УДК 629.7

DOI: https://doi.org/10.20535/0203-3771492025334103

О. В. Гегельський[1], *PhG студент*, **В. В. Аврутов**[2], *д.т.н., проф.*

СПОСОБИ НАВІГАЦІЇ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ У СКЛАДНИХ УМОВАХ ЗОВНІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Ua У роботі розглянуті сучасні підходи до навігації БПЛА в умовах відсутності *GPS*-сигналу, зосереджуючись на чотирьох ключових технологіях: інтеграції *GNSS-IMU*, навігації на основі *LIDAR*, геомагнітній навігації та системах навігації на основі комп'ютерного зору. В огляді аналізуються принципи, методології та обмеження кожного підходу. Інтеграція *GNSS-IMU* розглядається через призму різних архітектур комплексування з акцентом на їх вразливості до перешкод та спуфінгу. Навігація на основі *LIDAR* досліджується з наголосом на обробці хмар точок та її обмеженнях у різних умовах середовища. Огляд висвітлює останні розробки в галузі геомагнітної навігації, включаючи військові застосування та інтеграцію машинного навчання, визнаючи проблеми калібрування та роздільної здатності даних. Навігація на основі комп’ютерного зору аналізується через еволюцію методів *SLAM* та візуальної одометрії, з особливою увагою до застосування глибокого навчання та візуальної навігації відносно місцевості. Огляд підсумовує, що кожна технологія має свої переваги та обмеження, що свідчить про необхідність багатосенсорного підходу до комплексування даних, адаптованого до конкретних умов використання.

En This literature review examines contemporary approaches to UAV navigation in GPS-denied environments, focusing on four key technologies: GNSS-IMU integration, LIDAR-based navigation, geomagnetic navigation, and vision-based navigation systems. The review analyzes the principles, methodologies, and limitations of each approach. GNSS-IMU integration is discussed through the lens of different coupling architectures, highlighting their vulnerabilities to interference and spoofing. LIDAR-based navigation is examined with emphasis on point cloud processing and its limitations in various environmental conditions. The review explores recent developments in geomagnetic navigation, including military applications and machine learning integration, while acknowledging challenges in calibration and data resolution. Vision-based navigation is analyzed through the evolution of SLAM and visual odometry techniques, with particular attention to deep learning applications and visual terrain relative navigation. The review concludes that each technology has distinct advantages and limitations, suggesting that robust UAV navigation likely requires a multi-sensor fusion approach adapted to specific operational requirements.

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

Вступ

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) відіграють вирішальну роль у сучасних технологічних застосуваннях, починаючи від військової розвідки і закінчуючи екологічним моніторингом та міською логістикою. Надійна навігація на відкритому повітрі залишається ключовою проблемою через різні умови середовища, перешкоди сигналу та потребу в точному позиціонуванні [1], [2]. Протягом останніх років було розроблено численні методи для покращення навігації БПЛА, використовуючи досягнення в супутникових системах, комп'ютерному зору та штучному інтелекті [3].

Сучасні підходи до навігації БПЛА здебільшого покладаються на інтеграцію глобальних навігаційних супутникових систем (*GNSS*) з інерціальними вимірювальними модулями (*IMU*) [7]. Однак ці системи мають обмеження у середовищах, де сигнали GNSS можуть бути недоступними або ненадійними, включаючи міські каньйони, ліси та території з високим рівнем електромагнітних перешкод [16], [17], [19]. У відповідь на ці виклики дослідники розробили альтернативні підходи, такі як *LiDAR*-інерціальна одометрія [24] візуальна навігація [52], [58], [60], геомагнітні методи [37], [39], [45].

Інтеграція різних сенсорних систем залишається важливим напрямком досліджень для забезпечення надійності навігації в різноманітних умовах експлуатації [26]. Особливо перспективними є підходи, що поєднують візуальну інформацію з іншими даними для створення надійних гібридних систем навігації [48], [53], [66], які показують значне покращення продуктивності в порівнянні з одномодальними методами.

У цій оглядовій статті досліджуються основні методи навігації БПЛА у відкритому середовищі, аналізуються їх переваги, обмеження та потенціал для інтеграції. Розглядаючи останні дослідження та технологічні досягнення, ця стаття має на меті висвітлити поточний стан навігації БПЛА та визначити майбутні напрямки для покращення автономності та надійності.

Постановка задачі

Задача даного дослідження полягає у всебічному огляді сучасних методів навігації БПЛА у відкритому середовищі з метою аналізу їх ефективності, обмежень та визначення перспективних напрямків їх подальшого розвитку.

Класифікація способів навігації БПЛА

Методи навігації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) можна класифікувати за різними критеріями, такими як тип використовуваних датчи-

ків, принцип роботи, точність, надійність та інтеграція з іншими системами. З огляду на ці критерії, можна виділити наступні основні способи навігації БПЛА:

Об'єднання GNSS/IMU: Цей метод поєднує в собі переваги Глобальної навігаційної супутникової системи (*GNSS*) та інерціального вимірювального блоку (*IMU*), використовуючи фільтр Калмана для об'єднання даних із обох систем та отримання більш точних та надійних оцінок параметрів навігації [1].

Навігація на основі LiDAR: цей метод використовує LiDAR (Light Detection and Ranging) для створення тривимірної карти навколишнього середовища та визначення положення БПЛА щодо цієї карти [2].

Геомагнітна навігація: цей метод використовує вимірювання магнітного поля Землі для визначення положення БПЛА [3].

Візуальна навігація: цей метод використовує зображення з камер для визначення положення БПЛА відносно навколишнього середовища або карти на основі зображень.

Кожен з цих методів має свої переваги і недоліки, і вибір оптимального методу залежить від конкретного застосування і вимог до точності, надійності і вартості. Для досягнення найкращих результатів часто використовуються комбінації різних методів [4].

Об'єднання *GNSS/IMU*

Концепція інтеграції сигналів *GNSS* із сигналами *Inertial Measurement Unit* (*IMU*) виникла практично одночасно з системою *GPS* [5] і значно розвинулася протягом наступних десятиліть [6, 7, 8].

Інтеграція *GNSS* та *IMU* використовує їх взаємодоповнюючі характеристики: *GNSS* забезпечує високу точність протягом тривалих періодів, але погано працює в короткострокових сценаріях, тоді як *IMU* забезпечує надійні короткострокові оцінки, але страждає від дрейфу через кумулятивні помилки інтегрування при розрахунку зміщення за даними прискорення [9].

Сучасні методи інтеграції використовують фільтрацію Калмана для оцінки похибок ГНСС за допомогою вимірювань *IMU*. Мохамед і Шварц [10] зробили значний внесок, проаналізувавши проблему інтеграції *GPS*/*IMU* та запропонувавши архітектуру фільтра Кальмана, яка стала основою для багатьох сучасних рішень. Гровз [11] представив всебічний аналіз різних підходів до інтеграції, включаючи слабко зв'язані та тісно зв'язані архітектури *GNSS*/*IMU*.

У слабо зв'язаному інтегруванні (рис. 1) вимірювання *GNSS* (швидкість і положення) використовуються для побудови комплементарного вектора вимірювання для фільтра Калмана, який оцінює похибку *IMU* [12]. У тісно зв'язаних системах (рис. 2) вимірювання ГНСС використовуються

для оцінки псевдодіапазону, несучої фази або ефекту Доплера, які потім використовуються для побудови вектора вимірювання [13].

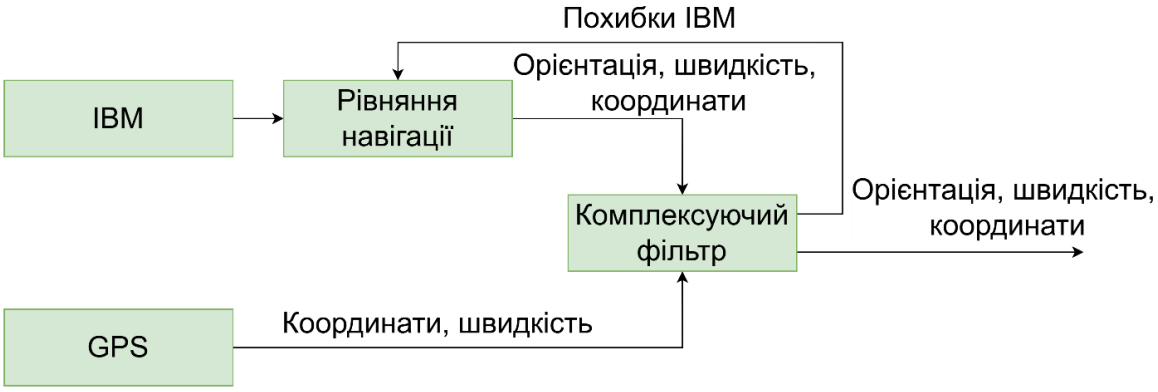

Рис. 1. Структурна схема слабо зв'язаного комплексування *GNSS/IMU*

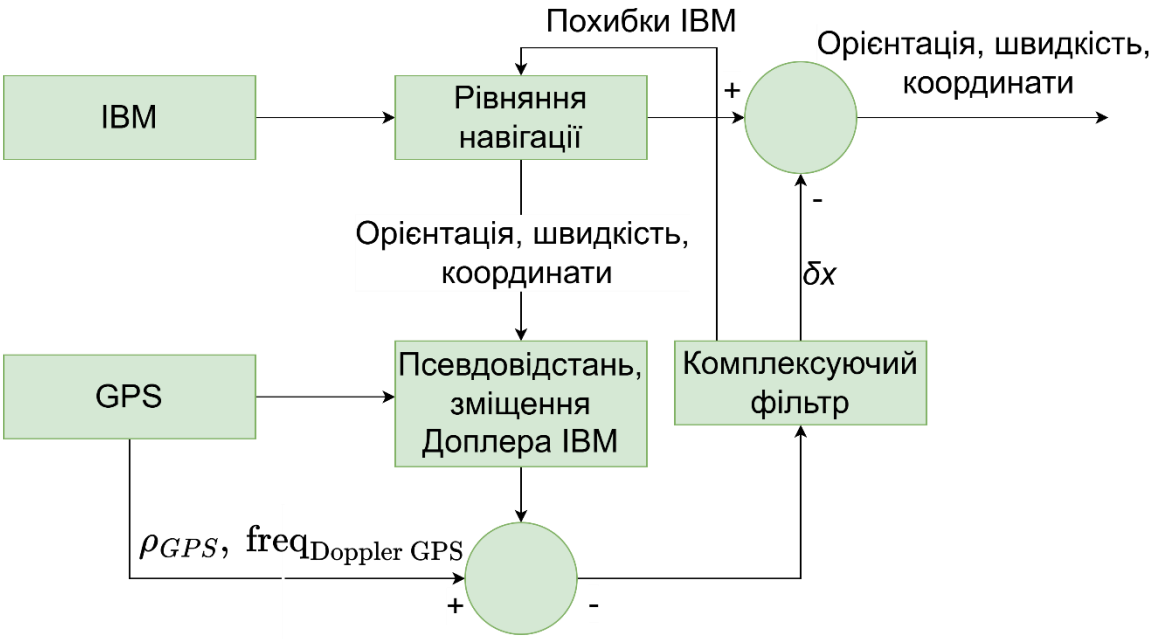

Рис. 2. Структурна схема щільно зв'язаного комплексування *GNSS/IMU*

Petovello [14] розширив цю класифікацію, виявивши архітектуру з надщільним зв’язком, де *IMU* безпосередньо допомагає у відстеженні сигналу *GPS*. *Godha* [15] показав, що щільно зв’язані системи краще працюють в умовах поганої видимості супутника, тоді як надщільно зв’язані системи демонструють найкращу стійкість до перешкод.

Значною вразливістю цих систем є їхня сприйнятливість до навмисних перешкод, таких як глушіння та спуфінг *GPS*. *Humphreys et al*. [16] провели одне із перших всебічних досліджень вразливості до підміни *GPS*, продемонструвавши можливість обману цивільних *GPS*-приймачів за допомогою відносно простого обладнання. *Psiaki* і *Humphreys* [17] запропо-

нували методи виявлення спуфінгу, засновані на верифікації криптографічного сигналу.

У системах зазвичай використовуються недорогі та легкі датчики, такі як *GPS*-приймачі, акселерометри, гіроскопи та магнітометри. Експериментальні дослідження Шмідта і Філліпса [18] показали, що навіть високоякісні *IMU* тактичного рівня можуть накопичувати похибки позиціонування на швидкості 1-2 км/год без поправки *GPS*. Нещодавні дослідження були зосереджені на мінімізації впливу навмисних перешкод за допомогою шифрування сигналу, статистичного аналізу сигналу та адаптивних антенних систем [19].

Навігація за допомоги *LIDAR*

LIDAR (*Light Detection and Ranging*) — це технологія, яка використовує лазерні імпульси для вимірювання відстаней до об'єктів шляхом аналізу часу, необхідного для повернення відбитого сигналу. Ця інформація створює тривимірну модель середовища, що використовується для навігації та картографування, з широким застосуванням у робототехніці та автономних транспортних засобах, включаючи БПЛА [20, 21].

Процес сканування нагадує принцип лазерного далекоміра: система *LIDAR* випромінює лазерні імпульси в задану область. Коли ці імпульси стикаються з перешкодами, частина світла відбивається назад до датчика *LIDAR*. Вимірюючи час повернення кожного лазерного імпульсу та використовуючи постійну швидкість світла, *LIDAR* обчислює відстань до цілі [22], створюючи хмару точок, яка ефективно представляє 3*D*-форму та особливості місцевості або об’єкта.

Механізми візуалізації *LIDAR* поділяються на три основні категорії: механічний *LIDAR*, скануючий твердотільний *LIDAR* та *flash-LIDAR* із архітектурою без сканування. Що стосується принципів вимірювання, то основними типами є імпульсний час польоту (*ToF*) *LIDAR*, амплітудно-модульована безперервна хвиля (*AMCW*) *LIDAR* і частотно-модульована безперервна хвиля (*FMCW*) *LIDAR* [23].

Як і інтеграція *GPS-IMU*, методи *LIDAR*-інерціальної одометрії поділяються на слабо зв’язані та тісно зв’язані категорії. Метод слабо зв’язаних незалежно оцінює стан кожного датчика, поєднує ці стани з ваговими коефіцієнтами, а потім визначає стан об'єкта [24]. Тісно пов’язаний метод використовує вимірювання з усіх датчиків одночасно для оцінки стану робота, потенційно забезпечуючи більш точну одометрію, але вимагаючи більших обчислювальних ресурсів [25, 26, 27].

До ключових обмежень навігації *LIDAR* належать:

– Великий обсяг даних, що вимагає значних обчислювальних ресурсів для обробки в режимі реального часу [28].

– Спотворення руху, особливо на високих швидкостях щодо частоти збору даних датчиком [29].
– Обмежене поле зору та радіус дії.
– Проблеми в плоских умовах, які не мають чітких рисунків.
– Погіршення працездатності при несприятливих погодних умовах [30, 31].
– Складні вимоги до калібрування при роботі з декількома датчиками [32, 33].

Ці обмеження стають особливо критичними в додатках БПЛА, де робота в режимі реального часу має важливе значення для ефективного функціонування, а умови навколишнього середовища можуть значно вплинути на точність навігації.

Геомагнітна навігація

Точне вимірювання геомагнітних полів є основоположним для автономної навігації в геомагнітних середовищах. Останні досягнення у фізиці та електронних технологіях призвели до постійного вдосконалення виявлення магнітного поля. Крім того, біоміметичні дослідження сприяли розробці геомагнітних сенсорів, натхненних магнітними сенсорними механізмами тварин [34, 35, 36].

Алгоритм геомагнітного узгодження становить основу технології геомагнітної навігації. Основний метод узгодження передбачає збір дискретних геомагнітних даних під час руху носіїв, поєднання їх з інерціальною навігаційною системою та визначення найближчої траєкторії руху [37].

Алгоритм *MAGCOM* (*geomagnetic contour matching*), широко застосовуваний в інженерній практиці, відрізняється простотою реалізації [38]. Він використовує геомагнітний датчик для отримання польових даних, інерціальну навігаційну систему та геомагнітну опорну карту (рис. 3). Алгоритм визначає схожість між двома наборами даних і визначає оптимальний напрямок руху за допомогою критеріїв кореляції [39].

Серед останніх подій:

Проект *MAGNAV* ВПС США і Массачусетського технологічного інституту, із використанням спеціально розроблених алгоритмів позиціонування і локалізації за допомогою геомагнітних полів в льотних випробуваннях *F*-16 [41].

Успішна демонстрація магнітної навігації в реальному часі на *C*-17*A Globemaster* III у травні 2023 року, що стало першим застосуванням цієї технології в реальному сценарії на літаку Міністерства оборони США [42].

Дослідження Куенки [43] щодо поєднання глибокого навчання із фільтрами частинок Рао-Блеквелла для покращення геомагнітної навігації в імітованих повітряних місіях.

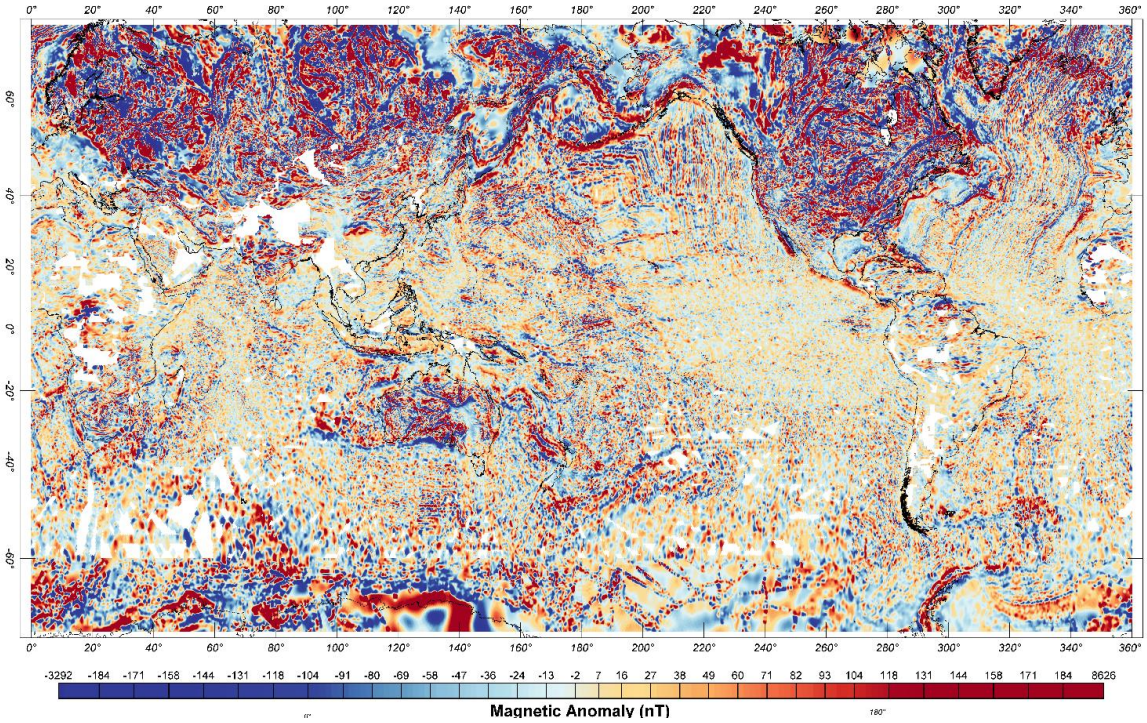

Рис. 3. Карта геомагнітних аномалій *EMAG*2 (*v*3) [40]

До ключових обмежень належать:

Розробка алгоритму і точність:

– Методи ітераційного зіставлення контурів можуть не забезпечити необхідної точності у нестабільних умовах [44].
– Обчислювальні задачі з фільтрами частинок у навігації у реальному часі.
– Калібрування платформи:
– Перешкоди металевої конструкції літака під час магнітних вимірюваннь.
– Складний процес калібрування для нейтралізації магнітних впливів [45].
– Обмеження набору даних:
– Багато існуючих карт застаріли.
– Нерівномірне покриття карт з високою роздільною здатністю в усьому світі.
– Обмеження роздільної здатності супутникових даних, що впливають на точність навігації [46].

Ці проблеми особливо впливають на навігацію в регіонах, де детальні магнітні варіації мають вирішальне значення для точного позиціонування.

Візуальна навігація

У зв'язку із обмеженнями попередніх систем, підходи до навігації на основі комп'ютерного зору стали вирішальними для БПЛА [47]. Методи локалізації на основі зору використовують різні типи візуальної інформації, включаючи виявлення горизонту, відстеження орієнтирів та виявлення країв [48], при цьому системи класифікуються як монокулярні, бінокулярні, тринокулярні або всеспрямовані [49].

З'явилося два основних підходи до оцінки положення на основі зору. Перший – це візуальна одночасна локалізація та картографування (*VSLAM*) [50], яка спрямована на побудову узгодженої карти навколишнього середовища з одночасним визначенням місця розташування БПЛА. Відомі реалізації включають паралельне відстеження та картографування (*PTAM*) [51] та *MonoSLAM* [52]. Другим підходом є візуальна одометрія (VO) [53], яка оцінює орієнтацію та положення кадр за кадром, вперше запропонована Ністером [54] за допомогою кутів Харріса [55] та консенсусу випадкової вибірки (*RANSAC*) [56].

Значні досягнення включають розробку напівпрямої візуальної одометрії (*SVO*) від *Forster et al*. [57], що забезпечує високу точність з обчислювальною ефективністю, а також орієнтовану швидку та обертову коротку одночасну локалізацію та картографування (*ORB-SLAM*) *Mur* та *Tardós* [58], що пропонує рішення у режимі реального часу для відстеження, картографування та замикання циклів. *Engel* тощо. [59] внесли свій внесок. *Large-Scale Direct SLAM* (*LSD-SLAM*), що працює безпосередньо з інтенсивністю зображення, а *Wang et al*. [60] представили *DeepVO*, використовуючи рекурентні нейронні мережі для оцінки руху.

Візуальна відносна навігація місцевості (*VTRN*) є ще однією важливою розробкою, яка зіставляє зображення з камер із картами зображень із географічною прив'язкою, щоб забезпечити навігацію без дрейфу навіть без зовнішніх сигналів позиціонування [61]. Останні досягнення в цій галузі включають підходи глибокого навчання для сезонної інваріантності [62] та представлення на основі *CNN* (*Convolutional Neural Networks*) для обробки перспективних змін, досягаючи середніх помилок локалізації до 8 метрів у сценаріях без *GPS* на висоті 0,2 км [63].

Поточні дослідження зосереджені на вдосконаленні роботи в умовах поганого освітлення [64], інтеграції семантичної інформації [65], підвищенні енергоефективності для вбудованих систем [66] та вирішенні проблеми відновлення масштабу в монокулярних системах [67]. Ці розробки продовжують підвищувати точність і надійність навігаційних систем для БПЛА на основі зору, особливо в умовах без *GPS*.

Висновки

Цей огляд методів навігації БПЛА ілюструє, що жоден єдиний підхід не забезпечує повного рішення для середовищ без *GPS*. Хоча інтеграція *GNSS-IMU* забезпечує надійну роботу в стандартних умовах, вона залишається вразливою до перешкод і спуфінгу; Системи *LIDAR* забезпечують точне картографування навколишнього середовища, але борються з обчислювальними вимогами та погодними умовами; геомагнітна навігація демонструє перспективи для стійкого до перешкод позиціонування, але стикається з проблемами роздільної здатності та калібрування; А системи, засновані на зорі, демонструють вражаючі можливості в багатофункціональних середовищах, але можуть бути обмежені умовами освітлення та сезонними змінами. Ці результати свідчать про те, що подальший розвиток надійних алгоритмів навігації БПЛА є необхідним і сучасним і полягає в інтелектуальному поєднанні кількох взаємодоповнюючих технологій з адаптивними системами, здатними використовувати сильні сторони кожного методу, компенсуючи їхні індивідуальні слабкі сторони.

Список використаної літератури

1. *M. N. Cahyadi, T. Asfihani, H. F. Suhandri* and *S. C. Navisa*, "Analysis of GNSS/IMU Sensor Fusion at UAV Quadrotor for Navigation," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1276, no. 1, p. 012021, 2023.
2. *Ľ. Kovanič, B. Topitzer, P. Peťovský, P. Blišťan, M. B. Gergeľová,* and *M. Blišťanová* "Review of Photogrammetric and Lidar Applications of UAV," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 11, p. 6732, 2023.
3. *S. Wang, Z. Qiu, P. Huang, X. Yu, J. Yang,* and L. Guo, "A Bioinspired Navigation System for Multirotor UAV by Integrating Polarization Compass/Magnetometer/INS/GNSS," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 8, pp. 8526-8536, 2023.
4. *Y. Chang, Y. Cheng, U. Manzoor,* and *J. Murray*, "A review of UAV autonomous navigation in GPS-denied environments," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 170, p. 104533, 2023.
5. *D. B. Cox, B. A. Kriegsman, W. M. Stonestreet, J. Kishel,* and *L. V. Calicchia*, "Feasibility Study of GPS-Inertial Navigation for Helicopters and Study of Advanced GPS Signal Processing Techniques," Draper Laboratory Report R-981, Cambridge, MA, 1978.
6. *D. B. Cox*, "Inertial Integration of GPS," in *Global Position System - Papers Published in Navigation*, vol. 1, IMU. Institute of Navigation, Alexandria, VA, 1980.
7. *M. Grewal* et al., *Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration*. J. Wiley & Sons, 2007.

8. *G. Schmidt*, "IMU/GPS Technology Trends," in *NATO RTO Lecture Series, RTO-EN-SET-116, Low-Cost Navigation Sensors and Integration Technology*, 2010.
9. *V. V. Melesko* and *O. I. Nesterenko*, *Platformless Inertial Navigation Systems [Electronic resource]: Textbook*. Kirovohrad: POLYMED-Service, 2011.
10. [10] A. H. Mohamed and K. P. Schwarz, "Adaptive Kalman filtering for IMU/GPS," *Journal of Geodesy*, vol. 73, no. 4, pp. 193-203, 1999.
11. P. D. Groves, *Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems*. Artech House, 2013.
12. *G. Falco*, *M. Pini*, and *G. Marucco*, "Loose and Tight GNSS/INS Integrations: Comparison of Performance Assessed in Real Urban Scenarios," *Sensors*, vol. 17, no. 2, p. 255, 2017.
13. *G. Zhang* and *X. Xu*, "Implementation of tightly coupled GPSI/INS navigation algorithm on DSP," in *Proceedings of the 2010 International Conference on Computer Design and Applications*, Qinhuangdao, China, June 25-27, 2010.
14. *M. G. Petovello*, "Real-time integration of a tactical-grade IMU and GPS for high-accuracy positioning and navigation," University of Calgary, 2003.
15. S. Godha, "Performance evaluation of low cost MEMS-based IMU integrated with GPS for land vehicle navigation application," M.S. thesis, University of Calgary, 2006.
16. *T. E. Humphreys*, *B. M. Ledvina*, *M. L. Psiaki*, *B. W. O'Hanlon*, and *P. M. Kintner Jr*, "Assessing the spoofing threat: Development of a portable GPS civilian spoofer," in *Proceedings of the ION GNSS international technical meeting of the satellite division*, vol. 56, pp. 2314-2325, 2008.
17. *M. L. Psiaki* and *T. E. Humphreys*, "GNSS spoofing and detection," *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 6, pp. 1258-1270, 2016.
18. *G. T. Schmidt* and *R. E. Phillips*, "IMU/GPS Integration Architectures," in *NATO RTO Lecture Series, RTO-EN-SET-116*, 2011.
19. *O. Sushych*, *O. Pohurelskyi*, *V. Konin*, *O. Kutsenko*, *I. Prykhodko*, and *T. Maliutenko*, "Performance Analysis of Intentional Interference on Multi-GNSS Receivers," 2024.
20. *D. Lee*, *M. Jung*, *W. Yang* et al., "LiDAR odometry survey: recent advancements and remaining challenges," *Intel Serv Robotics*, vol. 17, pp. 95-118, 2024.
21. *C. Weitkamp*, *LiDAR: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*, vol. 102. Springer Science & Business, Cham, 2006.
22. *M. Khader* and *S. Cherian*, "An introduction to automotive lidar," Texas Instruments, 2020.
23. *R. Roriz*, *J. Cabral*, and *T. Gomes*, "Automotive lidar technology: a survey," *IEEE Trans Intell Transp Syst*, vol. 23, no. 7, pp. 6282-6297, 2022.

24. *W. Dai*, *B. Tian*, and *H. Chen*, "Tightly-coupled Lidar-inertial Odometry and Mapping in Real Time," in *2020 39th Chinese Control Conference (CCC)*, Shenyang, China, pp. 3258-3263, 2020.
25. *Y. Gao* and *L. Zhao*, "VE-LIOM: A Versatile and Efficient LiDAR-Inertial Odometry and Mapping System," *Remote Sensing*, vol. 16, no. 15, p. 2772, 2024.
26. *J. Zou*, *L. Shao*, *H. Tang* et al., "Lmapping: tightly-coupled LiDAR-inertial odometry and mapping for degraded environments," *Intel Serv Robotics*, vol. 16, pp. 583-597, 2023.
27. T. *Shan*, *B. Englot*, *D. Meyers*, *W. Wang*, *C. Ratti*, and *D. Rus*, "LIO-SAM: Tightly-coupled Lidar Inertial Odometry via Smoothing and Mapping," in *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Las Vegas, NV, USA, pp. 5135-5142, 2020.
28. *N. Boguspayev*, *D. Akhmedov*, *A. Raskaliyev*, *A. Kim*, and *A. Sukhenko*, "A Comprehensive Review of GNSS/INS Integration Techniques for Land and Air Vehicle Applications," *Appl. Sci.*, vol. 13, p. 4819, 2023.
29. *A. Al-Nuaimi*, *W. Lopes*, *P. Zeller* et al., "Analyzing lidar scan skewing and its impact on scan matching," in *2016 international conference on indoor positioning and indoor navigation (IPIN)*, pp. 1-8, 2016.
30. *M. Bijelic*, *T. Gruber*, and *W. Ritter*, "A benchmark for lidar sensors in fog: Is detection breaking down?" in *2018 IEEE intelligent vehicles symposium (IV)*, pp. 760-767, 2018.
31. *W. Sun*, *Y. Hu*, *D. G. MacDonnell* et al., "Technique to separate lidar signal and sunlight," *Opt Express*, vol. 24, no. 12, pp. 12949-12954, 2016.
32. *J. Domhof*, *J. F. Kooij*, and *D. M. Gavrila*, "An extrinsic calibration tool for radar, camera and lidar," in *2019 international conference on robotics and automation (ICRA)*, pp. 8107-8113, 2019.
33. *X. Liu*, *C. Yuan*, and *F. Zhang*, "Targetless extrinsic calibration of multiple small FoV LiDARs and cameras using adaptive voxelization," *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 71, pp. 1-12, 2022.
34. *Q. Cheng*, *J. Sun*, *Y. Ge*, *L. Xue*, *H. Mao*, *L. Zhou*, and *J. Zhao*, "Bionic Magnetic Sensor Based on the MagR/Cry4 Complex-Configured Graphene Transistor with an Integrated On-Chip Gate," *ACS Sens.*, vol. 8, pp. 793-802, 2023.
35. *Q. Cheng*, *Y. Ge*, *B. Lin*, *L. Zhou*, *H. Mao*, and *J. Zhao*, "Capacitive Bionic Magnetic Sensors Based on One-Step Biointerface Preparation," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 16, pp. 6789-6798, 2024.
36. *H. Shi*, *R. Tang*, *Q. Wang*, and *T. Song*, "Performance Evaluation of a Bioinspired Geomagnetic Sensor and Its Application for Geomagnetic Navigation in Simulated Environment," *Sensors*, vol. 24, p. 6477, 2024.
37. *H. Zhao*, *N. Zhang*, *L. Xu*, *P. Lin*, and *Y. Liu*, "Summary of Research on Geomagnetic Navigation Technology," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 769, p. 032031, 2021.

38. *Q. Wang* and *J. Zhou*, "A parallel approach to geomagnetic gradient bionic navigation method," *Journal of Northwestern Polytechnical University*, vol. 36, no. 04, pp. 611-617, 2018.
39. *Q. Luo*, *M. Yu*, *X. Yan*, *Z. Zhou*, *C. Wang*, and *B. Liu*, "A Geomagnetic/Odometry Integrated Localization Method for Differential Robot Using Real-Time Sequential Particle Filter," *Sensors (Basel)*, vol. 24, no. 7, p. 2120, 2024.
40. National Centers for Environmental Information, "Earth Magnetic Model and Anomaly Grid 2 [Electronic resource]," NOAA National Centers for Environmental Information, 2023. [Online]. Available: https://www.ncei.noaa.gov/products/earth-magnetic-model-anomaly-grid-2. [Accessed Feb. 12, 2025].
41. Forbes, "U.S. Air Force to Test MAGNAV Navigation Using Earth's Magnetic Anomalies," 2020. [Online]. Available: https://www.gpsworld.com/us-air-force-to-explore-navigating-with-magnetism/. [Accessed Feb. 12, 2025].
42. USAF, "MagNav project successfully demonstrates real-time magnetic navigation," 2023. [Online]. Available: https://www.af.mil/News/Article-Display/Article/3408951/magnav-projectsuccessfully-demonstrates-real-time-magnetic-navigation/. [Accessed Feb. 12, 2025].
43. *A. Cuenca*, "Artificial intelligence-assisted inertial geomagnetic passive navigation," Ph.D. dissertation, Embry-Riddle Aeronautical University Scholarly Commons, 2023. [Online]. Available: https://commons.erau.edu/edt/773. [Accessed Feb. 12, 2025].
44. *N. Xu* and *L. Wang*, "Geomagnetic Matching Navigation for Aircraft Based on Improved Iterative Closest Contour Point Algorithm," in *2020 International Conference on Sensing, Measurement & Data Analytics in the era of Artificial Intelligence (ICSMD)*, IEEE, pp. 33-38, 2020.
45. *A. J. Canciani*, "Magnetic navigation on an F-16 aircraft using online calibration," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 58, no. 1, pp. 420-434, 2021.
46. *A. Canciani* and *J. Raquet*, "Absolute positioning using the earth's magnetic anomaly field," *NAVIGATION, Journal of the Institute of Navigation*, vol. 63, no. 2, pp. 111-126, 2016.
47. *M. I. Pavel*, *S. Y. Tan*, and *A. Abdullah*, "Vision-Based Autonomous Vehicle Systems Based on Deep Learning: A Systematic Literature Review," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 14, p. 6831, 2022.
48. *L. Mu*, *S. Cao*, *Y. Zhang*, *X. Zhang*, *N. Feng*, and *Y. Zhang*, "Autonomous Landing Guidance for Quad-UAVs Based on Visual Image and Altitude Estimation," *Drones*, vol. 9, no. 1, p. 57, 2025.
49. *A. González-Sieira*, *D. Cores*, *M. Mucientes* and *A. Bugarín*, "Autonomous Navigation for UAVs managing motion and sensing uncertainty," *Robot. Auton. Syst.*, vol. 126, p. 103455, 2020.

50. *J. Maier* and *M. Humenberger* "Movement Detection Based on Dense Optical Flow for Unmanned Aerial Vehicles," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, no. 2, 2013.
51. *S. Wang*, *X. Lv*, *J. Li*, and *D. Ye*, "Coarse Semantic-Based Motion Removal for Robust Mapping in Dynamic Environments," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 74048-74064, 2020.
52. *A. J. Davison*, *I. D. Reid*, *N. D. Molton* and *O. Stasse* "MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 29, no. 6, pp. 1052-1067, 2007.
53. *X. Xie*, *T. Yang*, *Y. Ning*, *F. Zhang* and *Y. Zhang* "A Monocular Visual Odometry Method Based on Virtual-Real Hybrid Map in Low-Texture Outdoor Environment," *Sensors*, vol. 21, no. 10, p. 3394, 2021.
54. *D. Nistér*, *O. Naroditsky*, and *J. Bergen* "Visual odometry for ground vehicle applications," *J. Field Robot.*, vol. 23, pp. 3-20, 2006.
55. *C. G. Harris* and *M. J. Stephens* "A Combined Corner and Edge Detector," in *Proceedings of the Alvey Vision Conference*, Manchester, UK, Aug. 31-Sept. 2, 1988.
56. *Y. Jiao*, *Y. Wang*, *X. Ding*, *B. Fu*, *S. Huang*, and *R. Xiong* "2-Entity Random Sample Consensus for Robust Visual Localization: Framework, Methods, and Verifications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 5, pp. 4519-4528, 2021.
57. *C. Forster*, *M. Pizzoli*, and *D. Scaramuzza* "SVO: Fast semi-direct monocular visual odometry," in *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 15-22, 2014.
58. *R. Mur-Artal* and *J. D. Tardós*, "ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 33, no. 5, pp. 1255-1262, 2017.
59. *J. Engel*, *T. Schöps*, and *D. Cremers*, "LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM," in *European Conference on Computer Vision*, pp. 834-849, Springer, 2014.
60. *S. Wang*, *R. Clark*, *H. Wen*, and *N. Trigoni*, "DeepVO: Towards end-to-end visual odometry with deep recurrent convolutional neural networks," in *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 2043-2050, 2017.
61. *Y. Cheng* and *A. Ansar*, "Landmark based position estimation for pinpoint landing on Mars," in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4470-4475, 2005.
62. *A. T. Fragoso*, *C. T. Lee*, *A. S. McCoy*, and *S.-J. Chung*, "A seasonally invariant deep transform for visual terrain-relative navigation," *Science Robotics*, vol. 6, no. 55, pp. 3320, 2021.
63. *H. Goforth* and *S. Lucey*, "GPS-Denied UAV Localization using Pre-existing Satellite Imagery," in *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Montreal, QC, Canada, pp. 2974-2980, 2019.

64. *N. Yang*, *R. Wang*, *X. Gao*, and *D. Cremers*, "Challenges in monocular visual odometry: Photometric calibration, motion bias, and rolling shutter effect," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 4, pp. 2878-2885, 2018.
65. *R. O. Chavez-Garcia*, *L. E. Sucar*, and *A. Reyes-Ballesteros*, "Semantic SLAM for UAV urban environment understanding," in *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1353-1358, 2018.
66. *P. Li*, *T. Qin*, *B. Hu*, *F. Zhu*, and *S. Shen*, "Monocular visual-inertial state estimation for mobile augmented reality," in *2017 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 11-21, 2017.
67. *G. Qiao*, *G. Xiong*, *X. Qiu*, and *Z. Li*, "Online UAV trajectory generation and autonomous navigation based on monocular vision," in *2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 1091-1096, 2019.