УДК 681.518

DOI: https://doi.org/10.20535/0203-3771492025334102

О. В. Збруцький[1], *д.т.н., професор*, **А. О. Краснопольський**[2], *PhG студент*

МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНІ ТА ОРІЄНТАЦІЇ РУХОМОГО ОБ'ЄКТУ НА ОРІЄНТИР СИСТЕМОЮ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ

Ua Важливою задачею організації структурованого руху групи роботизованих транспортних засобів є визначення взаємної відстані між агентами групи та їх взаємної орієнтації. В роботі розглянуто метод вирішення цієї задачі застосуванням системи технічного зору з використанням фідуціарних маркерів та експериментально визначені обмеження його роботи по дальності. Проведені експерименти підтверджують можливість досягнення високої точності вимірювань правильним вибором параметрів камер та алгоритмів ідентифікації на відстанях понад 100 м. Показано, що висока точність зберігається навіть за умови часткового перекриття орієнтирів та несприятливих зовнішніх факторах. Отримані результати вказують на перспективність використання фідуціарних маркерів у системах автономного керування транспортними засобами.

En The study examines the problem of autonomous navigation for a group of robotic transport vehicles in unstructured environments. The primary focus is placed on a method to use a computer vision system employing fiducial markers to determine the distance and angular position of reference objects, and to experimentally determine its range constraints. Conducted experiments demonstrate, that with the correct selection of camera parameters and identification algorithms, high measurement accuracy can be achieved, even under conditions of partial obstruction of reference objects and adverse external factors, at distances of more than 100 m. The presented results confirm the effectiveness of fiducial markers in autonomous control systems, making them a promising tool for application in the autonomous navigation of robotic complexes.

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

Вступ

Переважну більшість задовільних результатів у галузі автономної навігації роботизованих комплексів на сьогодні отримано у напрямку забезпечення автономного руху транспортних засобів на дорогах загального користування, і навпаки, у неструктурованих середовищах, таких як бездоріжжя або ґрунтові дороги, розв'язок автономної навігаційної задачі триває [1]. Однією із ключових задач автономного руху групи роботизованих транспортних засобів є забезпечення неколізійного координованого руху, яка потребує вимірювання взаємної відстані та визначення взаємної орієнтації рухомих об'єктів. В умовах автономних систем це може вирішуватись традиційними методами на базі інерційних сенсорів [2], розпізнаванням образів у системі технічного зору (СТЗ) [3], використанням супутникових навігаційних систем (*GPS*) [4], або дистанційним вимірюванням відстаней [5, 6].

Традиційні методи автономної орієнтації на базі інерціальних сенсорів мають суттєві недоліки: великі габарити у разі задовільної точності та високу вартість [7]. Тому найбільш розповсюдженим способом вимірювання відстаней у системах керування групами роботизованих транспортних засобів є *GPS*. Точно визначені координати кожного із транспортних засобів групи у поєднанні з сучасними системами радіозв'язку дозволяють легко обчислювати відстань між транспортними засобами групи. Проте використання *GPS* не є можливим під час відсутності супутникового покриття.

Використання засобів дистанційного вимірювання відстаней, таких як інфрачервоні, ультразвукові [5] або лазерні *LiDAR* [6] сенсори, за умови правильного підбору робочої відстані до габаритів та умов експлуатації автономного транспортного засобу, дозволяє точно вирішувати проблему вимірювання відстані [8]. Проте використання таких сенсорів вимагає використання потужних обчислювальних засобів, які складно використовувати на малих роботизованих платформах [9].

Головною проблемою аналітичного визначення відстані і орієнтації за допомогою СТЗ можна вважати ідентифікацію потрібного орієнтира у полі зору камер СТЗ. Навіть сучасні системи, побудовані із використанням технологій штучного інтелекту та машинного навчання, не забезпечують точну ідентифікацію абстрактних орієнтирів, особливо малої піксельної розмірності [10].

Однак СТЗ із цифровою камерою високої роздільної здатності дозволяє вирішити задачу ідентифікації використанням фідуціарних маркерів [11] із високою вірогідністю [12, 13]. Фідуціарні маркери являють собою планарне високо-контрастне монохромне зображення у вигляді квадратної матриці. За основу математичного апарату визначення відстані та кутового положення маркера покладено принцип перетворення гомогра-

фії [14], який дозволяє певним точкам, які належать площині у реальному просторі, поставити у відповідність пікселі на зображенні цифрової камери.

Але актуальним залишається питання визначення максимальної відстані при застосуванні фідуціарних маркерів у задачах навігації.

Постановка задачі

Розглянемо метод автономного визначення відстані від транспортного засобу, на якому встановлена СТЗ, до орієнтира, та кутового положення цього орієнтира відносно транспортного засобу. У якості орієнтира використовуємо об'єкт, який заздалегідь промаркуємо за допомогою фідуціарних маркерів.

Викладення основного матеріалу

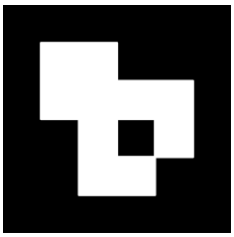
Алгоритм виявлення фідуціарних маркерів опишемо аналогічно [11] наступною послідовністю дій:

- застосування адаптивного порогування для отримання контурів у зображенні;
- визначення контурів у зображенні;
- видалення контурів із малою кількістю точок;
- виконання полігональної апроксимації контуру та збереження усіх увігнутих контурів із 4 кутами (прямокутників);
- сортування кутів проти годинникової стрілки;
- видалення занадто близьких прямокутників;
- усунення спотворення перспективи проекції за допомогою перетворення гомографії;
- виконання порогування за алгоритмом Оцу [15];
- ідентифікація внутрішнього коду маркеру за допомогою сітки, внутрішні клітинки якої містять біти інформації;
- для ідентифікованих маркерів виконується уточнення кутів із використанням методу субпіксельної інтерполяції.

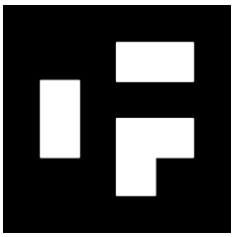
Після виявлення орієнтиру (маркеру), визначення його кутового положення та відстані до нього не викликає суттєвих труднощів. Ці дані можуть бути отримані із використанням методів *detectMarkers* та *estimatePoseSingleMarkers* бібліотеки *OpenCV* [16].

Для прикладу вирішення задачі ідентифікації орієнтиру використовуємо конфігурацію маркерів розмірністю 4x4 біти, типові зображення яких показано на рис. 1. Генерацію маркерів виконаємо за допомогою алгоритмів [17], використання в яких завадостійкого двійкового кодування із використанням надлишкових бітів інформації у ідентифікаторі маркера дозволяє з високою долею імовірності гарантувати однозначне визначення

маркерів у полі зору СТЗ та забезпечує уникнення визначання відстані та орієнтації на підставі хибно позитивних даних.



***а*)**



***б*)**

Рис. 1. Зразки фідуціарних маркерів: ***а*** – 4х4 №009, ***б*** – 4х4 №043

Декілька маркерів встановлюються у певних площинах на орієнтирі із урахуванням конфігурації його корпусу. До налаштувань програми автоматичного керування рухом транспортного засобу заноситься наступна інформація про маркери:

– ідентифікатор, який використовується для визначення приналежності тому чи іншому орієнтиру;
– фізичні розміри, які використовуються для обчислення відстані;
– площина розміщення, використовується для обчислення кутів відносного положення;
– дані зсуву відносно центру орієнтиру, які використовуються для уточнення даних відносного положення на малих дистанціях.

Маркери у полі зору камери СТЗ визначаються із використанням алгоритмів [18].

Проведені експерименти показали, що мінімальна роздільна здатність камери СТЗ для практичної ефективності роботи алгоритмів [18] ідентифікації маркерів складає 5 Мп. Максимальна дальність ідентифікації залежить і від оптичної складової камери (об’єктиву). Так, встановлено, що для ідентифікації маркерів розміром 150х150 мм на відстані 15 м можна використовувати ширококутні об’єктиви із діагональним полем зору 120 град., в той же час, для роботи на більших відстанях необхідно використовувати довгофокусні об’єктиви, з полем зору 30 град. та менше.

Експериментальна перевірка ефективності методу

Для експериментальної перевірки ефективності розглянутого методу визначення відстані до орієнтира та його кутового положення системою технічного зору використаємо цифрові камери *WaveShare RPi Camera G* (кут огляду 160 град.) та *RPi HQ Camera* 25мм 1:1.4 (кут огляду 12,9 град.). Камери підключаємо до обчислювального модуля *Raspberry Pi5* за допомогою інтерфейсу *CSI*. Для забезпечення високої швидкодії СТЗ використовуємо бібліотеку програмних компонентів для роботи із цифровими камерами *Picamera*2 для мови програмування *Python* [19].

Результати експериментів, проведених у світлу пору доби за нормальних погодних умов із маркерами розміром 150x150 мм, наведені у табл. 1 та табл. 2. При цьому результати отримані під час спостереження орієнтиру у різних частинах кадру камери: не ближче та не далі 20% за кожним виміром до межі кадру. Для розрахунку максимальної дальності та статистичних параметрів алгоритмів використано вибірку з результатів обробки останніх 10 кадрів циклу роботи СТЗ.

***Таблиця* 1.**

Центральна зона кадру

№ з/п	Камера	Максимальна дальність ідентифікації, м	Похибка вимірювання відстані, %	Похибка вимірювання положення, %	Стандартне відхилення алгоритму дальності, м	Стандартне відхилення алгоритму положення, град.	Швидкодія на *RPi*5, кадрів/с
1	5 Мп, 160 град.	14,3	3	5	0,05	0,69	8
2	8 Мп, 12,9 град.	110	1	3	0,01	0,05	5

Як очевидно, із отриманих даних, для ширококутної камери очікувано спостерігається суттєве погіршення показників визначення у периферійній зоні кадру, що обумовлене геометричним спотворенням зображення камерою із широким кутом зору. У той же час для довгофокусного об’єктива відмінностей в ідентифікації маркерів у різних частинах кадру практично не спостерігається. Тому, під час використання ширококутної камери у СТЗ, використовуємо обмеження фактичного поля зору центральною зоною кадру. Для камери з об’єктивом із полем зору 160 град. достатньо виключити із аналізу зображення зону з полями 20% від кожного виміру кадру.

Зважаючи на показники швидкодії, отримані із використанням промислового обчислювального модуля *Raspberry Pi5*, можна зробити висновок, що алгоритми для створення [17] та ідентифікації [18] маркерів можуть працювати із достатньою швидкодією, в тому числі, й на більш доступних апаратних компонентах, таких як *LuckFox Pico Ultra* або *Raspberry Pi Zero* 2*W*, що може суттєво зменшити вартість СТЗ.

***Таблиця* 2.**

Периферійна зона кадру

№ з/п	Камера	Максимальна дальність ідентифікації, м	Похибка вимірювання відстані, %	Похибка вимірювання положення, %	Стандартне відхилення алгоритму дальності, м	Стандартне відхилення алгоритму положення, град.	Швидкодія на *RPi*5, кадрів/с
1	5 Мп, 160 град.	12,1	14	17	0,18	1,33	8
2	8 Мп, 12,9 град.	109	2	3	0,01	0,05	5

Висновки

Визначено, що ефективна відстань роботи запропонованого методу автономного визначення відстані до орієнтира, а також визначення його кутового положення, складає 12 м та 109 м для ширококутної та довгофокусної камер з похибкою 1-5%. Ці результати дозволяють рекомендувати використання фідуціарних маркерів та запропонований метод визначення відстані до орієнтира та його кутового положення для використання у новітніх системах технічного зору з низькою собівартістю.

Список використаної літератури

1. *M. M. Kabir*, *J. R. Jim*, and *Z. Istenes*, “Terrain detection and segmentation for autonomous vehicle navigation: A state-of-the-art systematic review,” Information Fusion, vol. 113, 2025, Art. no. 102644. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.inffus.2024.102644 .
2. *S. Lin*, *F. Yu*, *Z. Zhou*, and *C. Li*, “UAV Swarm Cooperative Navigation Technology in Partial GNSS-Denied Environment,” in Advances in Guidance, Navigation and Control. ICGNC 2024, L. Yan, H. Duan, and Y. Deng, Eds. Singapore: Springer, 2025, vol. 1354. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-981-96-2268-9_93 .
3. *O. V. Zbrutskyi*, *T. V. Yaremenko*, and *A. O. Krasnopolskyi*, “Evaluation of the effectiveness of object recognition and image segmentation methods for machine vision systems of small unmanned aerial vehicles,” Mechanics of Gyroscopic Systems, vol. 47, pp. 63–82, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.20535/0203-3771472024307705 .

4. *C.-C. Chang*, *Y.-M. Ooi*, *Y.-C. Chen*, and *J.-W. Lin*, "Positioning Improvement with Multiple GPS Receivers Based on Shallow Asymmetric Neural Network," Electronics, vol. 13, no. 546, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/electronics130305465 .
5. *T. Mohammad*, "Using ultrasonic and infrared sensors for distance measurement," World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 51, pp. 293–299, 2009.
6. *D. Lee*, *M. Jung*, *W. Yang* et al., "LiDAR odometry survey: recent advancements and remaining challenges," Intell. Serv. Robotics, vol. 17, pp. 95–118, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s11370-024-00515-8 .
7. *D. Damianos* and *G. Girardin*, High-End Inertial Sensors for Defense, Aerospace & Industrial Applications, Market and Technology Report, Yole Development, 2020.
8. *O. M. Kompaniiets*, "Adaptive navigation of a drone swarm in uncertain environments," Collected Scientific Works of Kharkiv National Air Force University, vol. 4(82), pp. 58–64, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.30748/zhups.2024.82.07 .
9. *K. O. Movchan*, "Modern navigation strategies for drones in GPS-denied scenarios," Scientific Notes of V.I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences, vol. 35(74), no. 5, pt. 1, pp. 201–208, 2024.
10. *A. M. Rekavandi*, *L. Xu*, *F. Boussaid*, *A.-K. Seghouane*, *S. Hoefs*, and *M. Bennamoun*, "A Guide to Image- and Video-Based Small Object Detection Using Deep Learning: Case Study of Maritime Surveillance," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 26, no. 3, pp. 2851–2879, Mar. 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TITS.2025.3530678 .
11. *S. Garrido-Jurado*, *R. Muñoz-Salinas*, *F. J. Madrid-Cuevas*, and M. J. Marín-Jiménez, "Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion," Pattern Recognit., vol. 47, no. 6, pp. 2280–2292, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.01.005 .
12. A. S. Dovhopolyi, A. V. Zahirskyi, and O. V. Zbrutskyi, "Fundamentals of developing an autonomous control system for ground robotic platforms operating at short ranges," Mechanics of Gyroscopic Systems, vol. 47, pp. 5–16, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.20535/0203-3771472024307756 .
13. *A. S. Dovhopolyi* and *A. V. Zahirskyi*, "Conceptual framework and method for creating a high-mobility autonomous ground robotic platform," Mechanics of Gyroscopic Systems, vol. 48, pp. 5–14, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.20535/0203-3771482024317860 .
14. *R. Szeliski*, Computer Vision: Algorithms and Applications, 2nd ed. Springer, 2022.
15. *N. Otsu*, "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol. 9, pp. 62–66, 1979.

16. Open-Source Computer Vision Library. [Online]. Available: https://github.com/opencv/opencv . [Accessed: May 24, 2025].
17. *S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, F. J. Madrid-Cuevas*, and *R. Medina-Carnicer*, "Generation of fiducial marker dictionaries using Mixed Integer Linear Programming," Pattern Recognit., vol. 51, pp. 481–491, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.patcog.2015.09.023 .
18. *F. J. Romero-Ramirez, R. Muñoz-Salinas*, and *R. Medina-Carnicer*, "Speeded up detection of squared fiducial markers," Image Vis. Comput., vol. 76, pp. 38–47, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.imavis.2018.05.004
19. Raspberry Pi Ltd, Picamera2 Manual. [Online]. Available: https://datasheets.raspberrypi.com/camera/picamera2-manual.pdf. [Accessed: May 24, 2025].