

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2026-53-44-51>

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДА ФАРВАТЕРА В ЗАДАЧАХ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ В СРЕДЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

Сагатеян А.Д.¹, Филимонов Н.Б.^{1,2}

¹*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;*

²*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*

Ключевые слова: мобильные роботы, потенциальное управление, метод фарватера, оптимизация входа в фарватер, оптимизация движения по фарватеру.

Аннотация. В методах навигации и управления мобильных роботов, основанных на искусственных потенциальных полях, метод фарватера позволяет избежать попадания в локальные минимумы и обеспечить безопасное движение к цели. Однако при наличии нескольких фарватеров в рабочей среде остаются открытыми вопросы автоматического выбора как самого фарватера, так и пути входа в него. В работе ставится и решается задача оптимизации метода фарватера как задача минимизации суммарной стоимости движения МР до цели, включающей стоимость входа в фарватер и стоимость дальнейшего движения по нему. Предложен алгоритм автоматического выбора фарватера и точки входа в него, обеспечивающий баланс между качеством фарватера и затратами на его реализацию. Для оценки стоимости движения мобильного робота по фарватеру используется нейросетевая аппроксимация функции стоимости, обученная на данных имитационного моделирования.

OPTIMIZATION OF THE FAIRWAY METHOD IN TASKS POTENTIAL CONTROL OF A MOBILE ROBOT IN AN ENVIRONMENT WITH OBSTACLES

Sagatelian A.D.¹, Filimonov N.B.^{1,2}

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;*

²*Trapeznikov Institute of Control Problems of RAS, Moscow, Russia*

Keywords: mobile robots, potential control, fairway method, optimization of fairway entrance, optimization of fairway movement.

Abstract. In the methods of navigation and control of mobile robots based on artificial potential fields, the fairway method allows you to avoid hitting local minima and ensure safe movement to the target. However, if there are several fairways in the working environment, the issues of automatic selection of both the fairway itself and the entrance path remain open. The paper sets the task of optimizing the fairway method as the task of minimizing the total cost of mobile robot movement to the target, including the cost of entering the fairway and the cost of further movement inside it. An algorithm for automatically selecting a fairway and its entry point is proposed, ensuring a balance between the quality of the fairway and the cost of its implementation. To estimate the cost of MR movement along the fairway, a neural network approximation of the cost function is used, trained on simulation data.

Введение

Методы навигации и управления мобильными роботами (МР), основанные на искусственных потенциальных полях [1-5], широко применяются в задачах планирования движения в рабочих средах с

препятствиями. Основным их достоинством является вычислительная простота и естественная интерпретация движения робота вдоль силовых линий поля. Вместе с тем классические методы потенциального управления МР подвержены проблеме попадания в локальные минимумы, приводящей к остановке робота вдали от целевой точки.

Одним из подходов к преодолению данной проблемы является использование концепции фарватера [6-8] – области свободного пространства, заполненной силовыми линиями потенциального поля, и безопасно ведущими к цели с обходом препятствий. Однако в сложных, динамических и неструктурированных рабочих средах (крупные здания, промышленные цеха, склады, производственные помещения, объекты со сложной структурой и рельефом) потенциальное поле может порождать несколько фарватеров, различающихся геометрией и навигационными свойствами. При этом возникает естественный вопрос о рациональном выборе фарватера, гарантирующем ту или иную стоимость движения МР до цели [9, 10].

В настоящей работе ставится и решается задача оптимизации потенциального управления МР методом фарватера как задача минимизации суммарной стоимости движения до цели, включающей стоимость входа в фарватер и стоимость дальнейшего движения по нему. Предложен алгоритм автоматического выбора фарватера и точки входа в него, обеспечивающий баланс между качеством фарватера и затратами на его использование. Оценка стоимости движения МР по фарватеру основана на нейросетевой аппроксимации функции стоимости, обученной на данных имитационного моделирования.

Постановка задачи оптимизации метода фарватера

МР рассматривается как материальная точка, движущаяся под действием виртуальной силы притяжения к целевой точке и виртуальных сил отталкивания от препятствий. Полагаем, что рабочая среда МР является прямоугольной сценой $W \subset R^2$, содержащей множество препятствий $\Omega \subset W$ так, что свободное пространство среды определяется как $W_0 = W \setminus \Omega$.

Пусть $r_0 \in W_0$ – начальное положение робота, а $r^* \in W_0$ – целевая точка. Требуется построить траекторию движения МР с дискретным шагом по времени $r_0, r_1, \dots, r_k$, обеспечивающую выполнение следующих целевых и ограничивающих условий:

– *условие достижения МР цели:*

$$\|r_k - r^*\| \leq \varepsilon,$$

где $\|\cdot\|$ – евклидова норма вектора; ε – максимально допустимая дистанция между роботом и целевой точкой r^* ;

– *условие отсутствия столкновений МР с препятствиями:*

$$r_k \in W_0 \quad \forall k.$$

В рабочей среде W задано искусственное потенциальное поле $U(r)$, формирующее вектор напряжённости $E(r) = -\nabla U(r)$. Силовые линии данного векторного поля, заканчиваются в целевой точке r^* , образуя семейства траекторий, которые объединяются в фарватеры.

Определение. Фарватером Φ_k называется связная область $\Phi_k \subset W_0$, заполненная силовыми линиями потенциального поля, ведущими к целевой точке r^* .

Пусть в рабочей среде W существует конечное множество фарватеров $\{\Phi_k\}_{k=1}^K$, для каждого из которых вводится множество допустимых точек входа $S_k \subset \Phi_k$. Поставим *задачу оптимизации метода фарватера*, как задачу выбора оптимального фарватера и нахождения оптимального пути входа в выбранный фарватер.

Положим, что стоимость движения МР в рабочей среде W задаётся интегралом по длине пути ds [11, 12] так, что стоимость некоторой траектории γ оценивается следующим интегральным критерием:

$$J(\gamma) = \int_{\gamma} (w_\ell + w_s \psi(d(x, \Omega)) + w_c \kappa(x)^2) ds,$$

где $\kappa(x)$ – кривизна траектории в точке x ; $d(x, \Omega)$ – расстояние до множества препятствий; $\psi(\cdot)$ – штрафная функция близости робота к препятствиям; $w_\ell, w_s, w_c \geq 0$ – весовые коэффициенты.

Полная стоимость движения МР от его начального положения r_0 до точки входа в фарватер $s \in S_k$, а затем движения через фарватер Φ_k , представляется следующим критерием:

$$J_{total}(k, s) = J_{entry}(r_0 \rightarrow s) + J_{follow}(s \rightarrow r^* | \Phi_k), \quad (1)$$

где первое слагаемое J_{entry} характеризует стоимость пути следования робота к выбранному фарватеру, а второе слагаемое J_{follow} характеризует стоимость его движения до цели r^* внутри данного фарватера.

Стоимость движения МР при входе в фарватер J_{entry} формально можно задать интегралом вдоль траектории входа γ_{entry} :

$$J_{entry}(\gamma_{entry}) = \int_{\gamma_{entry}} (w_\ell + w_s \psi(d(x, \Omega))) ds, \quad (2)$$

где $\psi(d) = \frac{1}{(d + \varepsilon)^2}$, $\varepsilon > 0$.

Отметим, что минимизация критерия стоимости в виде функционала (2) реализуется с использованием дискретного планирования пути на сетке $r_0, r_1, \dots, r_k$, методом взвешенного поиска (Weighted A*) [13-15], что позволяет учитывать как длину пути, так и меру безопасности движения (штраф за малую допустимую дистанцию $d(x, \Omega)$).

Стоимость движения МР по фарватеру J_{follow} , т.е. внутри выбранного фарватера при следовании силовым линиям потенциального поля,

определяется интегралом вдоль траектории γ_k , соответствующей k -му фарватеру:

$$J_{follow}(\gamma_k) = \int_{\gamma_k} (w_\ell + w_s \psi(d(x, \Omega)) + w_c \kappa(x)^2) ds, \quad (3)$$

где $\kappa(x)$ – кривизна траектории в точке x .

Оптимальный фарватер и соответствующая оптимальная точка входа в него выбираются путём минимизации суммарной стоимости (1):

$$(s^*, k^*) = \arg \min_{k, s \in S_k} (J_{entry}(r_0 \rightarrow s) + J_{follow}(s, k)).$$

Для ускорения вычислений стоимости фарватера величина J_{follow} аппроксимируется нейросетевой моделью $V_\theta(s, k)$, обученной по данным численного моделирования:

$$V_\theta(s, k) \approx J_{follow}(s, k),$$

где обучающая выборка формируется имитационным моделированием траекторий γ_k при старте из точек $s \in S_k$ с последующим численным интегрированием функционала (3).

Таким образом, рассматриваемая задача оптимизации метода фарватера сводится к минимизации следующей приближённой функции суммарной стоимости:

$$J_{approx}(k, s) = J_{entry}(r_0 \rightarrow s) + V_\theta(s, k).$$

В результате, можно сформулировать следующий *алгоритм выбора оптимального фарватера* при потенциальном управлении МР:

- 1) формирование потенциального поля и карты напряжённости;
- 2) генерация силовых линий виртуальными частицами;
- 3) кластеризация силовых линий и построение фарватеров;
- 4) формирование множества точек входа в фарватер;
- 5) вычисление стоимости входа в фарватер и нейросетевая оценка стоимости движения по фарватеру;
- 6) выбор оптимального фарватера и соответствующей оптимальной точки входа, минимизирующих суммарную стоимость движения МР.

Компьютерная апробация оптимального метода фарватера

Для анализа эффективности предложенного подхода к оптимизации метода фарватера рассматривалась рабочая среда МР вида $W = [0, 200] \times [0, 200]$ м с пятью площадными препятствиями. Были приняты следующие начальное и целевое положения робота: $r_0 = (0, 0)$ и $r^* = (180, 180)$, а также допуск достижения цели: $\rho^* = 2,5$ м.

Потенциальное поле формировалось суперпозицией притягивающего потенциала цели $U_{attr}(r) = \|r - r^*\|$ и отталкивающих потенциалов препятствий, активных в зоне безопасности шириной ρ_r .

Использовались следующие параметры: $k_a = 1$, $k_r = 3$, $\rho_r = 2,5$ м.

Для генерации возможных фарватеров использовался метод виртуальных частиц [8]: множество частиц равномерно инициализировалось на наборе «входных» кривых, затем траектории интегрировались по нормированному полю, что давало множество силовых линий. Линии, достигшие целевой окрестности, кластеризовались по близости траекторий, формируя фарватеры Φ_k . Для каждого фарватера формировались по $M = 10$ точек входа (кандидатов) S_k , например, как точек пересечения фарватера Φ_k с окружностью радиуса $R = 40$ м вокруг старта, либо как точки, равномерно распределённые у входа в соответствующий коридор фарватера.

Стоимость пути входа МР в фарватер $J_{entry}(r_0 \rightarrow s)$ рассчитывалась на дискретной сетке методом поиска (Weighted A*) с клеточной стоимостью вида

$$c(r) = w_\ell + w_s \psi(d(r, \Omega)),$$

$$\psi(d) = \frac{1}{(d + \varepsilon)^2}, \quad \varepsilon = 0,1.$$

Данная задача соответствует минимизации интегральной стоимости пути с учётом штрафа за малую допустимую дистанцию.

Нейросетевая модель $V_\theta(s, k)$ обучалась на выборке, полученной имитационным моделированием движения по фарватеру от точек s до цели r^* с последующим численным интегрированием функционала (5). Здесь использовались координаты точки s , длина центральной линии фарватера, минимально допустимое расстояние до препятствий, оценка кривизны и интегральный риск.

Следует отметить, что оптимальный путь входа МР в фарватер не является кратчайшим в евклидовом смысле, причем оптимальная траектория может отклоняться от прямолинейного направления и проходить через более свободные области пространства, обеспечивая меньшую стоимость.

При компьютерном анализе эффективности предложенной оптимизации метода фарватера сравнивались следующие три стратегии:

1) *Ближайший фарватер* (БФ): выбор Φ_k по минимальному расстоянию от r_0 до фарватера.

2) *Лучший фарватер* (ЛФ): выбор Φ_k по минимальной стоимости движения по фарватеру без учёта стоимости входа в него.

3) *Оптимальный фарватер* (ОФ): выбор фарватера, минимизирующего суммарную стоимость $\hat{J} = J_{entry} + V_\theta$.

На рисунке 1 изображена траектория движения МР в сложной статической среде с использованием стандартного метода фарватера, а на рисунке 2 – траектория движения с использованием оптимального метода фарватера.

Сравнение средних значений суммарной стоимости движения МР при выборе фарватера для простой и сложной сред представлено соответственно в таблицах 1, 2.

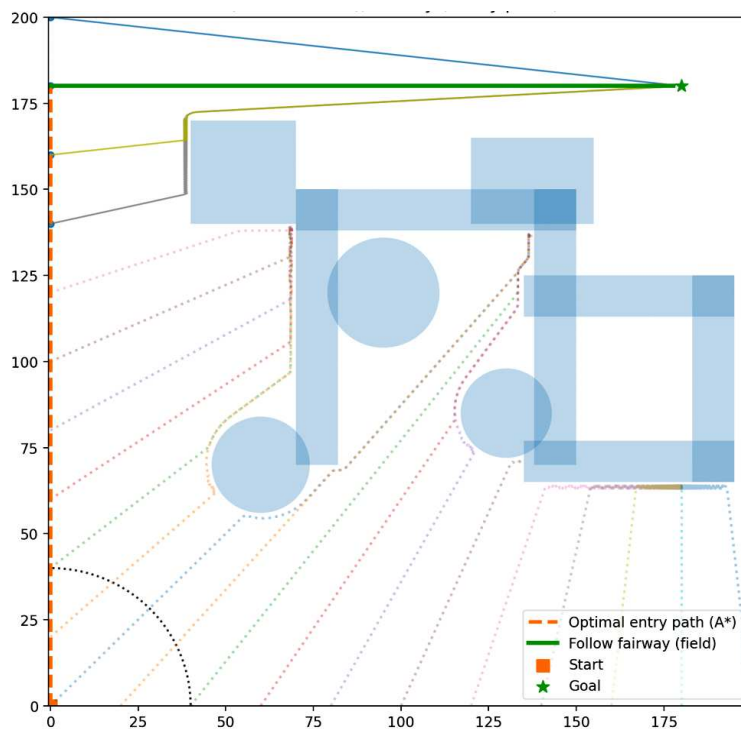


Рис. 1. Траектория движения МР с использованием стандартного метода «фарватера»

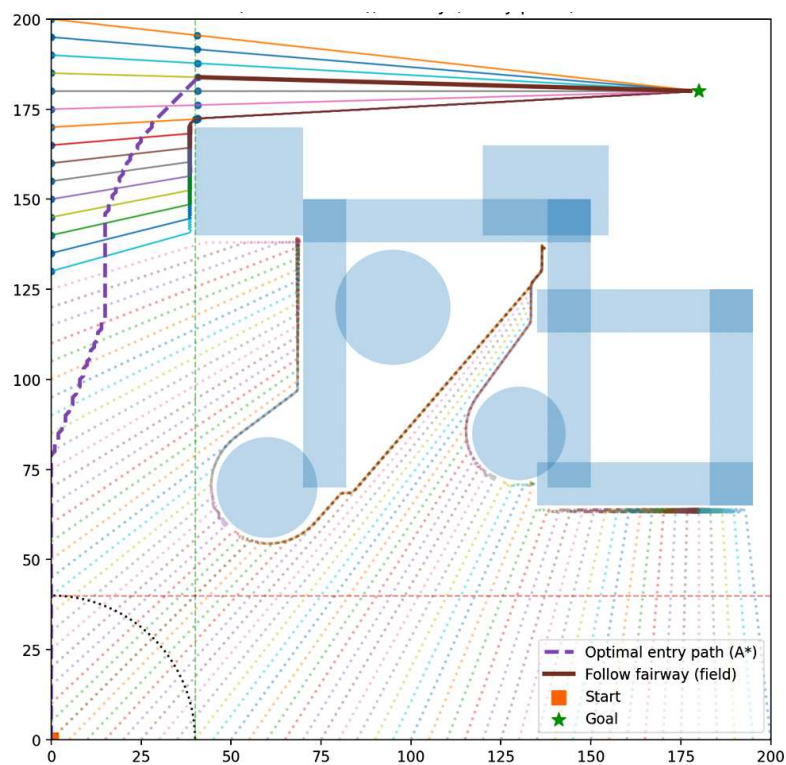


Рис. 2. Траектория движения МР с использованием оптимального метода «фарватера»

Табл. 1. Выбор фарватера для простой среды

Стратегия	J_{entry}	J_{follow}	J_{total}
БФ	40,2	703,9	744,1
ЛФ	180,6	179,8	360,4
ОФ	120,5	207,8	328,3

Табл. 2. Выбор фарватера для сложной среды

Стратегия	J_{entry}	J_{follow}	J_{total}
БФ	130,7	1613,4	1744,1
ЛФ	214,0	142,4	356,4
ОФ	206,3	144,2	350,5

Полученные результаты показали, что оптимальный метод фарватера обеспечивает снижение суммарной стоимости маршрута движения МР по сравнению с выбором «ближайшего фарватера» и «лучшего фарватера».

Заключение

В работе дана постановка и предложено решение задачи оптимизации метода фарватера при потенциальном управлении МР в среде с препятствиями, как задачи минимизации суммарной стоимости его движения до цели, включающей стоимость входа в фарватер и стоимость дальнейшего движения по нему. Предложен алгоритм автоматического выбора фарватера и точки входа в него. Компьютерная апробация в среде Python подтвердила эффективность предложенного решения.

Список литературы / References

1. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots // International Journal of Robotics Research. 1986, vol. 5, no. 1, pp. 90-98.
2. Latombe J.-C. Robot Motion Planning. – Boston: Kluwer Academic Publishers, 1991. – 651 p.
3. Rimón E., Koditschek D.E. Exact robot navigation using artificial potential functions // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1992, vol. 8, no. 5, pp. 501-518.
4. Castañeda M.A.P., Savage J., Hernández A., Cosío F.A. Local autonomous robot navigation using potential fields // Motion Planning (Ed. X.-J. Jing). InTech, 2008.
5. Bayat F., Najafinia S., Aliyari M. Mobile robots path planning: Electrostatic potential field approach // Expert Systems with Applications. 2018, vol. 100, pp. 68-78.
6. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Вопросы управления движением мобильных роботов методом потенциального наведения // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20, №11. – С. 677-685. – DOI: 10.17587/mau.20.677-685.
6. Filimonov A.B, Filimonov N.B. Issues of motion control of mobile robots based on the potential guidance method // Mechatronics, automation, control. 2019, vol. 20, no. 11, pp. 677-685. DOI: 10.17587/mau.20.677-685.
7. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Конструктивные аспекты метода потенциальных полей в мобильной робототехнике // Автометрия. – 2021. – Т. 57, №4. – С. 45-53. – DOI: 10.15372/AUT20210406.

7. Filimonov A.B., Filimonov N.B. Constructive aspects of the method of potential fields in mobile robotics // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2021, vol. 57, no. 4, pp. 371-377. DOI: 10.3103/S8756699021040063.
8. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Концепция «фарватера» в задачах потенциального наведения мобильных роботов // Автометрия. – 2022. – Т. 58, №4. – С. 59-66. – DOI: 10.15372/AUT20220406.
8. Filimonov A.B., Filimonov N.B. The concept of fairway in problems of potential guidance of mobile robots // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2022, vol. 58, no. 4, pp. 366-372. DOI: 10.3103/s8756699022040057.
9. LaValle S.M. Planning Algorithms. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006. – 842 p.
10. Karaman S., Frazzoli E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning // International Journal of Robotics Research. 2011, vol. 30, no. 7, pp. 846-894.
11. Ratliff N., Zucker M., Bagnell J.A., Srinivasa S. CHOMP: Gradient optimization techniques for efficient motion planning // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2009, pp. 489-494.
12. Schulman J., Ho J., Lee A., Awwal I., Bradlow H., Abbeel P. Finding locally optimal, collision-free trajectories with sequential convex optimization // Proceedings of Robotics: Science and Systems (RSS). 2013.
13. Koenig S., Likhachev M. D* Lite // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2002, pp. 476-483.
14. Pohl I. Heuristic search viewed as path finding in a graph // Artificial Intelligence. 1970, vol. 1, no. 3-4, pp. 193-204.
15. Pearl J. Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving. – Reading, MA: Addison-Wesley, 1984. – 382 p.

Сагателян Аршак Дереникович – студент	Sagatelian Arshak Derenikovich – student
Филимонов Николай Борисович – доктор технических наук, профессор	Filimonov Nikolay Borisovich – doctor of technical sciences, professor
nbfilimonov@mail.ru	

Received 27.04.2026