УДК 681.5

# ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ЛОКАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

© **А. Б. Филимонов**[1, 2], **Н. Б. Филимонов**[3, 4], **А. А. Барашков**[1]

[1] *МИРЭА — Российский технологический университет, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78*
[2] *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4*
[3] *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1*
[4] *Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5*
*E-mail: nbfilimonov@mail.ru*

Рассматриваются вопросы локальной навигации мобильных роботов. Анализируются особенности метода искусственных потенциальных полей как одного из популярных методов локальной навигации роботов. Исследуется вопрос конструирования притягивающих потенциальных полей. Обсуждается проблема локальных минимумов («ловушек»). Предлагается новый способ обхода препятствий при движении робота к цели.

*Ключевые слова:* мобильные роботы, локальная навигация, планирование движений, искусственные потенциальные поля, проблема локальных минимумов, задача обхода препятствий.

DOI: 10.15372/AUT20190407

**Введение.** В современной робототехнике одной из актуальных является проблема локальной навигации мобильного робота (МР) при выполнении различных миссий: сбор информации в заранее неизвестных средах, поисково-спасательные операции или решение сложных транспортно-логистических задач.

Локальная навигация занимается решением следующей группы задач: определение координат робота по отношению к некоторой (обычно стартовой) точке, локализация робота в рабочем пространстве, планирование его маршрута перемещения к цели с предотвращением столкновений с препятствиями в процессе движения. Следует отметить, что планирование здесь задаёт лишь небольшой отрезок траектории, в конечной точке которого выбирается дальнейшая траектория.

Одним из широко распространённых в локальной навигации МР является метод потенциальных полей (ПП), впервые предложенный в [1]. Его алгоритм прост, имеет низкую вычислительную сложность и высокую эффективность реализации. Пионерскими работами, посвящёнными методу ПП, являются [2] и [3], а достаточно полное представление о современном состоянии метода и особенностях его применения в робототехнике дают работы [4–15].

Суть метода ПП заключается в реализации движения МР в поле «информационных сил» с использованием присущих потенциальным полям сил «притяжения» к целевой точке и «отталкивания» от препятствий. В литературе встречается большое количество названий методов, в основу которых положены свойства потенциальных силовых полей: метод потенциальных полей, метод искусственных потенциальных полей, метод виртуальных силовых полей и др. Все эти методы разработаны для разных классов автономных

подвижных объектов, таких как беспилотные летательные аппараты, мобильные роботы, автономные подводные транспортные средства и т. д.

Данная работа является продолжением [16–18], где рассматриваются вопросы построения искусственных потенциальных полей для решения задач локальной навигации мобильных роботов, анализируется проблема потенциальных «ям» и предлагается новый способ обхода препятствий.

**Идея потенциальных полей в мобильной робототехнике.** Общая идея метода ПП состоит в движениях МР вдоль линий векторного поля, потенциальная функция которого отражает конфигурацию препятствий и их форму, а также цель движения. По типу потенциальной функции различают виртуальное силовое поле, Ньютоновское потенциальное поле, супербиквадратное потенциальное поле, гармоническое векторное поле. Векторное поле разделяется на две составляющие: цель движения представляется притягивающим векторным полем, в то время как препятствия — отталкивающим векторным полем. Сложение двух векторных полей позволяет решить задачи движения к заданной целевой точке и обхода препятствий.

Рабочим пространством мобильного робота $W$ будем называть окружающее пространство, в котором он функционирует. Различают задачи планирования маршрута и планирования движений МР.

Маршрут — это непрерывная кривая в рабочем пространстве. Параметризованный временем маршрут называется траекторией, посредством дифференцирования которой можно вычислять скорости и ускорения МР, а её нахождение называется планированием траектории или движения.

Полагаем, что МР обладает картой окружающей среды и снабжён навигационной системой, позволяющей достаточно точно определять его координаты. Функциональная структура робота содержит модуль генерации потенциального поля $U(\mathbf{q})$, которое включается в его информационную базу и применяется в алгоритмах управления для вычисления виртуальных сил, обеспечивающих притяжение робота к цели или его отталкивание от заранее известных препятствий. При появлении новых препятствий на пути движения робота поле виртуальных сил оперативно обновляется.

Ограничимся рассмотрением плоской задачи $W \subseteq \mathbf{R}^2$, причём МР представляем материальной точкой, и поэтому его ориентация игнорируется.

Потенциальное поле $U(\mathbf{q})$ образуется суперпозицией двух полей — притягивающего, которое создаётся целью, и отталкивающего, создаваемого препятствиями:

$$U(\mathbf{q}) = U_{att}(\mathbf{q}) + U_{rep}(\mathbf{q}). \tag{1}$$

Потенциальная сила в позиции $\mathbf{q} = (x, y)$ находится как антиградиент функции $U(\mathbf{q})$:

$$\mathbf{F}(\mathbf{q}) = -\nabla U(\mathbf{q}) = -\mathrm{col}\Big(\frac{\partial U(\mathbf{q})}{\partial x}, \frac{\partial U(\mathbf{q})}{\partial y}\Big).$$

В соответствии с (1) создаваемую полем виртуальную силу также можно разложить на две составляющие — притягивающую и отталкивающую:

$$\mathbf{F}(\mathbf{q}) = \mathbf{F}_{att}(\mathbf{q}) + \mathbf{F}_{rep}(\mathbf{q}), \tag{2}$$

где

$$\mathbf{F}_{att}(\mathbf{q}) = -\nabla U_{att}(\mathbf{q}), \qquad \mathbf{F}_{rep}(\mathbf{q}) = -\nabla U_{rep}(\mathbf{q}).$$

Виртуальная сила (2) здесь используется для управления движением МР, направляя его к цели и предотвращая столкновения с препятствиями. Существуют три способа такого её применения [9]:

1) управляющий вход $\mathbf{u}$ робота формируется согласно закону

$$\mathbf{u} = \mathbf{F}(\mathbf{q});$$

2) в схеме кинематического управления силовое поле задаёт желаемую скорость движения робота

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{F}(\mathbf{q}); \tag{3}$$

3) в схеме динамического управления робот рассматривается как массивная точка, на которую действует данная сила:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{F}(\mathbf{q}).$$

**Проблема конструирования потенциальных полей.** В качестве притягивающего потенциала обычно принимают (см., например, [4]) параболическую функцию

$$U_{att}(\mathbf{q}) = k_a d(\mathbf{q})^2/2, \tag{4}$$

где $k_a > 0$ — константа; $d(\mathbf{q})$ — евклидово расстояние МР до цели, которая считается расположенной в точке $\mathbf{q}_{goal}$:

$$d(\mathbf{q}) = \|\mathbf{q} - \mathbf{q}_{goal}\|.$$

Отталкивающий потенциал должен быть большим вблизи препятствия, но не должен влиять на движение МР вдали от него. Весьма распространён следующий способ задания отталкивающих потенциалов [7–9]:

$$U_{rep}(\mathbf{q}) = \begin{cases} k_r(1/\rho(\mathbf{q}) - 1/\rho_0)^2/2, & \rho(\mathbf{q}) \leqslant \rho_0, \\ 0, & \rho(\mathbf{q}) > \rho_0, \end{cases}$$

где $k_r > 0$, $\rho(\mathbf{q})$ — минимальное расстояние до препятствия.

Таким образом, данное поле создаёт потенциальный барьер вокруг препятствия ширины $\rho_0$, потенциал в котором резко возрастает при приближении к препятствию.

Поле (4) порождает потенциальные силы

$$\mathbf{F}_{att}(\mathbf{q}) = -k_a(\mathbf{q} - \mathbf{q}_{goal}),$$

причём

$$\|\mathbf{F}_{att}(\mathbf{q})\| = k_a\|\mathbf{q} - \mathbf{q}_{goal}\|.$$

Отметим важную характеристику такого решения: формируемая сила притяжения существенно изменяется в процессе перемещения МР и при приближении к цели стремится к нулю, что приводит к следующим нежелательным эффектам:

1) структура сил (2) вблизи препятствия зависит от удалённости робота от цели;

2) движение робота будет замедляться в конце маршрута, что неизбежно приведёт к неоправданной задержке времени его перемещения в целевое положение.

Для устранения данных нежелательных эффектов предложено использовать притягивающие потенциальные поля другого вида [17, 18]:

$$U_{att}(\mathbf{q}) = k_a d(\mathbf{q})/2. \tag{5}$$

В этом случае получаем притягивающую силу

$$\mathbf{F}_{att}(\mathbf{q}) = -k_a \frac{\mathbf{q} - \mathbf{q}_{goal}}{d(\mathbf{q})},$$

абсолютная величина которой оказывается постоянной:

$$\|\mathbf{F}_{att}(\mathbf{q})\| = k_a.$$

Эффективным может стать совместное использование потенциальных полей вида (4) и (5):

$$U_{att}(\mathbf{q}) = \begin{cases} k_a d(\mathbf{q})^2/2, & d(\mathbf{q}) \leqslant d_0, \\ k_a d(\mathbf{q})/2, & d(\mathbf{q}) > d_0, \end{cases} \tag{6}$$

где $d_0$ — некоторое малое расстояние до цели.

**Проблема «ловушек» и обхода препятствий.** В методе ПП широко известна проблема локальных минимумов [4, 7–10] — потенциальных ям различной геометрической структуры, которые становятся ловушками для МР.

В кинематической схеме управления робот движется в направлении антиградиента поля, т. е. следует траектории градиентного спуска:

$$\dot{\mathbf{q}}(t) = -\nabla U(\mathbf{q}(t)).$$

В точке локального минимума $\mathbf{q}^*$ градиент потенциальной функции обнуляется:

$$\nabla U(\mathbf{q}^*) = 0.$$

В схеме кинематического управления после попадания в точку $\mathbf{q}^*$ робот останавливается.

В схеме динамического управления набравший скорость робот благодаря фактору инерционности будет преодолевать мелкие потенциальные ямы. Но при этом не гарантируется преодоление им в процессе движения глубоких потенциальных ям. В результате в окрестности локального минимума робот будет совершать возвратно-поступательные либо циклические движения по замкнутой кривой и не сможет продолжить движение к цели.

Следует отметить, что проблема возникновения ловушек в потенциальных полях не может полностью решаться посредством применения простых моделей движения первого или второго порядка и указывает на необходимость усложнения алгоритмов управления МР. В связи с этим актуальными являются задачи диагностирования захвата траектории движения робота потенциальной ямой и его вывода из последней.

В случае применения схем кинематического управления ситуацию попадания МР в потенциальную яму можно диагностировать посредством оперативного контроля его траекторной скорости — т. е., когда в процессе движения скорость оказалась ниже некоторого порогового уровня.

В схемах динамического управления ситуация попадания в яму диагностируется посредством обнаружения факта локализации траектории в некоторой ограниченной зоне рабочего пространства, для этого необходимо накапливать и обрабатывать данные наблюдения в течение некоторого скользящего интервала времени.

Предлагается общий подход для решения двух ключевых для мобильной робототехники задач: вывода робота из потенциальной ямы и обхода им препятствий.

Проблему обхода препятствий можно разбить на две подпроблемы: обнаружение препятствия на пути движения робота и организация обхода препятствия.

Весьма популярным способом обхода препятствий роботом является метод гистограмм векторных полей (Vector Field Histogram, VHF), особенности и возможности которого в достаточной мере освещены в [4, 9].

**Метод двух карт потенциальных полей.** Предлагается новый способ обхода препятствий, в основе которого лежит идея раздельного использования в алгоритмах управления двух карт потенциальных полей $U(\mathbf{q})$ и $U_{rep}(\mathbf{q})$. Силовые линии первого и эквипотенциальные линии (изолинии) второго рассматриваются как аналоги навигационных изолиний на навигационных картах в судовождении, к примеру магнитных меридианов и параллелей Земли.

Силовые линии поля $U(\mathbf{q})$ служат для прокладки маршрута движения МР. Изолинии отталкивающего поля описываются уравнением

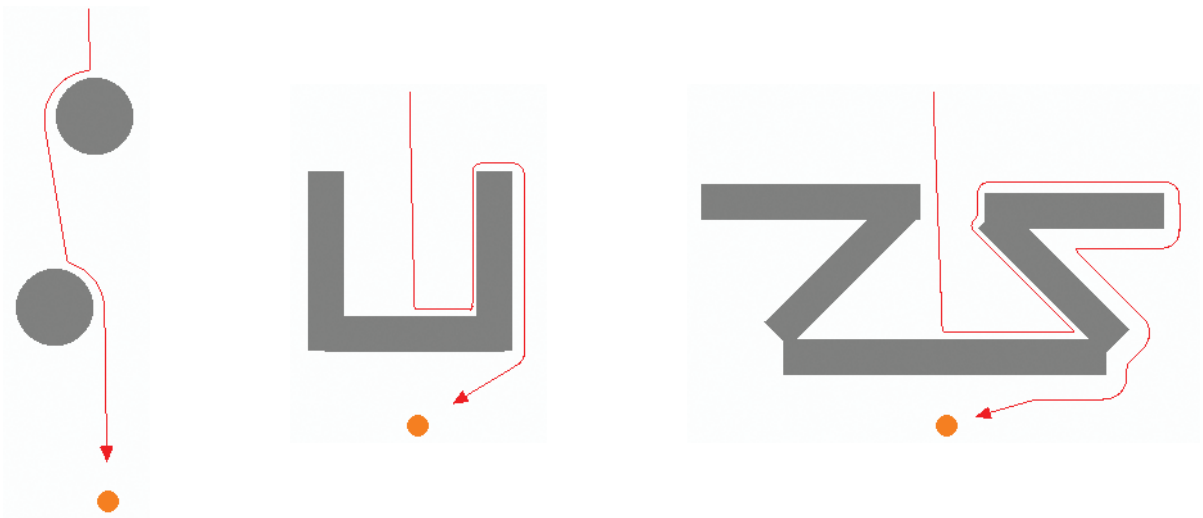
$$U_{rep}(\mathbf{q}) = C, \qquad C = \text{const} > 0.$$

Карта изолиний функции $U_{rep}(\mathbf{q})$ позволяет решать две задачи. Во-первых, контролировать ситуации сближения робота с препятствиями. Во-вторых, изолинии поля представляют информацию о геометрии препятствия и используются для построения пути обхода данного препятствия: движение робота направляется вдоль изолинии и подчиняется уравнению

$$\langle \dot{\mathbf{q}},\, \nabla U_{rep}(\mathbf{q}) \rangle = 0,$$

где угловые скобки обозначают скалярное произведение векторов.

**Пример.** Рассматривается движение МР к цели в среде с препятствиями. Применяется схема кинематического управления (3) и предложенный метод двух карт потенциальных полей. Результаты компьютерного моделирования траекторий обхода трёх типов препятствий мобильным роботом представлены на рисунке и иллюстрируют эффективность данного метода.



**Заключение.** Рассмотрены вопросы применения метода ПП в задачах локальной навигации МР. Исследованы вопросы конструирования притягивающих потенциальных полей. Анализируется проблема локальных минимумов. Предложен новый способ обхода препятствий при движении робота к цели, эффективность которого подтверждена результатами компьютерного моделирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. **Платонов А. К., Карпов И. И., Кирильченко А. А.** Метод потенциалов в задаче прокладки трассы. М., 1974. 27 с. (Препр./Института прикладной математики АН СССР; № 124).
2. **Khatib O.** Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots // The Intern. Journ. Robotics Res. 1985. **5**, N 1. P. 500–505.
3. **Brooks R. A.** A robust layered control system for mobile robot // IEEE Journ. of Robotics and Automation. 1986. **RA-2**, N 1. P. 14–23.
4. **Платонов А. К., Кирильченко А. А., Колганов М. А.** Метод потенциалов в задаче выбора пути: история и перспективы. М., 2001. 32 с. (Препр./Института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН; № 40).
5. **Howard A., Mataric M. J., Sukhatme G. S.** Mobile sensor network deployment using potential fields: a distributed, scalable solution to the area coverage problem // Proc. of the 6th Intern. Symp. Distributed Autonomous Robotics Systems (DARS 2002). Fukuoka, Japan, 25–27 June 2002. P. 113–126.
6. **Pozna C., Precup R.-E., Koczy L. T., Ballagi A.** Potential field-based approach for obstacle avoidance trajectories // The IPSI BgD Trans. Internet Res. 2002. **8**, N 2. P. 40–45.
7. **Siegwart R., Nourbakhsh I. R.** Introduction to Autonomous Mobile Robots. Cambridge: MIT Press, 2004. 321 p.
8. **Choset H., Lynch K. M., Hutchinson S. et al.** Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms and Implementations. Cambridge: Howie MIT Press, 2005. 603 p.
9. **Padilla Castañeda M. A., Savage J., Hernández A., Arambula Cosío F.** Local Autonomous Robot Navigation Using Potential Fields // Motion Planning /Ed. X.-J. Jing. Ch. 1. InTech, 2008. P. 1–22.
10. **Coenen S. A. M.** Motion Planning for Mobile Robots — A Guide. Eindhoven University of Technology, 2012. 79 p.
11. **Чепиженко В. И.** Анализ использования потенциальных полевых методов для решения навигационных и конфликтных задач // Кибернетика и вычислительная техника. 2012. Вып. 167. С. 15–24.
12. **Li F., Tan Y., Wang Y., Ge G.** Mobile robots path planning based on evolutionary artificial potential fields approach // Proc. of the 2nd Intern. Conf. on Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE 2013). Paris, France, March 2013. P. 1314–1317.
13. **Hoy M., Matveev A. S., Savkin A. V.** Algorithms for collision-free navigation of mobile robots in complex cluttered environments: a survey // Robotica. 2015. **33**, Is. 3. P. 463–497.
14. **Белоглазов Д. А., Гайдук А. Р., Косенко Е. Ю. и др.** Групповое управление подвижными объектами в неопределённых средах. М.: Физматлит, 2015. 300 с.
15. **Лю В.** Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) // Математика и математическое моделирование. 2018. № 1. С. 15–58.
16. **Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Методология искусственных потенциальных полей в задачах локальной навигации мобильных роботов // Матер. III Всерос. науч.-техн.

конф. молодых учёных, аспирантов и студентов «Интеллектуальные системы, управление и мехатроника — 2017». Севастополь: СевГУ, 2017. С. 157–160.

17. **Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Некоторые аспекты применения метода потенциальных полей в задачах локальной навигации мобильных роботов // Тр. XIX Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара: Офорт, 2017. С. 242–247.
18. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** The peculiarities of application of the potential fields method for the problems of local navigation of mobile robots // Proc. of the 14th Intern. Scien.-Techn. Conf. on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE 2018). 2018. Vol. 1, Pt. 6. P. 208–211.

*Поступила в редакцию 08.05.2019*
*После доработки 18.06.2019*
*Принята к публикации 18.06.2019*