УДК 629.05:004.7

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

О. Ю. Конорєв[1], *PhD студент*, **П. А. Марченко**[2], *PhD студент*

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].

Класичними алгоритмами побудови маршрутів є алгоритм Дейкстри [4] та алгоритм A* [5]. Вони знаходять найкоротші шляхи між вузлами

[1] *КПІ ім. Ігоря Сікорського*
[2] *КПІ ім. Ігоря Сікорського*

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

Побудуємо маршрут руху наземного робота на площі розміром $M \times M$ клітин, представленої у вигляді зваженого графа [6], де вузли – це

координати точок на карті; ребра – можливі кроки між сусідніми вузлами; чорні квадрати – перешкоди; вага кожного ребра визначає, скільки енергії витрачає робот на перехід між вузлами (рис. 1). Призначимо кожній клітинці певний коефіцієнт прохідності (k), що характеризує умовну складність переміщення через неї [13]. Перешкоди позначимо нескінченно високим коефіцієнтом $k \to \infty$, що виключає їх із маршруту.

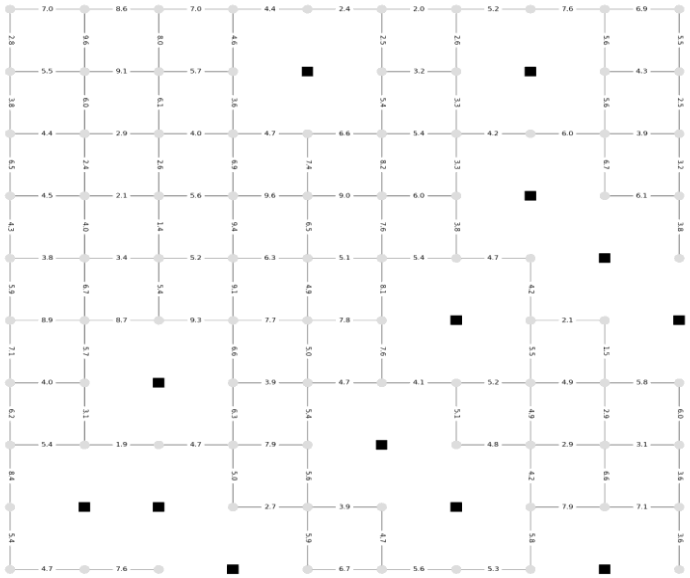

Рис. 1. Площа у вигляді зваженого графа

У функцію накопиченої вартості маршруту алгоритму A* $f(n) = g(n) + h(n)$ [5] додамо параметри: довжина переходу (d), очікувана швидкість руху (v), оцінка енерговитрат (e), коефіцієнт прохідності ділянки (k).

Параметри рельєфу місцевості опишемо різницею висот Δh сусідніх клітин (i, j) [14] та використаємо для обчислення кута ухилу θ [14, 15]:

$$\theta_{ij} = \mathrm{arctg}\left(\frac{\Delta h_{ij}}{d_{ij}}\right), \tag{1}$$

де d_{ij} – горизонтальна відстань між центрами клітин.

Енергетичні затрати на проходження маршруту (e) обчислимо за формулою [16] виду:

$$e = m \cdot g \cdot d \cdot (\mu \cdot \cos\theta + \sin\theta), \tag{2}$$

де m – маса наземного робота, g – прискорення вільного падіння, μ – коефіцієнт тертя.

Визначимо вагові коефіцієнти енерговитрат (w_e) та прохідності (w_p) на основі середніх значень відповідних критеріїв [13, 17, 18]:

$$w_e = \frac{1/e_{сер}}{\left(1/e_{сер}\right)+\left(1/k_{сер}\right)}, \qquad w_p = \frac{1/k_{сер}}{\left(1/e_{сер}\right)+\left(1/k_{сер}\right)}, \tag{3}$$

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 А*:

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

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], А* [5] та розширеного А* (4), (рис. 2).

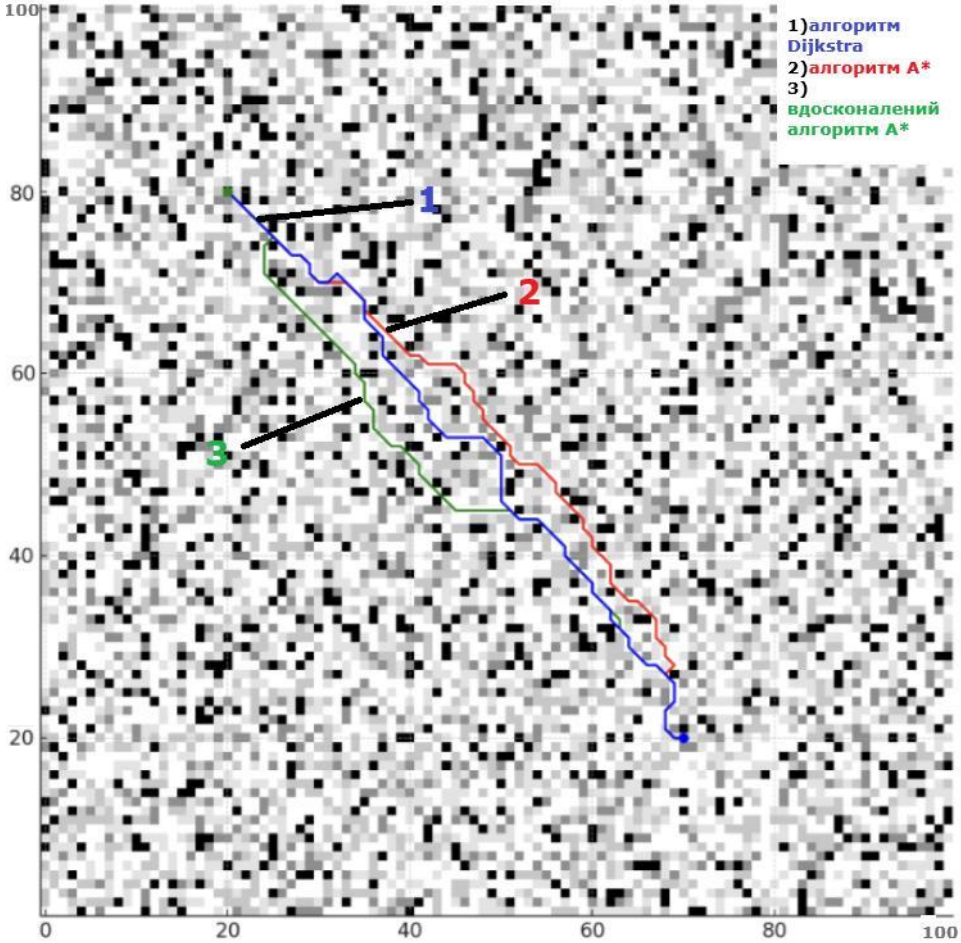

Рис. 2. Дискретизована випадкова карта місцевості із побудованими маршрутами

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 А*	розширеним алгоритмом А*
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 А*, 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 А*, відхиляється від маршрутів, побудованих за алгоритмами Дейкстри та А*, та проходить по менш енергетично затратним ділянкам, (рис. 2).

Висновки

Проведені дослідження та числове моделювання показали:

– розширений алгоритм А* 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 А* 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.