

УДК 629.05:004.7

ISSN: 0203-3771, eISSN: 2519-2272

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771492025334105>

О. Ю. Конорєв¹, – ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0051-3944>,
П. А. Марченко², – ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7261-6316>

ПОБУДОВА МАРШРУТУ ДЛЯ АВТОНОМНИХ НАЗЕМНИХ ПЛАТФОРМ

Ua

У статті розглянуто складову навігаційного забезпечення керування мультиагентною системою, що стосується побудови індивідуальних маршрутів наземними автономними платформами до цілей. Запропоновано розширення алгоритму A*, яке враховує енергетичні витрати, тип покриття дороги на маршруті, складність рельєфу та обмеження руху по швидкості. Моделювання роботи алгоритму виконано у віртуальному середовищі з умовною мапою.

За результатами дослідження сформульовано алгоритмічне рішення для побудови маршруту наземного агента до цілі.

En

The paper considers the navigation support component of the control of a multiagent system, which concerns the construction of individual routes by ground-based autonomous platforms to goals. An extension of the A* algorithm is proposed, which takes into account energy costs, type of coverage, terrain complexity, and speed limits. The algorithm was simulated in a virtual environment with a conditional map.

Based on the results of the study, an algorithmic solution for building a ground agent's route to the target is formulated.

Вступ

Сучасні мультиагентні системи, що об'єднують безпілотні літальні апарати (БПЛА) та наземні робототехнічні платформи (НРП), активно застосовуються для виконання завдань розвідки, пошуку і транспортування [1, 2]. Одним із основних викликів залишається побудова ефективних маршрутів для НРП в умовах складного рельєфу, різної прохідності місцевості та обмеженого запасу енергії [3].

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

² КПІ ім. Ігоря Сікорського

Класичними алгоритмами побудови маршрутів є алгоритм Дейкстри [4] та алгоритм A^* [5]. Вони знаходять найкоротші шляхи між вузлами у зваженому графі [6] та будують маршрут з найменшою вартістю, яка визначається як умовний узагальнений показник «витрат» у разі проходження шляху. Одиниці вимірювання таких показників задаються у довільній відносній шкалі [7]. Такий підхід використовується для вирішення задач, пов'язаних із оптимізацією, наприклад, знаходження найкоротшого шляху між вершинами [8].

Автори [9] пропонують модифікацію алгоритму A^* , де цільова функція мінімізує не лише відстань, а й споживану енергію наземного робота. У статті [10] розглядаються способи врахування особливостей рельєфу в алгоритмах вибору маршруту руху. В цій статті автори вводять коефіцієнт прохідності, що дозволяє алгоритму A^* враховувати складність рельєфу місцевості та віддавати перевагу більш безпечним маршрутам із високою прохідністю. Робота [11] присвячена дослідженню залежності часу проходження маршруту від властивостей рельєфу. Це питання є важливим, оскільки у неоднорідному середовищі швидкість руху не є сталою величиною, вона зменшується на складному ґрунті або схилах та збільшується на рівних твердих покриттях. Тому підхід до навігації наземних платформ, згідно з яким алгоритм A^* було модифіковано шляхом заміни показника геометричної відстані на показник оцінки часу проходження із урахуванням властивостей рельєфу [11], можна вважати найбільш сучасним. У статті [12] продовжено дослідження властивостей алгоритму A^* . В цій роботі встановлено, що можливості цього алгоритму не обмежуються використанням лише геометричної відстані в якості критерію оптимальності та показана можливість знаходження оптимального маршруту НРП для будь-якої заданої метрики вартості на графі.

Результати досліджень у роботах [9, 10, 11] показали, що використання в якості критерію вибору маршруту НРП замість геометричної відстані більш інформативних параметрів, таких як енерговитрати, прохідність місцевості та очікувана швидкість руху, дає кращі результати пошуку маршруту при збереженні коректності роботи алгоритму A^* . Натомість жодна із відомих робіт не пропонує побудову маршруту з урахуванням одночасно всіх трьох параметрів в одному алгоритмі.

Постановка задачі

Метою даного дослідження є побудова маршруту руху НРП, що є оптимальним за трьома критеріями: енерговитрати, прохідність, очікувана швидкість руху.

Викладення основного змісту

$$w_e = \frac{1/e_{сер}}{(1/e_{сер}) + (1/k_{сер})}, \quad w_p = \frac{1/k_{сер}}{(1/e_{сер}) + (1/k_{сер})}, \quad (3)$$

де: $e_{сер} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i$, $k_{сер} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i$ і отримаємо таку функцію накопиченої вартості розширеного алгоритму A*:

$$g(u) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i}{v_i} + w_e \cdot e_i + w_p \cdot k_i \cdot d_i \right). \quad (4)$$

Результати моделювання

Побудуємо дискретизовану випадкову карту місцевості розміром 100×100 клітин у вигляді зваженого графа, а на ній – три маршрути, застосовуючи три алгоритма: Дейкстри [4], A* [5] та розширеного A* (4), (рис. 2).

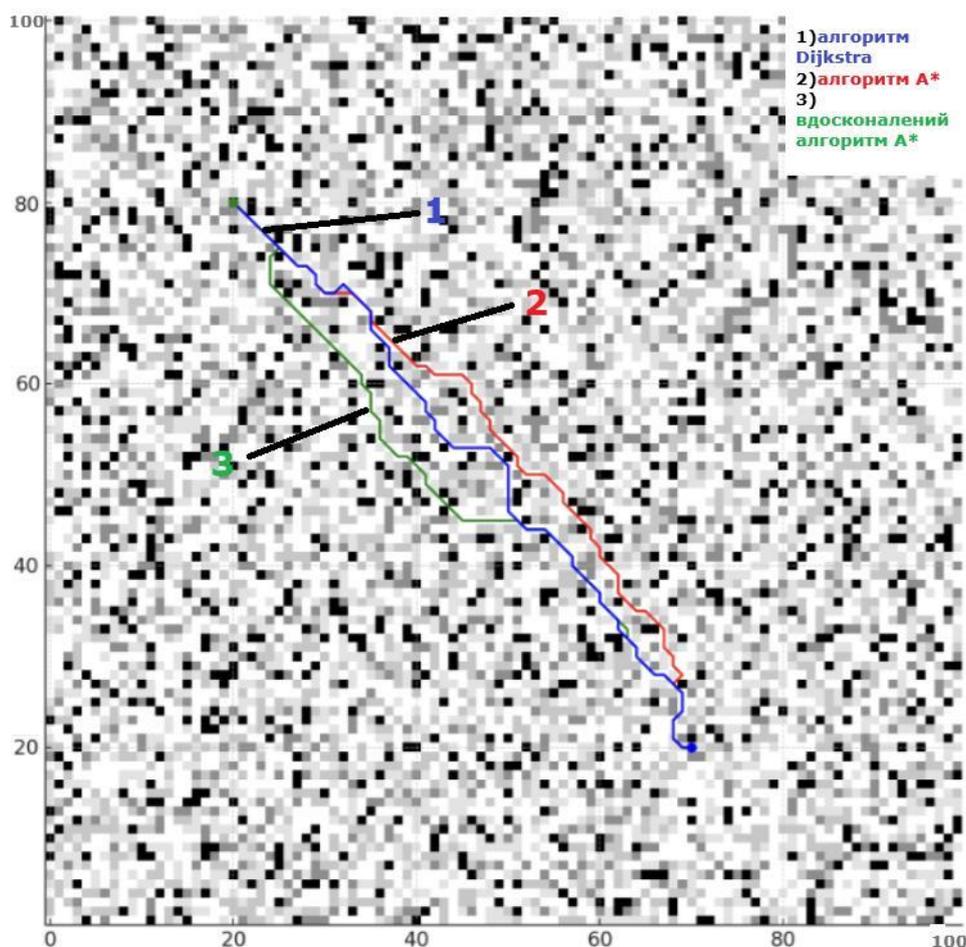


Рис. 2. Дискретизована випадкова карта місцевості із побудованими маршрутами

Кожний алгоритм будує маршрут від початкового вузла до кінцевого по ребрам графа, обираючи кожне наступне ребро з найменшою вартістю. Загальна вартість побудованого маршруту дорівнює сумі всіх ваг ребер, якими пройшов маршрут (табл. 1).

Таблиця 1.

Оцінка вартості маршруту

№	Вартість маршруту, побудованого за		
	алгоритмом Дейкстри	алгоритмом A^*	розширеним алгоритмом A^*
1	288,3	279,5	267,8

Менша вартість маршруту визначає, що проходження цього маршруту наземним роботом потребує менше часу та менше енергії.

Порівняння результатів моделювання показує, що маршрут, побудований за розширеним алгоритмом A^* , має меншу загальну вартість (табл. 1).

На ділянках з однорідною місцевістю та незначним впливом рельєфу й покриття маршрути частково співпадають. У зонах з низькою прохідністю маршрут, побудований за розширеним алгоритмом A^* , відхиляється від маршрутів, побудованих за алгоритмами Дейкстри та A^* , та проходить по менш енергетично затратним ділянкам, (рис. 2).

Висновки

Проведені дослідження та числове моделювання показали:

- розширений алгоритм A^* успішно будує маршрут руху наземного робота, оптимальний за критеріями енерговитрати, прохідність, очікувана швидкість руху. Такий підхід дозволяє мінімізувати сумарну вартість переміщення наземних роботів у складних умовах;
- за критерієм енергетичної ефективності запропонований алгоритм показав на 4.1% – 7.1% кращі результати, ніж класичний A^* та алгоритм Дейкстри.

Список використаної літератури

1. *Munasinghe, I., Perera, A., & Deo, R. C.* (2024). A Comprehensive Review of UAV-UGV Collaboration: Advancements and Challenges. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 13(6), 81. <https://doi.org/10.3390/jsan13060081>.
2. *Shi, H., Zhao, Z., Chen, J., Zhou, M., & Liu, Y.* (2024). Enhancing Unmanned Aerial Vehicle Path Planning in Multi-Agent Reinforcement Learning through Adaptive Dimensionality Reduction. *Drones*, 8(10), 521. <https://doi.org/10.3390/drones8100521>.

3. *Mondal, M. S., Ramasamy, S., Humann, J. D.* et al. Cooperative Multi-Agent Planning Framework for Fuel Constrained UAV-UGV Routing Problem. *J Intell Robot Syst* 111, 12 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10846-024-02209-w>.
4. *Dijkstra, E. W.* A note on two problems in connexion with graphs. *Numer. Math.* 1, 269–271 (1959). <https://doi.org/10.1007/BF01386390>.
5. *Hart, P., Nilsson, N. and Raphael, B.* (1968) A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Transactions Systems Science and Cybernetics*, 4, pp. 100-107. <http://dx.doi.org/10.1109/TSSC.1968.300136>.
6. *Rosen, R.* The theory of graphs and its applications. *Bulletin of Mathematical Biophysics* 24, 441–443 (1962). <https://doi.org/10.1007/BF02478000>.
7. *Esri.* (n. d.). Understanding Path Distance Analysis. ArcGIS Pro documentation. Retrieved May 30, 2025, from <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.3/tool-reference/spatial-analyst/understanding-path-distance-analysis.htm>.
8. *Mahdian, M., & Sankowski, P.* (2022). A Generalization of the Shortest Path Problem to Graphs with Multiple Edge Weight Functions. arXiv preprint arXiv:2208.11489. <https://arxiv.org/abs/2208.11489>.
9. *Ge, H., Ying, Z., Chen, Z., Zu, W., Liu, C., & Jin, Y.* (2023). Improved A* Algorithm for Path Planning of Spherical Robot Considering Energy Consumption. *Sensors*, 23(16), 7115. <https://doi.org/10.3390/s23167115>.
10. *Zhao, D., Ni, L., Zhou, K., Lv, Z., Qu, G., Gao, Y., Yuan, W., Wu, Q., Zhang, F., & Zhang, Q.* (2024). A Study of the Improved A* Algorithm Incorporating Road Factors for Path Planning in Off-Road Emergency Rescue Scenarios. *Sensors*, 24(17), 5643. <https://doi.org/10.3390/s24175643>.
11. *Yuanmin Liu, Xinyu Gao, Bo Wang, Jiaxin Fan, Qiurong Li, Wen Dai,* A passage time–cost optimal A* algorithm for cross-country path planning, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 130, 2024, 103907, ISSN 1569-8432, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103907>.
12. *Ramon Andreu Altava.* Computation of Optimal Profiles in Descent and Approach Phases. *Mathematical Software [cs.MS]*. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2020. English. (NNT : 2020TOU30026). (tel-03004543), <https://theses.hal.science/tel-03004543>.
13. *Saaty, T. L.* (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26.
14. *Howard and H. Seraji,* "Real-time assessment of terrain traversability for autonomous rover navigation," *Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000)* (Cat. No.00CH37113), Takamatsu, Japan, 2000, pp. 58-63 vol.1.

15. Esri. (n.d.). How slope works. ArcGIS Resource Center. Retrieved from <https://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//00q900000061000000>.
16. *AuthorLastname, A. B., AuthorLastname, C. D., & AuthorLastname, E. F.* (Year). Predicting Energy Consumption of Ground Robots On Uneven Terrains. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2212.06393>.
17. *Hwang, C. L., & Yoon, K.* (1981). Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Springer-Verlag.
18. *Zou, H., Yun, Y., & Sun, L.* (2006). Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment. *Journal of Environmental Sciences*, 18(5), pp. 1020-1023.
19. *Sánchez-Ibáñez, J. R., Pérez-del-Pulgar, C. J., Serón, J., & García-Cerezo, A.* (2021). Optimal Path Planning using CAMIS: a Continuous Anisotropic Model for Inclined Surfaces. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2103.03849>.
20. The Engineering Toolbox. (n.d.). Friction and Friction Coefficients. Retrieved from https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html.

Received: 18 March 2025 / Revised: 14 April 2025 / Accepted: 05 May 2025



© The Author(s)2025. Published by Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons License Attribution4.0 International (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited