал в котором неограниченно возрастает при приближении к препятствию.

Рассмотрим один важный аспект традиционного построения ПП [10–14]. Эффект действия отталкивающей компоненты $\mathbf{E}_{rep}(\mathbf{r})$ напряженности поля определяется суммой (3). Однако, слагаемое $\mathbf{E}_{att}(\mathbf{r})$, определяемое притягивающим потенциалом (4), существенно изменяется при приближении к точке P^* . Вследствие этого эффект действия отталкивающего потенциала зависит от места расположения препятствия, для которого он создается. Поэтому более предпочтительным является притягивающий потенциал другого типа:

$$U_{att}(\mathbf{q}) = k_a d(\mathbf{q}).$$

В этом случае имеем вектор напряженности поля

$$\mathbf{E}_{att}(\mathbf{r}) = -k_a \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}^*}{d(\mathbf{r})}, \quad (6)$$

абсолютная величина которого постоянна:

$$\|\mathbf{E}_{att}(\mathbf{r})\| = k_a.$$

В сущности, нас интересует не сам отталкивающий потенциал, а создаваемое им поле напряженности. В связи с этим вместо (5) предлагается использовать отталкивающий потенциал вида

$$U_{rep}(\mathbf{r}) = \begin{cases} k_r [-\ln(\rho(\mathbf{r})/\rho_0) + (\rho(\mathbf{r})/\rho_0) - 1], & \rho(\mathbf{r}) \leq \rho_0; \\ 0, & \rho(\mathbf{r}) > \rho_0. \end{cases}$$

Тогда выражение для величины напряженности поля сильно упрощается:

$$\|\mathbf{E}_{rep}(\mathbf{r})\| = \begin{cases} k_r \left(\frac{1}{\rho(\mathbf{r})} - \frac{1}{\rho_0} \right), & \rho(\mathbf{r}) \leq \rho_0; \\ 0, & \rho(\mathbf{r}) > \rho_0, \end{cases} \quad (7)$$

III. СХЕМА КИНЕМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ

В методе ПП применяют две стратегии управления МР: схемы динамического и кинематического управления роботом [13, 14]. В первой схеме управления поле напряженности определяет вектор линейного ускорения МР в каждой точке РП.

Далее за основу примем вторую, *кинематическую схему управления* МР – в ней линейная скорость движения робота определяется величиной напряженности поля:

$$\dot{\mathbf{r}} = \alpha \mathbf{E}, \quad \alpha = \text{const} > 0.$$

Семейство линий напряженности поля определяется системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx}{E_x} = \frac{dy}{E_y} = \frac{dz}{E_z}. \quad (8)$$

Виртуальное ПП является абстракцией, и поэтому нет необходимости строить его исходя строго из законов электростатики. В сущности, нас интересуют лишь возможность использования силовых линий поля как навигационных ориентиров, указывающих направление движения МР к целевому положению P^* и обеспечивающих безопасный обход препятствий.

В задачах траекторного управления МР необходимо в процессе движения задавать его вектор линейной скорости и ориентацию в пространстве. При формировании траекторий движения МР достаточно ограничиться анализом движения его центра масс, т.е. робот может рассматриваться как материальная точка (МТ).

Утверждение. Пусть движение МТ описывается уравнением

$$\dot{\mathbf{r}} = \alpha(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}), \quad (9)$$

где $t \geq 0$, $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ – векторное поле, а $\alpha(\mathbf{r})$ – непрерывная знакоположительная функция, т.е. $\alpha(\mathbf{r}) > 0$. Тогда траектория ее движения не зависит от вида функции $\alpha(\mathbf{r})$ и совпадает с силовой линией векторного поля $\mathbf{E}(\mathbf{r})$, проходящей через точку $\mathbf{r}(0)$.

Потребуем, чтобы МТ двигалась вдоль линии напряженности поля с постоянной скоростью V^* . Полагая в (9)

$$\alpha(\mathbf{r}) = \frac{V^*}{\|\mathbf{E}(\mathbf{r})\|},$$

получим уравнение движения

$$\dot{\mathbf{r}} = V^* \frac{\mathbf{E}(\mathbf{r})}{\|\mathbf{E}(\mathbf{r})\|}. \quad (10)$$

Согласно утверждению МТ будет двигаться вдоль линии силовой линии электрического поля и вместе с тем

$$\|\dot{\mathbf{r}}\| = V^*.$$

Полученный результат подсказывает следующую стратегию управления МР: мы создаем виртуальное потенциальное поле сил, включающее притягивающую и отталкивающие компоненты, со стоком в целевом положении P^* . Вектор напряженности поля $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ задает направление движения МР. Система управления МР должна обрабатывать уставку скорости

$$V^* = V^* \frac{\mathbf{E}(\mathbf{r})}{\|\mathbf{E}(\mathbf{r})\|}.$$

Таким образом, силовые линии поля определяют желаемые траектории движения МР.

IV. УПРАВЛЕНИЕ ДВУХКОЛЕСНЫМ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

Рассмотрим модельный пример применения метода ПП к задаче управления плоским движением ($D \subseteq \mathbf{R}^2$) двухколесного МР [15]. Полагаем, что робот состоит из абсолютно твердой платформы и соосной колесной системы с дифференциальным приводом (рис. 1).

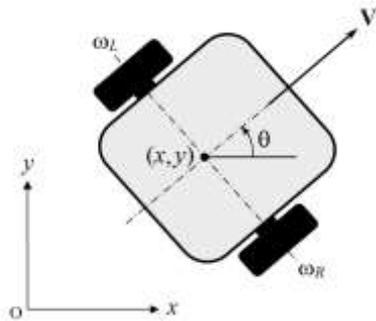


Рис. 1. Колесный робот

Управление МР осуществляется через угловые скорости вращения колес ω_L, ω_R . Предполагается, что колеса находятся в точечном контакте с поверхностью и движутся без проскальзывания.

В качестве переменных состояния МР рассмотрим следующие величины:

- x, y – координаты базовой точки робота (середина оси вращения колес);
- V – модуль вектора скорости базовой точки робота;

- θ – угол между вектором скорости робота и положительным направлением оси Ox (курс);
- $\Omega = \dot{\theta}$ – угловая скорость вращения робота вокруг вертикальной оси.

Ниже приведена модель движения колесной платформы при следующих предположениях: не учитывается динамика приводов колес, а также эффект проскальзывания колес; центр масс платформы лежит на прямой, являющейся вертикальной осью симметрии шасси [15]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V \cos \theta, & \dot{y} &= V \sin \theta; \\ \dot{V} &= \frac{M_L + M_R}{mR}, & \ddot{\theta} &= \frac{M_R - M_L}{J}, \end{aligned} \quad (11)$$

где R – радиус колес; m – масса робота; J – момент инерции робота при вращении вокруг вертикальной оси, проходящей через его центр массы; M_L и M_R – крутящие моменты, приложенные к колесам робота. Полагаем, что $m = 2 \text{ кг}$, $J = 0.0104 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Введем вспомогательные управляющие переменные:

$$u_V = \frac{M_L + M_R}{mR}, \quad u_\theta = \frac{M_R - M_L}{J}. \quad (12)$$

Уравнения (11) преобразуются к виду

$$\dot{V} = u_V, \quad \ddot{\theta} = u_\theta. \quad (13)$$

Стратегия управления движением МР предусматривает формирование маршрута его движения на основе метода ПП и реализацию движения по этому маршруту посредством двухконтурной системы регулирования величины линейной скорости и направления его движения (курса).

Маршрут движения МР задается линией напряженности $\mathbf{E}(\mathbf{r})$. Потребуем, чтобы величина скорости его перемещения была постоянной $V^* = \text{const}$. Заданный курс θ^* определяется согласно (10):

$$\theta^* = \arg \mathbf{E}.$$

Соответствующие законы регулирования имеют вид

$$u_V = k_V (V^* - V); \quad u_\theta = k_\theta (\theta^* - \theta) - k_\Omega \dot{\theta}. \quad (14)$$

Согласно (13), (14) динамика контуров регулирования описывается линейными дифференциальными уравнениями:

$$\dot{V} + k_V V = V^*, \quad \ddot{\theta} + k_\Omega \dot{\theta} + k_\theta \theta = k_\theta \theta^*.$$

Настройку контуров регулирования будем осуществлять исходя из задания желаемых полюсов p_1^* и p_2^* (кратного):

$$p_1^* = -\frac{1}{T_V}, \quad p_2^* = -\frac{1}{T_\theta}, \quad T_V, T_\theta > 0.$$

Тогда

$$k_V = \frac{1}{T_V}, \quad k_\theta = \frac{1}{T_\theta^2}, \quad k_\Omega = \frac{2}{T_\theta}.$$

Притягивающее поле создается согласно формуле (6), а отталкивающее – (7). В модельном примере принято $k_a = 1$, $k_r = 3$, $\rho_0 = 1.5$ м; $T_V = T_\theta = 0.5$ с.

Рис. 2 иллюстрирует результаты моделирования процесса управления движением МР в среде MATLAB.

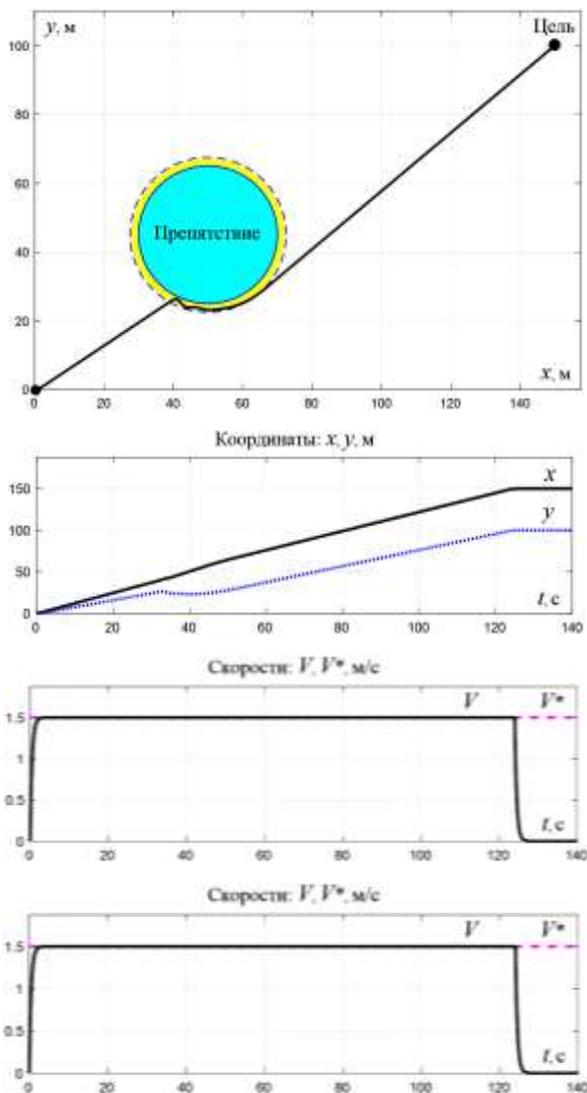


Рис. 2. Траектория движения робота

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предлагаемой стратегии управления движением МР искусственные потенциальные поля носят информационный, а не силовой характер, задавая траектории движения к целевому положению с обходом препятствий на пути следования. Само же управление движением робота осуществляется двухконтурной системой регулирования скорости и направления движения. Предлагаемые решения применены к модельной задаче управления движением двухколесного робота. Их эффективность подтверждают результаты компьютерного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Платонов А.К., Кирильченко А.А., Колганов М.А. Метод потенциалов в задаче выбора пути: история и перспективы // Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. М., 2001. № 40. 32 с.
- [2] Ge S.S., Cui Y.J. Dynamic Motion Planning for Mobile Robots Using Potential Field Method // Autonomous Robots. 2002. Vol. 13. P. 207-222.
- [3] Pozna C., Precup R.-E., Koczy L.T., Ballagi A. Potential Field-Based Approach for Obstacle Avoidance Trajectories // The IPISI Bgd Transactions on Internet Research. 2002. Vol. 8, N. 2. P. 40-45.
- [4] Cosio F.A., Castañeda M.A.P. Autonomous Robot Navigation using Adaptive Potential Fields // Mathematical and Computer Modelling. 2004. Vol. 40. P. 1141-1156.
- [5] Fu-Guang D., Peng J., Xin-Qian B., Hong-Jian W. AUV Local Path Planning based on Virtual Potential Field // In: 2005 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. 2005. Vol. 4. P. 1711-1716.
- [6] Castañeda M.A.P., Savage J., Hernández A., Cosío F.A. Local Autonomous Robot Navigation Using Potential Fields. Motion Planning. Xing-Jian Jing (Ed.). Chapter 1. InTech, 2008. 598 p.
- [7] Чепиженко В.И. Анализ использования потенциальных полевых методов для решения навигационных и конфликтных задач // Кибернетика и вычислительная техника. 2012. Вып. 167. С. 15-24.
- [8] Li F., Tan Y., Wang Y., Ge G. Mobile Robots Path Planning Based on Evolutionary Artificial Potential Fields Approach // Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering. 2013. P. 1314-1317.
- [9] Dumitru S.A., Vladareanu L., Yan T.H., Qi Ch.K. Mobile Robot Navigation Techniques Using Potential Field Method in Unknown Environments // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 656. P. 388-394.
- [10] Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Методология искусственных потенциальных полей в задачах локальной навигации мобильных роботов // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника - 2017. Матер. III Всероссийской научно-технической конференции. Севастополь: СевГУ, 2017. С. 157-160.
- [11] Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Некоторые аспекты применения метода потенциальных полей в задачах локальной навигации мобильных роботов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. XIX Международной конференции. Самара: ООО "Офорт", 2017. С. 242-247.
- [12] Filimonov A.B., Filimonov N.B. The Peculiarities of Application of the Potential Fields Method for the Problems of Local Navigation of Mobile Robots // Proceedings of the 14th Internat. Scien.-Techn. Conf. «Actual Problems of Electronic Instrument Engineering» (APEIE-2018). Vol. 1, Part 6. 2018. P. 208-211.
- [13] Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Вопросы построения потенциальных полей в задачах локальной навигации мобильных роботов // Автометрия. 2019. Т. 55, № 4. С. 65-40.
- [14] Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Вопросы управления движением мобильных роботов методом потенциального наведения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 11. С. 677-685.
- [15] Бурдаков С.Ф., Мирошник И.В., Стельмаков Р.Э. Системы управления движением колесных роботов. СПб.: Наука, 2001. 227 с.