

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Києво-Могилянська академія»
Факультет інформатики
Кафедра інформатики

Курсова робота
освітній ступінь – бакалавр

на тему: **«СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ОПТИЧНОЇ НАВІГАЦІЇ»**

Виконав: студент 3-го року
навчання,
Освітньої програми «Комп'ютерні
науки», 122

Моргун Антон Дмитрович

Керівник Глибовець А.М.,
Доктор технічних наук,
декан Факультету Інформатики

Рецензент

Курсова робота захищена
з оцінкою

Секретар ЕК

«____» _____
20____ р.

Київ – 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1: Теоретичні основи оптичної навігації	
1.1 Поняття та принципи оптичної навігації	6
1.2 Історичний розвиток технологій оптичної навігації	8
1.3 Основні компоненти та елементи оптичних навігаційних систем	10
1.4 Порівняння оптичної навігації з іншими навігаційними системами ...	12
РОЗДІЛ 2: Сучасні технології та підходи до реалізації оптичної навігації	
2.1 Використання комп'ютерного зору в оптичній навігації	15
2.2 Застосування штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання	16
2.3 Оптична навігація на основі SLAM	18
2.4 Інтеграція оптичної навігації з інерціальними та GNSS-системами ...	22
РОЗДІЛ 3: Алгоритми реалізації оптичної навігації та розробка класифікаційної моделі	
3.1 Аналіз і порівняння методів виділення та відстеження ключових точок	24
3.2 Побудова карти середовища	28
3.3 Реалізація моделі для класифікації об'єктів на зображенні	32
РОЗДІЛ 4: Практичне застосування та перспективи розвитку оптичної навігації	
4.1 Оптична навігація в автономному транспорті	36
4.2 Використання в аерокосмічній галузі та дронах	37
4.3 Перспективи використання в робототехніці та військовій техніці	40
4.4 Тенденції та майбутні напрями розвитку оптичної навігації	43
Висновки по роботі.....	46
Література	48

Вступ

У сучасному світі точна навігація має вирішальне значення у багатьох сферах діяльності — від цивільної авіації та автомобільного транспорту до військової техніки і досліджень космосу. В умовах стрімкого розвитку технологій класичні навігаційні засоби, такі як GPS та інерціальні системи, доповнюються новими рішеннями, серед яких особливу роль відіграє оптична навігація. Вона забезпечує високу точність орієнтації та локалізації об'єктів у просторі навіть в умовах обмеженого доступу до супутникових сигналів чи наявності перешкод. Оптична навігація використовує інформацію, отриману з камер, датчиків зору, лазерів та інших оптичних пристроїв, що дозволяє системам орієнтуватися у складному та динамічному середовищі. З огляду на швидкий прогрес у галузі комп'ютерного зору, штучного інтелекту й обчислювальної техніки, дослідження сучасних підходів до оптичної навігації є надзвичайно актуальним і перспективним напрямом.

Актуальність теми зумовлена зростанням потреби у точних, автономних та надійних системах навігації в умовах, де традиційні методи втрачають ефективність. Це особливо важливо в умовах сучасного бою, в міській інфраструктурі з великими перешкодами для супутникових сигналів, а також у сфері дослідження планетарних поверхонь, де неможливо використати GPS. Крім того, оптична навігація демонструє високий потенціал при використанні в автономних транспортних засобах, безпілотниках та мобільних роботах. Інноваційність та адаптивність цих систем дає змогу забезпечити точне позиціонування в реальному часі, що відкриває широкі горизонти для практичного застосування в майбутньому.

Метою дослідження є аналіз сучасних підходів до реалізації оптичної навігації, їхніх технічних особливостей, переваг, недоліків і можливостей застосування в різних галузях.

У межах реалізації мети **завдання дослідження** полягають у:

- визначенні теоретичних засад оптичної навігації;

- розгляді та аналізі основних методів і технологій, які використовуються в сучасних оптичних системах;
- дослідженні прикладів практичного застосування таких систем;
- аналізі перспектив і тенденцій розвитку оптичної навігації в контексті технологічного прогресу.

Об’єкт дослідження: навігаційні системи, що базуються на оптичних принципах.

Предмет дослідження: сучасні підходи до реалізації та використання технологій оптичної навігації.

Методи дослідження, використані в роботі, включають аналіз наукової та технічної літератури, порівняльний аналіз методів і підходів навігації, систематизацію отриманої інформації, а також узагальнення практичних прикладів застосування оптичної навігації.

Структура роботи: робота складається зі вступу, чотирьох розділів, кожен з яких містить підрозділи, висновків та списку використаних джерел. У першому розділі розкрито теоретичні засади оптичної навігації, у другому — проаналізовано сучасні підходи й технології її реалізації, у третьому — поглиблено розглянуто сучасні алгоритми і методи для реалізації оптичної навігації, реалізовано та протестовано розроблену модель для класифікації об’єктів на зображенні, а в четвертому — охарактеризовано практичні напрями застосування та окреслено перспективи розвитку. Загальний обсяг роботи – 49 сторінок.

Перелік прийнятих скорочень

CNN – Згорткові нейронні мережі

GNSS - глобальна навігаційна супутникова система

GPS - глобальна система позиціонування

LiDAR - Світлове виявлення та визначення дальності

ROS - операційна система для роботів

SLAM - одночасна локалізація та побудова карти

TOF - час польоту

VIO - Visual-Inertial Odometry

БПЛА - Безпілотний літальний апарат

ІВО - інерціальні вимірювальні одиниці

ІНС - Інерційна навігаційна система

МН – Машинне навчання

ШІ – Штучний інтелект

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОПТИЧНОЇ НАВІГАЦІЇ

1.1. Поняття та принципи оптичної навігації

Оптична навігація є однією з форм автономного визначення положення та орієнтації об'єкта у просторі, яка базується на аналізі зображень і візуальної інформації, отриманої за допомогою оптичних сенсорів, таких як камери, лазери, стереокамери або інші пристрої комп'ютерного зору. На відміну від традиційних навігаційних систем, що покладаються на зовнішні джерела сигналу, наприклад супутникові системи позиціонування (GPS, GLONASS), або на дані інерціальних сенсорів, оптична навігація використовує інформацію безпосередньо з навколишнього середовища, що робить її цінною в умовах обмеженого або відсутнього доступу до зовнішніх джерел навігаційного сигналу.

Суть оптичної навігації полягає в аналізі змін візуальної інформації, яку сприймає сенсор у процесі руху об'єкта. Отримані зображення або світлові сигнали обробляються з використанням алгоритмів комп'ютерного зору, які дозволяють виділяти ключові точки, лінії, контури або інші характеристики об'єктів навколо. Зіставлення цих візуальних ознак з попередньо зібраними або поточними даними дозволяє визначити зміну положення або орієнтації у просторі. Одним з базових принципів оптичної навігації є здатність до візуальної класифікації та слідкування за орієнтирами — це можуть бути як природні об'єкти середовища: будівлі, дерева, транспорт, так і спеціально створені мітки чи оптичні структури.

Оптична навігація може здійснюватися як у двовимірному, так і в тривимірному просторі. У двовимірному варіанті система може, наприклад, аналізувати лише горизонтальне переміщення в площині, як це часто буває у мобільній робототехніці. У тривимірному варіанті враховується ще й вертикальна складова руху, що особливо важливо для БПЛА, дронів або систем орієнтації в складному архітектурному середовищі.

Ключовим технічним моментом у реалізації оптичної навігації є перетворення візуальної інформації у координати та маршрути. Для цього

застосовуються різні алгоритми, наприклад, методи візуальної одометрії, які дозволяють обчислити пройдений шлях шляхом аналізу зміни зображення у часі, або технології SLAM, які дають змогу одночасно будувати карту середовища та визначати власне місцезнаходження на цій карті.

Принцип дії оптичної навігації також передбачає циклічність та постійну адаптацію: з кожним новим кадром або потоком даних система оновлює свої уявлення про середовище та положення в ньому. Це робить навігацію не лише точною, але й гнучкою — вона здатна реагувати на динамічні зміни в навколишньому середовищі, наприклад, появу нових об'єктів або зміну освітлення.

Особливу увагу слід приділити розділенню між активною та пасивною оптичною навігацією. У пасивному варіанті використовуються звичайні камери, які фіксують наявне освітлення, а в активному — джерела світла або лазерні випромінювачі, що дозволяє отримувати глибину зображення та точну тривимірну модель навколишнього простору.

Важливо підкреслити, що оптична навігація є не лише технологічною системою, а й складним інтегрованим процесом, який вимагає точного узгодження між сенсорними пристроями, обчислювальними потужностями та алгоритмічним забезпеченням. Саме вдале поєднання цих елементів визначає ефективність та точність навігаційної системи.

Отже, поняття оптичної навігації охоплює цілу сукупність технологій, що дозволяють орієнтуватися у просторі за допомогою зорових даних. Принципи її роботи ґрунтуються на виявленні, обробці та інтерпретації візуальної інформації, що відкриває широкі можливості для автономної навігації в умовах, де інші методи втрачають свою ефективність або є недоступними.

1.2. Історичний розвиток технологій оптичної навігації

Історія розвитку оптичної навігації охоплює тривалий період, починаючи ще з епохи перших спроб орієнтації за візуальними орієнтирами, і аж до сучасних високотехнологічних рішень, що використовують алгоритми штучного інтелекту, комп'ютерного зору та тривимірного моделювання. Попри те, що поняття «оптична навігація» у його сучасному технічному значенні з'явилося відносно нещодавно, сам принцип орієнтації за візуальними ознаками має глибоке коріння в історії людства.

На ранніх етапах розвитку цивілізації навігація здійснювалась переважно візуальними методами — за допомогою небесних тіл, рельєфу місцевості, розташування водних об'єктів та інших природних елементів. Наприклад, мореплавці античності використовували зірки, Сонце, обриси берегів та маяки як основні орієнтири для визначення курсу. Це були прообрази пасивної оптичної навігації, де джерелом інформації виступала природна візуальна сцена.

Справжній технологічний прорив у напрямку оптичної навігації стався у XX столітті з розвитком авіації, космічної техніки та автоматизованих систем управління. У період Другої світової війни активно розроблялись і застосовувались прилади, що дозволяли пілотам літаків орієнтуватися за візуальними приладами та камерами. Наприклад, у бомбардувальниках використовувались оптичні приціли та навігаційні панелі, які дозволяли підвищити точність польоту за рахунок візуального виявлення цілей.

Подальший розвиток став можливим завдяки впровадженню телевізійних і цифрових камер, які з кінця 1960-х — початку 1970-х років почали застосовуватись у космічних місіях. Однією з перших систем, що наближалась за принципом до сучасної оптичної навігації, була система орієнтації космічного апарата «Аполлон» на Місяці, яка використовувала відеокамери та візуальні мітки для посадки модуля. Камери передавали зображення поверхні, які аналізувалися для визначення швидкості, висоти та положення апарата відносно поверхні.

У 1980–1990-х роках із появою мікропроцесорів та розвитку алгоритмів комп’ютерного зору почали формуватися перші експериментальні системи візуальної навігації для робототехніки. Перші мобільні роботи, як-от відомий проект Stanford Cart, здійснювали просту навігацію в лабораторному середовищі, використовуючи чорно-білі камери та елементарні алгоритми розпізнавання контурів і перешкод. Хоча ці системи мали низьку швидкість, вони заклали фундамент для подальших досліджень.

У 2000-х роках відбувається справжній прорив у цій галузі завдяки розвитку алгоритмів SLAM, які дозволяли системам одночасно орієнтуватися в невідомому просторі та будувати його карту. Одними з піонерів у цьому напрямку були дослідники з Массачусетського технологічного інституту та Оксфордського університету. Оптичні SLAM-системи на базі стереозору або монокулярної камери стали основою для сучасних автономних дронів, автомобілів з автопілотом та мобільних роботів.

Паралельно розвивалися системи доповненої реальності, які використовують принципи оптичної навігації для інтеграції віртуальних об’єктів у реальний простір. Для прикладу, такі пристрої, як Microsoft HoloLens або системи візуального трекінгу у смартфонах, здатні точно визначати положення користувача в кімнаті, не використовуючи жодного зовнішнього навігаційного сигналу.

Сучасний етап розвитку технологій оптичної навігації тісно пов’язаний із застосуванням штучного інтелекту, зокрема глибинного навчання, що дозволяє системам самостійно вчитися розпізнавати об’єкти, маршрути та адаптувати поведінку до змін середовища. Сьогодні ці технології успішно застосовуються у військових системах, дронах, роботах доставки, автономних транспортних засобах та навіть у хірургії — для точного позиціонування інструментів за візуальними орієнтирами.

Таким чином, історичний розвиток оптичної навігації демонструє послідовний перехід від примітивної орієнтації за природними об’єктами до високоточних автоматизованих систем, які використовують складні обчислення,

алгоритми візуалізації та елементи машинного навчання. Ця еволюція продовжується, і перспективи її розвитку залишаються надзвичайно широкими та багатообіцяючими для численних галузей людської діяльності.

1.3. Основні компоненти та елементи оптичних навігаційних систем

Сучасні оптичні навігаційні системи є складними технічними комплексами, які інтегрують у собі низку апаратних і програмних компонентів, що забезпечують здатність орієнтуватися у просторі завдяки візуальній інформації. Їхня структура може варіюватися залежно від конкретного призначення системи: автономна робототехніка, безпілотні літальні апарати, розумні транспортні засоби, системи доповненої реальності, тощо. Однак у загальному вигляді можна виділити базові елементи, без яких функціонування оптичної навігації було б неможливим.

Першим ключовим компонентом є система збирання зображень, тобто візуальні сенсори. До них належать камери різних типів: монокулярні (звичайна одна камера), стереокамери (пара камер для створення ефекту об'ємного бачення), RGB-D камери (які окрім кольорового зображення передають і глибину сцени) та спеціалізовані камери глибини, наприклад, TOF. Від вибору камери залежить точність отриманих даних, дальність огляду, якість розпізнавання об'єктів, здатність працювати за слабкого освітлення або в темряві. У багатьох системах використовуються також інфрачервоні камери або тепловізори, що дозволяють здійснювати навігацію в умовах недостатньої видимості.

Другим базовим елементом є блок попередньої обробки зображень. Камери, встановлені на мобільному об'єкті, постійно генерують потік зображень, які потребують швидкої та точної обробки. На цьому етапі застосовуються алгоритми фільтрації шуму, нормалізації освітлення, виділення контурів, ключових точок, виявлення змін у кадрах тощо. Завдяки цим процедурам

система отримує стислу, але інформативну модель простору, на основі якої надалі здійснюється орієнтація.

Третім важливим компонентом є модуль локалізації. Його завдання — визначення точного місцезнаходження об'єкта в просторі. Залежно від типу системи це може відбуватися за допомогою виявлення знайомих орієнтирів, алгоритмів SLAM, або через використання маркерів, наприклад, QR-кодів чи спеціальних AR-маркерів. У складніших випадках локалізація здійснюється шляхом порівняння вхідного зображення з попередньо побудованою картою середовища.

Четвертим елементом є система побудови карти середовища — модуль картографування, який відповідає за створення та оновлення віртуальної моделі простору на основі отриманої візуальної інформації. Карта може бути двовимірною або тривимірною, містити дані про об'єкти, перешкоди, вільні зони, траєкторії руху тощо. Її точність залежить від якості візуального сенсора, алгоритмів обробки та розмірів середовища. У деяких випадках система формує карту в реальному часі, що дозволяє адаптувати маршрут до динамічних змін у середовищі.

Наступним важливим компонентом є модуль планування та прийняття рішень. Він базується на аналізі побудованої карти та даних про поточне положення, визначаючи оптимальний маршрут руху або наступну дію. У цьому модулі часто реалізуються алгоритми машинного навчання, що дозволяють системі самостійно адаптувати свою поведінку до змінних умов — наприклад, обходити динамічні перешкоди, діяти у разі відсутності оптимального освітлення, орієнтуватися в разі втрати необхідних міток або змінювати траєкторію у разі виникнення непередбачуваних обставин.

Додатково, багато сучасних систем використовують допоміжні сенсори для підвищення точності навігації. Серед них — інерційні вимірювальні модулі, гіроскопи, акселерометри, датчики глибини сцени, ультразвукові чи лазерні далекоміри LiDAR. Хоча вони не належать безпосередньо до оптичних

пристроїв, інтеграція з візуальною інформацією значно підвищує надійність та точність системи.

Останнім критично важливим елементом є програмне забезпечення, яке координує роботу всіх зазначених компонентів і модулів. Воно реалізує алгоритми збору, аналізу, синтезу інформації, моделювання середовища та контролю руху. У деяких випадках використовуються операційні системи реального часу або спеціалізовані фреймворки для робототехніки, наприклад, ROS.

Таким чином, оптична навігаційна система — це багаторівнева архітектура, в якій кожен елемент виконує специфічну функцію, але всі разом вони забезпечують автономне орієнтування та керування рухом об'єкта в реальному середовищі на основі аналізу візуальних даних.

1.4. Порівняння оптичної навігації з іншими навігаційними системами

Оптична навігація, незважаючи на стрімкий розвиток упродовж останніх десятиліть, залишається лише однією з кількох основних технологій, що застосовуються для орієнтації у просторі. Для повного розуміння її переваг, недоліків та особливостей доцільно розглянути її у порівнянні з іншими популярними навігаційними системами, зокрема GNSS, INS, радіолокаційними, а також навігацією на основі радарів і лідарів.

Однією з найширше використовуваних систем навігації є глобальна навігаційна супутникова система, до якої належать GPS, GLONASS, Galileo та BeiDou. Основна перевага GNSS полягає у високій точності визначення координат у відкритому просторі та глобальному покритті. Проте їх ефективність суттєво знижується у закритих або урбанізованих середовищах, де сигнал може бути заблокований або спотворений будівлями, мостами, деревами чи іншими перешкодами. Крім того, супутникова навігація вразлива до перешкод, наприклад, глушіння сигналу або спуфінгу, що робить її ненадійною в умовах військових конфліктів або в складних погодних умовах.

Інерційні навігаційні системи, побудовані на основі гіроскопів і акселерометрів, здатні визначати зміну положення об'єкта у просторі без зовнішніх джерел сигналу. Вони особливо ефективні в умовах, де GNSS недоступний. Проте інерційні системи схильні до накопичення помилок з плином часу, що потребує регулярного коригування з використанням інших джерел навігаційних даних. У цьому контексті оптична навігація часто виступає як комплементарна технологія, яка дозволяє уточнювати або компенсувати похибки INS.

Радіолокаційні та ультразвукові системи використовуються здебільшого у локальних середовищах, де необхідно точно вимірювати відстань до об'єктів. Радіолокація добре працює у складних умовах освітлення, наприклад, у темряві або при сильній запиленості. Однак роздільна здатність таких систем зазвичай нижча, ніж у візуальних сенсорів, що ускладнює ідентифікацію об'єктів. До того ж радіохвильові системи менш інформативні з погляду аналізу середовища, адже не дозволяють точно розпізнавати текстури, форми чи кольори.

Окрему нішу займають лідарні системи, що використовують лазерне сканування для створення тривимірної карти простору. Вони забезпечують високу точність та деталізацію, особливо у порівнянні з оптичними системами у частині визначення глибини. Проте лідари мають високу вартість, є енергомісткими та не завжди добре працюють у дощ чи сильний туман, через заломлення світлових променів. Водночас, камери, які використовуються в оптичній навігації, є відносно недорогими та компактними, що робить їх привабливим вибором для масового використання, зокрема в дронах і роботах.

Оптична навігація вирізняється також здатністю надавати не лише просторові, а й семантичні дані. Це означає, що система здатна не просто визначати координати або форму об'єктів, а й розпізнавати їх тип, призначення, розміри тощо. Для прикладу, за допомогою використання згорткових нейронних мереж, які дозволяють ефективно аналізувати зображення, виявляти об'єкти та їхні межі, камера може розрізнити пішохода від автомобіля, тоді як той самий

лідар — ні. Така здатність особливо важлива в умовах міського середовища чи при використанні навігації в системах автономного водіння.

Проте слід визнати і обмеження оптичної навігації. Найсуттєвішими є залежність від освітлення, чутливість до погодних умов: дощ, туман, засвічення, а також необхідність великих обчислювальних ресурсів для обробки зображень у реальному часі. Також, камера сама по собі не надає точних метричних даних без складної обробки або додаткових сенсорів, наприклад, глибини.

Узагальнюючи, можна сказати, що оптична навігація не є універсальним рішенням, однак вона є надзвичайно ефективною у поєднанні з іншими навігаційними системами. Саме тому сучасні технології навігації дедалі частіше будуються за принципом мультисенсорного підходу, де камери, GNSS, IBO, радары та лідари працюють одночасно, доповнюючи сильні сторони одне одного та мінімізуючи недоліки.

РОЗДІЛ 2. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПІДХОДИ ДО РЕАЛІЗАЦІЇ ОПТИЧНОЇ НАВІГАЦІЇ

2.1. Використання комп'ютерного зору в оптичній навігації

Комп'ютерний зір є однією з ключових технологій, що забезпечує ефективне функціонування сучасних систем оптичної навігації. Він являє собою галузь штучного інтелекту, яка займається обробкою, аналізом та інтерпретацією зображень і відео, отриманих за допомогою оптичних сенсорів — камер. Завдяки комп'ютерному зору навігаційні системи здатні не лише бачити навколишнє середовище, а й розуміти його структуру, об'єкти, межі, напрямки руху та просторову геометрію.

Оптична навігація з використанням комп'ютерного зору базується на принципі візуального сприйняття середовища та подальшій обробці отриманих візуальних даних у реальному часі. Це дозволяє визначати координати рухомого об'єкта в просторі, оцінювати його орієнтацію, виявляти перешкоди, будувати карти середовища, визначати траєкторії руху та здійснювати корекцію навігаційних помилок. Комп'ютерний зір значно підвищує автономність і надійність оптичних систем, оскільки дозволяє адаптуватися до зміни умов навколо без потреби в зовнішньому позиціонуванні.

Ключовими завданнями комп'ютерного зору у контексті оптичної навігації є розпізнавання об'єктів, відстеження їхнього руху, виявлення їх особливостей, оцінка глибини сцени та побудова карти середовища. Для прикладу, у процесі автономного переміщення БПЛА система за допомогою камер і алгоритмів комп'ютерного зору фіксує навколишній простір, ідентифікує горизонт, розпізнає та класифікує об'єкти, визначає найближчі перешкоди та коригує курс у разі їх виявлення. У наземній робототехніці аналогічний підхід дозволяє машині слідувати заданим маршрутом або обирати оптимальний шлях на основі даних про поверхню, об'єкти або інші рухомі одиниці.

Системи комп'ютерного зору використовують різні алгоритми для обробки зображень. Серед них — алгоритми виявлення контурів, розпізнавання шаблонів, оптичного потоку та глибини за допомогою стереозору або монозору, а також сучасні методи глибокого навчання, які дозволяють підвищити точність та швидкість прийняття рішень. Нейронні мережі здатні навчатися на великих обсягах зображень, обчислювати та розпізнавати складні шаблони в режимі реального часу, що робить їх незамінними у задачах високої складності — наприклад, в ідентифікації дорожньої розмітки, знаків або пішоходів у міському середовищі.

Особливе значення мають так звані VIO-системи, які поєднують комп'ютерний зір із даними інерційних сенсорів. Це дозволяє підвищити точність відстеження траєкторії руху, компенсувати похибки, викликані змінами освітлення або втратою візуальних орієнтирів. Наприклад, якщо камера тимчасово не здатна розпізнати об'єкти через затемнення або яскраве світло, інерційні дані допомагають підтримувати стабільну навігацію.

Незважаючи на потужні можливості, застосування комп'ютерного зору також має певні виклики. Основними з них є залежність від умов освітлення, високе навантаження на обчислювальні ресурси та потреба в точному калібруванні камер. Крім того, складні сцени, велика кількість рухомих об'єктів або відсутність чітких контурів можуть ускладнити процес інтерпретації даних. Проте постійний розвиток обчислювальних платформ, зокрема спеціалізованих процесорів і відеочіпів для штучного інтелекту, дозволяє подолати багато з цих обмежень.

2.2. Застосування штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання

У сучасних оптичних навігаційних системах штучний інтелект та алгоритми машинного навчання відіграють провідну роль, істотно розширюючи функціональні можливості традиційних методів. Вони дозволяють навігаційним

системам не просто аналізувати візуальну інформацію, а й навчатися з досвіду, адаптуватися до нових умов та ухвалювати рішення на основі складних патернів поведінки об'єктів і середовища.

Алгоритми МН здатні обробляти великі обсяги візуальних даних у реальному часі, виокремлювати суттєві особливості сцени, класифікувати об'єкти, передбачати траєкторії руху, визначати зони ризику та приймати рішення на основі отриманої інформації. Це особливо актуально в динамічних середовищах, де системі необхідно оперативно реагувати на зміну обстановки.

Одним із найбільш поширених підходів є використання згорткових нейронних мереж, які дозволяють ефективно аналізувати зображення, виявляти об'єкти та їхні межі. CNN успішно застосовуються в системах автономного водіння, де камера фіксує дорожню сцену, а нейромережа визначає пішоходів, транспортні засоби, дорожні знаки, сигнали світлофора і відповідно реагує та коригує маршрут. Наприклад, компанія Tesla активно використовує алгоритми глибинного навчання для побудови віртуального оточення на основі даних з камер автомобіля, що дає змогу реалізувати автономне керування без використання GPS або лідарів.

Іншим прикладом є технології компанії NVIDIA, яка розробила платформу Drive PX Pegasus — суперкомп'ютер для самокерованих авто. У ньому поєднуються обробка відео з камер, глибоке навчання та алгоритми прийняття рішень. Це дозволяє транспортному засобу не лише орієнтуватися у просторі, а й передбачати поведінку інших учасників руху.

У сфері дронів і безпілотних літальних апаратів ШІ дозволяє дронам виконувати навігацію у складних середовищах без GPS, наприклад, у приміщеннях, під землею чи в міських ущільнених умовах. Наприклад, система Skydio Autonomy, яка використовується в дронах американської компанії Skydio, застосовує багат шарову нейронну архітектуру, що дозволяє БПЛА самостійно та доволі швидко орієнтуватися у просторі, уникаючи зіткнень з перешкодами, навіть якщо об'єкти динамічно змінюють своє положення.

Штучний інтелект, теж, активно використовується в оптичній навігації для роботів, які працюють у складних середовищах — таких як склади, промислові об'єкти або космічні станції. Наприклад, робот Perseverance, що діє на Марсі, використовує візуальну навігацію та елементи ШІ для самостійного планування маршруту на поверхні планети, аналізуючи зображення рельєфу й обираючи безпечні шляхи руху.

Крім цього, штучний інтелект застосовується у сфері медицини для навігації автономних пристроїв, які виконують діагностичні або хірургічні завдання. Наприклад, роботи-хірурги, оснащені камерами, можуть використовувати нейромережі для точної локалізації анатомічних структур під час операцій.

2.3. Оптична навігація на основі SLAM

Оптична навігація на основі технології SLAM є одним із найбільш передових та ефективних підходів у сучасній робототехніці та системах автономного переміщення. Суть методу полягає в тому, що пристрій: робот, дрон, транспортний засіб або інша автономна система, за допомогою камер та інших оптичних сенсорів одночасно і будує карту навколишнього середовища, і визначає своє місцезнаходження відносно цієї карти в реальному часі.

Цей метод ідеально підходить для навігації у незнайомих, динамічних або GPS-недоступних середовищах. Основу візуального SLAM складають алгоритми аналізу потоку зображень із камери. Вони ідентифікують ключові точки та відстежують їхнє переміщення на послідовних кадрах, оцінюють зміщення камери в просторі, визначаючи її вектор руху і на основі цього поступово формують карту середовища.

Одним із яскравих прикладів є використання V-SLAM в дронах компанії DJI, зокрема моделі DJI Mavic Air 2 (рис. 2.1) та DJI Mini 4 Pro. Ці дрони оснащені кількома камерами та сенсорами, які дають змогу створювати тривимірну модель навколишнього простору і точно позиціонувати себе в ньому. Фото карти

навігації, сформованої дронами в реальному польоті, часто демонструють складні маршрути з обліком перешкод, дерев, будівель або людей — такі зображення чудово ілюструють застосування V-SLAM на практиці.



Рис. 2.1 Дрон «DJI Mavic Air 2»

Ще один важливий приклад — роботи-пилососи, зокрема iRobot Roomba j7+ (рис. 2.2), які використовують V-SLAM для побудови карти приміщення, уникнення зіткнень та ефективної маршрутизації. Користувачі можуть переглядати створену карту своєї квартири через мобільний додаток, що дозволяє візуально представити, як оптична навігація бачить та відтворює простір.



Рис. 2.2 Робот-пилосос «iRobot Roomba j7+»

У галузі автономного транспорту технологія SLAM реалізується, наприклад, в автономних прототипах від Waymo. Окрім лідарів, Waymo використовує оптичні камери та візуальний SLAM для забезпечення орієнтації в міських умовах, коли GPS не забезпечує достатньої точності. Фото таких автомобілів зі встановленими камерами та зображення створених ними 3D-карт дозволяють яскраво продемонструвати, як візуальні дані трансформуються в навігаційні карти.

У військовій сфері SLAM активно використовується в наземних і повітряних безпілотною апаратах для проведення розвідки в закритих або підземних об'єктах. Для прикладу, американські безпілотні апарати Recon Robotics Throwbot 2 (рис. 2.3) здатні переміщатися в замкнутих просторах, як-от тунелі чи будівлі, за допомогою компактною SLAM-системи, що працює на базі відео з камери.



Рис. 2.3 Безпілотний апарат «Recon Robotics Throwbot 2»

Ще один цікавий приклад застосування SLAM-технологій — роботи, що працюють у рамках проекту NASA Perseverance Rover (рис. 2.4), який досліджує

поверхню Марса. Цей марсохід оснащений передовими системами оптичної навігації, що дозволяють йому переміщатися складним рельєфом без прямого керування з Землі. Ровер використовує комбінацію візуальної навігації, одометрії та SLAM для побудови карти ландшафту планети, прокладаючи собі маршрут самостійно. Зображення таких карт і візуалізації траєкторій (рис. 2.4) наочно демонструють можливості SLAM у складних умовах, за відсутності GPS.



Рис. 2.4 NASA Perseverance Rover та приклад візуалізації його маршруту

Також, SLAM знаходить застосування в доповненій і змішаній реальності. Пристрої на кшталт Microsoft HoloLens використовують візуальну SLAM-навігацію для точного розміщення віртуальних об'єктів у реальному просторі. Користувач бачить, як цифрові елементи точно інтегруються у фізичне середовище, і все це — завдяки камерам і алгоритмам SLAM.

Загалом, оптична навігація на основі SLAM є ключовою технологією для широкого спектра сучасних автономних систем — від побутових пристроїв до високотехнологічних космічних місій. SLAM дозволяє машині не просто бачити простір, а й розуміти, де вона перебуває, що її оточує, і як ефективно рухатись у цьому середовищі.

2.4. Інтеграція оптичної навігації з інерціальними та GNSS-системами

Інтеграція оптичної навігації з інерціальними навігаційними системами та глобальними навігаційними супутниковими системами є важливим етапом у підвищенні точності, надійності та стабільності навігаційних рішень у складних умовах середовища. Кожна з цих систем має свої переваги і недоліки, а їх поєднання дозволяє компенсувати слабкі сторони однієї технології за рахунок сильних сторін іншої.

Оптична навігація забезпечує високу роздільну здатність та можливість детального аналізу навколишнього простору на основі візуальних даних, що отримуються з камер. Проте вона чутлива до умов освітлення, погодних змін, туманності, пилу або темряви. Інерціальні системи, побудовані на основі гіроскопів та акселерометрів, навпаки, працюють незалежно від зовнішніх умов, але мають властивість накопичення похибки з часом. GNSS-системи, такі як GPS, GLONASS, Galileo або BeiDou, дають змогу визначати координати з глобальною прив'язкою, але стають недоступними або недостатньо точними у щільній забудові, тунелях, лісистій місцевості чи під землею.

Інтеграція цих трьох систем дає змогу створити так звані гібридні навігаційні комплекси, які поєднують дані з візуальних сенсорів, інерціальних модулів та супутникових приймачів. У такому підході, коли GNSS-сигнал зникає або слабне, навігаційна система переходить на комбіноване використання оптичної навігації та ІНС, що дозволяє зберегти точне позиціонування. Як тільки супутниковий сигнал знову стає доступним, система автоматично калібрує себе, коригуючи накопичені похибки.

Типовим прикладом такої інтеграції є автономні автомобілі, зокрема розробки компаній Tesla, Waymo або Cruise, де на борту функціонують десятки сенсорів: оптичні камери, лідари, інерціальні вимірювальні одиниці та GNSS-приймачі. Камери відповідають за детальну орієнтацію у просторі, виявлення об'єктів та розмітки, GNSS надає абсолютні координати, а ІНС відстежує динаміку руху автомобіля, компенсуючи затримки або втрату інших даних.

У військовій техніці, наприклад в системах автономних бойових безпілотників, інтеграція трьох систем дозволяє працювати в умовах радіоелектронної боротьби або навмисного глушіння GNSS-сигналу. У такому разі візуальна навігація і інерціальні сенсори забезпечують резервне позиціонування.

Ще один яскравий приклад — дослідницькі марсоходи NASA, такі як, вищезгаданий, Perseverance Rover, які не мають доступу до GNSS оскільки на Марсі немає супутників для виявлення локації, але все ж використовують принципи гібридної навігації. Тут IBO і оптична навігація працюють разом для забезпечення точного розташування в просторі під час автономного руху по поверхні планети.

В авіації використовується інтегрована система, що також може комбінувати GNSS, INS і візуальні засоби, зокрема в умовах приземлення в аеропортах з обмеженою навігаційною інфраструктурою або під час польотів у складних метеоумовах.

Узагальнюючи, інтеграція оптичної навігації з інерціальними та супутниковими системами стала стандартом у багатьох галузях — від мобільної робототехніки до безпілотного транспорту, логістики, геодезії та оборонної промисловості. Цей симбіоз демонструє, як сучасні технології здатні адаптуватися до обмежень навколишнього середовища і створювати стабільні системи навігації, здатні працювати у будь-яких умовах.

РОЗДІЛ 3. АЛГОРИТМИ РЕАЛІЗАЦІЇ ОПТИЧНОЇ НАВІГАЦІЇ ТА РОЗРОБКА КЛАСИФІКАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ

У практичній реалізації сучасних систем оптичної навігації широко застосовуються алгоритми комп'ютерного зору, що дозволяють аналізувати зображення з камер для визначення положення та орієнтації об'єкта в просторі. Ключові компоненти таких алгоритмів - це виявлення ключових точок, визначення вектору руху та побудова карти середовища. У цьому розділі буде наведено і порівняно алгоритми і методи, які застосовуються для реалізації оптичної навігації у робототехніці, дронах, автономних транспортних засобах та військовій техніці.

3.1. Аналіз і порівняння методів виділення та відстеження ключових точок

Однією з головних задач в оптичній навігації є виділення та відстеження ключових точок на потоку зображень, що отримуються з камер. Ці точки є унікальними, добре розпізнаваними ділянками зображення, орієнтирами, що дозволяють ефективно визначати положення та орієнтацію об'єкта, обчислювати та визначати вектор руху камери у просторі, порівнюючи рух ключових точок на сусідніх кадрах, а також будувати карту середовища. На практиці застосовуються різні методи для знаходження ключових точок, пропонуємо розглянути найбільш відомі з них, а також порівняти їх за такими критеріями, як точність, швидкість та стійкість до змін в умовах навколишнього середовища.

Методи виділення ключових точок зображень можна умовно поділити на дві категорії: класичні і сучасні. Класичні методи базуються на виявленні точок з високою контрастністю, таких як кути або інші місця, що добре виражені на зображенні. Сучасні методи зазвичай застосовують більш складні математичні моделі для виявлення та опису точок, що можуть зберігати свою інформативність навіть при зміні масштабу, повороті або поганому освітленні.

Метод Харріса (Harris Corner Detection) - це один з класичних алгоритмів, який виявляє кути на зображенні за допомогою аналізу зміни інтенсивності пікселів в оточенні певної точки. Цей метод є швидким, але чутливий до шуму, освітлення та зміни масштабу, тому вимагає додаткової обробки для застосування в складних умовах.

SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) – це метод, який використовує багатомасштабне виділення характеристик для виявлення ключових точок, що залишаються стійкими до змін масштабу та повороту. Алгоритм SIFT створює дескриптори, що дозволяють ефективно порівнювати точки між різними зображеннями. Це робить його надзвичайно популярним для задач, де необхідна інваріантність до змін умов навколишнього середовища. Однак, цей метод потребує складних обчислень і значних ресурсів для обробки в реальному часі.

SURF (Speeded-Up Robust Features) - цей метод є швидшою версією SIFT і здатний виконувати виділення ключових точок за менший час, при цьому зберігаючи велику точність. SURF використовує аналогічний принцип багатомасштабного аналізу, але застосовує інші математичні прийоми для пришвидшення процесу, нехтуючи високою точністю.

ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) – це одна з найбільш популярних альтернатив SIFT і SURF завдяки своїй швидкості та ефективності. Метод поєднує два основних компоненти: детектор FAST для виявлення ключових точок і дескриптор BRIEF для їх опису. ORB ефективно працює в реальному часі і широко застосовується в робототехніці та автономних системах.

Порівнюючи ці методи, можна виділити кілька важливих критеріїв для вибору оптимального алгоритму для конкретної імплементації – швидкість обробки, точність та залежність від освітлення і шуму.

Після того, як ключові точки були виявлені на зображенні, наступним кроком є відстеження їх переміщення на наступних кадрах. Це дозволяє визначити, як змінилася сцена та отримати вектор руху камери, який є важливим для подальшого визначення його орієнтації та траєкторії, особливо в автономних транспортних засобах, дронах та роботах. Існує кілька способів для визначення

вектору руху, серед яких найбільш розповсюдженими є методи оптичного потоку, візуальної одометрії та SLAM, кожен з яких має свої переваги і недоліки та використовується залежно від конкретних вимог до задачі та умов навколишнього середовища.

Оптичний потік – це один з найпоширеніших методів відстеження руху точок між кадрами і визначення вектору руху в подальшому. Він полягає в аналізі змін інтенсивності пікселів на двох зображеннях, отриманих з камери, які були зроблені через невеликий проміжок часу. Припускається, що інтенсивність пікселів на зображенні змінюється пропорційно руху об'єкта, тобто зміщення пікселів між кадрами можна використати для оцінки переміщення камери в просторі.

Один із основних алгоритмів для визначення оптичного потоку - метод Lucas-Kanade, який оцінює швидкість руху пікселів на основі локальних градієнтів зображення. Цей метод є дуже популярним завдяки своїй простоті і швидкості виконання. Алгоритм працює за принципом, що рух на зображенні обумовлений змінами інтенсивності пікселів, і для кожного пікселя обчислюється його переміщення в наступному кадрі. В результаті отримуємо вектор руху для кожної точки, що дозволяє побудувати вектор переміщення камери в цілому.

Інший підхід, що використовується для обчислення оптичного потоку - це метод Horn-Schunck, який використовує глобальну оптимізацію для визначення руху всіх пікселів одночасно. Це дозволяє зменшити вплив шуму та інших артефактів зображення, а також покращити точність вимірювання руху. Однак цей метод потребує більш складних обчислень і більшої кількості ресурсів порівняно з методом Lucas-Kanade, через що займає більше часу для обрахунку.

Оптичний потік має деякі обмеження, зокрема він чутливий до швидкого руху об'єкта та змін в освітленні. Оскільки цей метод базується на аналізі змін інтенсивності пікселів, його точність може значно знижуватись при швидкому русі або в умовах поганого освітлення.

Візуальна одометрія – це ще один метод, що дозволяє оцінити позицію та вектор руху об'єкта шляхом аналізу зміщення між кількома кадрами з камери. Процес візуальної одометрії полягає в тому, що за допомогою алгоритмів виділення та відстеження ключових точок, які були виявлені на першому зображенні, відстежується та зберігається інформація про їхнє положення та переміщення на декількох наступних кадрах. Далі за допомогою методів тріангуляції визначається переміщення цих точок, що дозволяє визначити вектор руху та орієнтацію об'єкта.

Візуальна одометрія застосовується в багатьох автономних системах, зокрема в дронах і роботах, де необхідно точно визначити рух об'єкта в реальному часі без зовнішніх сенсорів. Це дозволяє отримати високу точність в локалізації, оскільки процес одометрії використовує складні обчислення, для забезпечення точних результатів. Однак цей метод має обмеження на великих дистанціях, через накопичення похибок при кожному вимірюванні. Тож, важливим аспектом є також використання різних методів компенсації помилок, таких як фільтрація Калмана, для зменшення впливу погрешностей, що накопичуються при довгих переміщеннях і збереження високої точності результатів на великих відстанях.

Методи, такі як ORB, є найбільш ефективними для реального часу і можуть використовуватися в умовах з обмеженими ресурсами, наприклад, на мобільних платформах або дронах. В свою чергу SIFT і SURF є найбільш точними методами для виявлення та відстеження точок в умовах змін масштабу та повороту, але вони можуть бути надто повільними для реального часу в пристроях, які потребують швидкої реакції. А алгоритми, як-от Harris або KLT, можуть бути чутливими до змін освітлення та шуму на зображеннях. В той час як методи на основі глибоких нейронних мереж, як-от ORB, можуть бути більш стійкими до цих факторів.

3.2. Побудова карти середовища

Побудова карти середовища теж є ключовою складовою сучасних систем оптичної навігації, що забезпечує точне орієнтування об'єкта в просторі та надає йому можливість взаємодіяти з навколишнім середовищем. Для роботів, дронів, автономних транспортних засобів та військової техніки, створення карти середовища дозволяє ефективно орієнтуватися без необхідності у зовнішніх навігаційних системах, таких як GPS, а також забезпечує можливість планування шляху, уникання перешкод та адаптації до змін у середовищі.

Окрім машинного використання, побудовані карти можуть також бути цінним ресурсом і для людей - операторів, аналітиків або військових. Це особливо важливо у випадках, коли традиційні джерела просторової інформації, такі як GPS або супутникові карти, є застарілими або недоступними. Наприклад, у зонах бойових дій інфраструктура зазнає швидких і значних змін, а орієнтири можуть бути втрачені, будівлі швидко руйнуються, дороги перекриваються або блокуються, будуються нові блокпости або польові табори. У таких умовах лише актуальна карта, сформована за допомогою візуальних даних у реальному часі, дозволяє здійснювати ефективне планування і навігацію як для автономних систем, так і для людей, які приймають рішення або керують технікою дистанційно.

Процес побудови карти середовища в сучасних системах оптичної навігації зазвичай складається з кількох етапів, включаючи збір даних, їх обробку, виявлення об'єктів та побудову двовимірної або тривимірної карти. Карти можуть бути створені з використанням різних типів сенсорних даних, зокрема зображень з монокулярних або стереокамер, лазерних сканерів LIDAR або радарів, що визначають відстань до об'єктів у просторі.

Особливої популярності набули методи побудови карти середовища на основі зображень, отриманих з камер у реальному часі. У цьому підході зображення спочатку обробляються за допомогою алгоритмів нормалізації яскравості, вирівнювання масштабу та усунення дисторсії. Важливим кроком є

також попередня сегментація зображення для виділення семантично значущих областей. Наступним етапом є виявлення та відстеження ключових точок та визначення вектору руху за допомогою сучасних детекторів, алгоритми яких було описано в попередньому розділі. Врешті-решт, за допомогою сучасних методів комп'ютерного зору відбувається оцінка структури сцени, виявлення об'єктів на ній та власне побудова двовимірної або тривимірної карти середовища. Пропоную розглянути сучасні підходи до побудови карти середовища.

Ключовим компонентом сучасних систем оптичної навігації є алгоритми одночасної локалізації та картографування SLAM - це метод, який поєднує в собі визначення вектору руху з одночасним створенням карти навколишнього середовища. Цей підхід є важливим для мобільних роботів, автономних транспортних засобів і дронів, які мають орієнтуватися в незнайомому середовищі, не маючи попередньо визначеного маршруту.

Основні методи SLAM можна поділити на візуальне SLAM (V-SLAM), яке використовує камери для збору даних, і LIDAR-SLAM, який використовує лазерні сканери для визначення відстаней до об'єктів. У випадку з візуальним SLAM, камера знімає навколишнє середовище і створює детальну карту, а також визначає рух об'єкта. Алгоритм V-SLAM включає кілька етапів. Перш за все, зображення з камери обробляються для виявлення та відстеження ключових точок. Потім для кожної з цих точок визначається її тривимірне положення в просторі, що дозволяє створювати точну карту.

Одним з популярних алгоритмів для реалізації V-SLAM є ORB-SLAM або LSD-SLAM, які є дуже ефективними і швидкими та дозволяють паралельно будувати карту середовища та визначати положення камери в ньому. Останні досягнення включають інтеграцію глибокого навчання в SLAM системи, що дозволяє краще обробляти динамічні сцени та неструктуровані середовища. Це дозволяє роботам або дронам з високою точністю орієнтуватися в просторі та будувати карти складних середовищ.

Перевагою візуального SLAM є те, що він не вимагає дорогих сенсорів і може працювати за допомогою стандартних камер. Це дозволяє знизити вартість системи, а також спрощує її інтеграцію в різні типи автономних систем.

Однак важливим обмеженням є те, що візуальний SLAM чутливий до змін освітлення, поворотів об'єкта, а також до відсутності явних орієнтирів в середовищі, що може призвести до втрати точності в побудові карти середовища. Також, цей метод використовує складні обчислення, що вимагає наявності потужних процесорів, акумуляторів і великих обсягів пам'яті для обробки великої кількості даних, зібраних в процесі роботи.

Іншим популярним методом для побудови карти середовища є лазерне сканування LIDAR, що здійснюється за допомогою лазерних сканерів, вимірюючи час, за який лазерний промінь відбивається від об'єкта сцени і повертається назад до датчика. LIDAR дає високу точність вимірювання відстані до об'єктів в будь-якому напрямку і може бути використаний для створення детальних тривимірних моделей навколишнього середовища навіть в складних умовах, таких як погана видимість або вночі, коли зображення з камер можуть бути низької якості. Цей метод часто застосовується в автономних транспортних засобах, дронах та для створення карт у міських умовах.

Однак основним обмеженням LIDAR є висока вартість та складність інтеграції з іншими системами, а також обмежена дальність дії в порівнянні з іншими методами сенсорів.

Ще одним методом побудови карти середовища є використання стереокамер для створення тривимірних моделей навколишнього простору. Стереозображення дозволяють отримати глибину кожного об'єкта, порівнюючи зображення з двох камер, що розташовані на відстані одна від одної. Завдяки цьому можна створити точні тривимірні карти середовища, використовуючи алгоритми стереозору, які визначають глибину точок в сцені.

Алгоритм стереозору працює за принципом пошуку відповідностей між пікселями двох зображень, що зняті з різних точок. Визначивши відповідності для кожної пари пікселів, можна обчислити їхнє тривимірне положення та

побудувати карту. Одним із таких алгоритмів є метод блокового співвідношення, який порівнює блоки пікселів з обох зображень для пошуку найбільш ймовірних відповідностей.

Перевагою стереозображень є їхня здатність отримувати точні тривимірні дані без потреби в спеціалізованих і дорогих датчиках, таких як LIDAR. Однак основними недоліками є складність обробки зображень, потреба в калібруванні камер для забезпечення точності вимірювань та чутливість до змін освітлення.

Важливою частиною побудови карти є не лише вимірювання відстаней до об'єктів, а й їхня класифікація. Для цього використовуються алгоритми комп'ютерного зору, такі як глибоке навчання або методи машинного навчання, що дозволяють автоматично визначати та класифікувати типи об'єктів на зображеннях.

Для безпосереднього виявлення об'єктів на зображеннях застосовуються сучасні методи комп'ютерного зору. Класичні підходи на основі HOG-дескрипторів та метода опорних векторів поступово замінюються архітектурами глибокого навчання, зокрема згортковими нейронними мережами (CNN). Ці методи дозволяють не тільки виявляти об'єкти на зображенні з високою точністю, але й класифікувати їх у реальному часі, наприклад, алгоритм YOLO (You Only Look Once), що пропускає зображення через згорткову нейронну мережу лише один раз, при цьому залишаючись досить точним, що критично важливо для семантичного розуміння середовища. Наприклад, дрон може використовувати камеру для виявлення та класифікації об'єктів навколо себе: будівлі, дерева, транспорт, водойми, люди. Ця інформація потім інтегрується в загальну карту середовища, що дозволяє точніше розуміти ситуацію навколо об'єкта та легко планувати маршрут для уникання перешкод як самому пристрою, так і операторам або аналітикам, що керують об'єктом.

Фінальним етапом є побудова тривимірної карти середовища, яка може бути представлена у вигляді хмари точок, воксельної сітки або більш компактного представлення у вигляді графу ключових точок. Сучасні підходи

також включають семантичну сегментацію середовища, де об'єкти не тільки геометрично представлені, але й мають семантичні мітки для позначень будівель, дерев, транспорту, водойм, тощо.

3.3. Реалізація моделі для класифікації об'єктів на зображенні

Класифікація об'єктів у навколишньому середовищі є надзвичайно важливим етапом в оптичній навігації, оскільки саме вона дозволяє системі розуміти, що її оточує. На відміну від простого виявлення контурів або об'єктів, класифікація забезпечує інтерпретацію того, що знаходиться на сцені: автомобіль, танк, літак, будівля, ліс, тощо. Таким чином, від якості класифікаційної моделі залежить ефективність прийняття рішень - чи слід змінити маршрут, сповільнитися, атакувати чи уникнути об'єкта або активувати інші дії автономної системи.

Для навчання моделі була сформована навчальна вибірка, що включала понад 9 000 зображень різних об'єктів, які можуть зустрічатися в реальних умовах під час навігації: транспортні засоби, лісосмуги, будівлі, тощо. В якості навчальної вибірки було використано датасети з відкритої платформи Kaggle.

Ця модель була реалізована за допомогою мови програмування Python із використанням бібліотеки TensorFlow та її високорівневого API — Keras.

Пропоную детальніше подивитися на процес створення та реалізації моделі глибокого навчання для класифікації зображень на дев'ять класів: buildings, forest, mountain, airplane, boat, bus, train, cars, tanks. Зображення було попередньо розподілено по відповідних директоріях train та test, кожна з яких містить підкаталоги, названі відповідно до класу зображень (рис. 3.1). Такий підхід дозволяє автоматично створити мітки класів за допомогою генераторів зображень Keras.

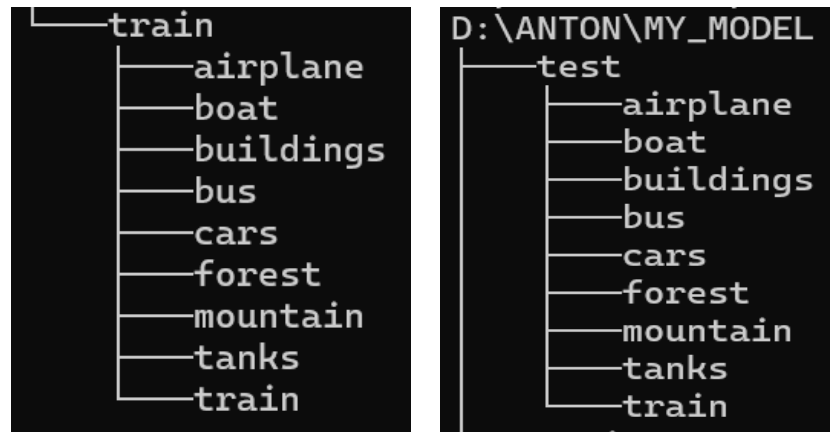


Рис. 3.1 Класи моделі для класифікації зображень

Дані проходили етапи розподілу на навчальну (80%) та валідаційну (20%) вибірки а також етап аугментації - зміни яскравості, контрастності, повороту, масштабування (рис. 3.2), що дозволяє моделі стати стійкішою до варіацій у даних.

```

train_datagen = ImageDataGenerator(rescale=1./255,
                                   shear_range=0.2,
                                   zoom_range=0.2,
                                   horizontal_flip=True)

```

Рис. 3.2 Етап аугментації зображень

Модель навчалась з використанням фреймворку TensorFlow з оптимізатором Adam і функцією втрат categorical cross-entropy, а метрикою точності - ассурасу. Для запобігання перенавчанню використовувався dropout і регуляризація L2. Було створено послідовну нейронну мережу, що складається з кількох сверткових шарів із функцією активації ReLU, які витягують просторові ознаки з зображень (рис 3.3). За кожним сверточним шаром слідує шар субдискретизації, що зменшує розмірність ознак. Після згорток та зменшення розмірностей, використовується шар Flatten() для перетворення ознак у вектор. Далі йде повнозв'язний шар (Dense) з 128 нейронами, що виконує класифікацію, а також шар Dropout, який зменшує ймовірність перенавчання шляхом випадкового вимикання нейронів під час навчання. Завершує модель шар з

кількістю нейронів, рівною кількості класів (9), та функцією активації softmax, яка повертає ймовірності для кожного класу.

```
model = tf.keras.models.Sequential([
    tf.keras.layers.Input(shape=(150, 150, 3)),
    tf.keras.layers.Conv2D(32, (3, 3), activation='relu'),
    tf.keras.layers.MaxPooling2D(pool_size=(2, 2)),

    tf.keras.layers.Conv2D(64, (3, 3), activation='relu'),
    tf.keras.layers.MaxPooling2D(pool_size=(2, 2)),

    tf.keras.layers.Conv2D(128, (3, 3), activation='relu'),
    tf.keras.layers.MaxPooling2D(pool_size=(2, 2)),

    tf.keras.layers.Flatten(),
    tf.keras.layers.Dense(128, activation='relu'),
    tf.keras.layers.Dropout(0.5),
    tf.keras.layers.Dense(num_classes, activation='softmax')
])
```

Рис. 3.3 Нейронна мережа моделі, її шари та функції активації

Модель навчалася протягом 25 епох на тренувальному наборі даних. В якості валідаційного набору використовувався тестовий датасет (рис. 3.4).



Рис. 3.4 Результати моделі для випадкових тестових зображень

У результаті модель змогла з хорошою точністю класифікувати основні типи об'єктів, що найчастіше зустрічаються у завданнях автономної навігації. З

графіків (рис. 3.5) видно, що крива валідаційної точності стабільно зростає з кількість епох тренування, а валідаційна втрата не має різких стрибків, що є індикатором стійкості моделі.

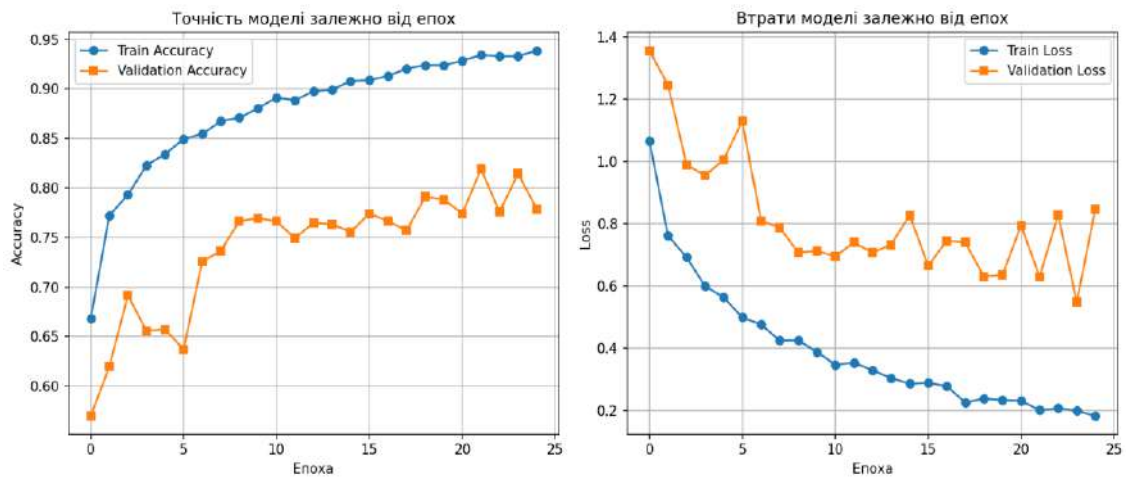


Рис. 3.5 Точність та втрати моделі залежно від кількості епох навчання

Таким чином, реалізована модель класифікації підтвердила свою ефективність для задач оптичної навігації, де потрібно швидко та точно ідентифікувати об'єкти в реальному середовищі. У подальшому її можна інтегрувати в модулі розпізнавання перешкод або у системи побудови семантичних карт.

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ОПТИЧНОЇ НАВІГАЦІЇ

4.1. Оптична навігація в автономному транспорті

Оптична навігація є однією з ключових технологій, що забезпечує функціонування автономного транспорту, включаючи безпілотні автомобілі, дрони, морські судна та навіть поїзди. Завдяки здатності камер фіксувати візуальну інформацію про навколишнє середовище з високою роздільною здатністю, система може аналізувати поточну ситуацію на дорозі, виявляти об'єкти, розмітку, знаки, пішоходів і інші транспортні засоби, формуючи карту середовища та приймаючи відповідні рішення для безпечного переміщення.

В автономних автомобілях, зокрема таких компаній як Tesla, Waymo, Cruise та інших, оптична навігація відіграє центральну роль. Автомобіль обладнано великою кількістю камер, встановлених по периметру кузова, які забезпечують круговий огляд та безперервне спостереження за дорожньою ситуацією. Ці камери передають зображення на центральний обчислювальний блок, де за допомогою алгоритмів комп'ютерного зору і штучного інтелекту відбувається розпізнавання об'єктів, визначення відстаней, швидкості об'єктів і прогнозування їхнього руху.

Типовими завданнями, які вирішує оптична навігація в автономному транспорті, є виявлення дорожніх розміток: ліній, пішохідних переходів, стрілок тощо, розпізнавання світлофорів і дорожніх знаків, ідентифікація транспортних засобів і пішоходів, а також аналіз навколишньої геометрії дороги — бордюрів, огорож, перешкод. У поєднанні з даними з інших сенсорів, таких як лідар, радар та інерціальні вимірювальні модулі, оптична навігація дозволяє автомобілю бачити і розуміти середовище подібно до того, як це робить людина.

У сфері дронів, зокрема дронів доставки, оптична навігація дозволяє забезпечити високоточне приземлення, орієнтацію в міському середовищі та уникнення зіткнень з перешкодами. Дрони компаній Amazon Prime Air, DJI,

Skydio активно застосовують камери для побудови карти місцевості та планування траєкторії в режимі реального часу. Система аналізує відеопотік, фіксує динамічні та статичні об'єкти і приймає рішення щодо оптимального маршруту.

У морському транспорті оптична навігація використовується для доповнення даних з радарів і GPS. Автономні човни, оснащені камерами, що дозволяють орієнтуватися в просторі при складних погодних умовах, уникати зіткнень з буями, суднами та іншими об'єктами.

У залізничному транспорті перспективним напрямком є впровадження систем візуального моніторингу колій, перешкод і сигналів, які дозволяють автоматизувати рух поїздів, зокрема на вантажних маршрутах або у метро. Оптичні системи допомагають фіксувати стан рейок, розпізнавати сигнали світлофорів, а також запобігати зіткненням із сторонніми об'єктами на колії.

Усі ці застосування мають спільну мету — підвищити рівень автономності, безпеки та надійності транспортних засобів, зменшити вплив людського фактора, а також забезпечити ефективне переміщення у складних або змінних умовах. Водночас оптична навігація постійно удосконалюється завдяки розвитку глибокого навчання, нових архітектур нейромереж, високоякісних камер і потужних обчислювальних платформ, що робить її невід'ємним компонентом сучасного автономного транспорту.

4.2. Використання в аерокосмічній галузі та дронах

У сфері аерокосмічних технологій та БПЛА, або дронів, оптична навігація набула особливого значення як ефективний засіб орієнтації в просторі, визначення траєкторії польоту та забезпечення автономності. Завдяки здатності камер і систем комп'ютерного зору забезпечувати високу точність просторового аналізу навіть у складних умовах, такі рішення поступово витісняють або доповнюють традиційні методи навігації, засновані виключно на GPS чи інерціальних системах.

В аерокосмічній галузі оптична навігація застосовується для орієнтації космічних апаратів під час посадки, маневрування та дослідження планетарних поверхонь. Яскравим прикладом є місії NASA, такі як Mars 2020, де використовується система, що базується на аналізі візуальної інформації з камер у реальному часі. Під час посадки апарат збирав зображення місцевості та порівнював їх з раніше створеними картами, визначаючи оптимальне місце приземлення, що дозволило уникнути небезпечних ділянок.

Крім дослідження далеких космічних тіл, оптична навігація є невід'ємною частиною автономного управління супутниками на низьких орбітах. Вона використовується для визначення орієнтації та позиціонування відносно інших об'єктів або орієнтирів, дозволяючи скорочувати залежність від наземних систем управління. Камери високої роздільної здатності виконують роль чутливих сенсорів, забезпечуючи точне визначення кута нахилу та положення апарата в космосі.

У сфері дронів, оптична навігація стала основою автономного польоту в умовах, де недоступний сигнал GPS - в приміщеннях, густих міських районах або під землею. Сучасні дрони, такі як DJI Mavic 3 (рис. 4.1), Skydio 2+ та інші, оснащені кількома камерами, які сканують навколишнє середовище в режимі реального часу. Дані обробляються процесорами, встановленими прямо на борті дрона або зовнішніми обчислювальними модулями, що дозволяє дрону будувати 3D-карту простору, уникати перешкод, тримати курс і навіть слідувати за рухомими об'єктами.



Рис. 4.1 Дрон «DJI Mavic 3»

Особливо важливим є застосування оптичної навігації у військових дронах, зокрема розвідувальних та ударних. Вони використовують системи з високою точністю стабілізації камери, автоматичним виявленням цілей і системами наведення. Для прикладу, дрони типу Bayraktar TB2 (рис. 4.2) мають потужні візуальні модулі, здатні фіксувати об'єкти з великої висоти та допомагати оператору приймати рішення або повністю автоматизувати певні функції польоту, на даний момент застосовуються в Україні для ведення війни з росією.



Рис. 4.2 Дрон «Bayraktar TB2»

Оптична навігація, також, критично важлива для дронів, які працюють у складних погодних умовах або при обмеженій видимості. Для цього використовуються тепловізійні камери, камери з широким динамічним діапазоном, а також технології мультиспектрального аналізу, що дозволяють розпізнавати орієнтири за межами видимого спектру. Завдяки поєднанню даних з камер і алгоритмів машинного навчання, такі дрони здатні працювати у складних умовах автономно, з мінімальним втручанням людини.

У промисловості оптична навігація в дронах використовується, зокрема, для огляду інфраструктури: лінії електропередач, трубопроводи, мостові конструкції, моніторингу сільськогосподарських угідь, пошуково-рятувальних операцій, де GPS часто є ненадійним або недоступним. Завдяки візуальній

локалізації, такі дрони можуть обстежувати об'єкти з високою точністю, створювати детальні карти середовища та передавати в реальному часі зображення оператору.

Таким чином, оптична навігація в аерокосмічній галузі та в дронах є не просто доповненням, а фактично базовим інструментом автономного переміщення, орієнтації та взаємодії з простором. Її практичне значення з кожним роком зростає завдяки інтеграції з новими технологіями — зокрема, штучним інтелектом, глибоким навчанням та розподіленими обчисленнями.

4.3. Перспективи використання в робототехніці та військовій техніці

Сучасні технології оптичної навігації активно інтегруються в робототехніку та військову техніку, що відкриває нові горизонти в управлінні автономними системами, підвищенні їхньої ефективності, точності та автономності в складних умовах. Використання камер, сенсорів, алгоритмів машинного зору й глибокого навчання дозволяє сучасним роботизованим платформам здійснювати навігацію без участі людини, орієнтуючись у реальному часі за візуальними орієнтирами.

У контексті повномасштабної війни України проти російської федерації оптична навігація відіграє критично важливу роль. Зокрема, вона використовується у наземних роботизованих комплексах, які застосовуються для розвідки, евакуації поранених, транспортування боєприпасів або розмінування. Одним із прикладів є розробки українських інженерів на базі платформ «Лемур», «Верба» (рис. 4.3), а також більш новітніх проєктів, які мають модулі візуальної навігації з камерами широкого огляду та тепловізорами. Завдяки цьому робот здатен самостійно будувати карту місцевості, розпізнавати перешкоди та обходити їх, що особливо важливо в умовах бойових дій, де GPS може бути недоступним або глушитися ворогом.



Рис. 4.3 Переносний зенітно-ракетний комплекс «Верба»

Також, значне поширення отримали дрони-камікадзе та FPV-дрони (рис. 4.4), які для наведення на ціль використовують виключно візуальні дані. Безпілотною, оснащений камерою реального часу, дозволяє оператору або автоматичній системі навігації здійснювати політ у складних умовах — наприклад, на низькій висоті або в умовах міського ландшафту. Відомі приклади використання FPV-дронів із вбудованими камерами, які з високою точністю вражають бронетехніку, укріплення або рухомі цілі. Зокрема, українські розробки на базі цивільних моделей із доопрацьованими системами управління стали справжнім проривом у тактичному застосуванні дронів.



Рис. 4.4 FPV-дрон

Перспективним напрямом є, теж, створення автономних бойових платформ, здатних самостійно вести спостереження, виявляти цілі, приймати рішення щодо дій. У таких системах оптична навігація поєднується з неймережами, що навчаються розпізнавати ворожі позиції, людей, транспорт, зброю, за характерними візуальними ознаками. Таким чином, військові роботи нового покоління можуть функціонувати в режимі повної автономності або напіваавтономності навіть у складній тактичній обстановці.

У глобальному контексті провідні армії світу, зокрема США, Ізраїль, Велика Британія та Південна Корея, уже активно впроваджують оптичну навігацію в бойових роботах. Для прикладу, платформа MAARS (Modular Advanced Armed Robotic System, рис. 4.5) використовує візуальні сенсори для орієнтації на полі бою. Аналогічно, ізраїльська компанія Elbit Systems розробляє наземні безпілотні системи з глибокою інтеграцією оптичної навігації та штучного інтелекту для патрулювання кордонів, супроводу колон або евакуації поранених.



Рис. 4.5 Платформа MAARS

Водночас перспективи використання оптичної навігації у військовій галузі пов'язані і з роботизованими системами спостереження та охорони, які можуть автономно патрулювати об'єкти інфраструктури, виявляти підозрілу активність, вести відеоспостереження та інформувати операторів у разі загрози. Усе це можливо завдяки потужним візуальним системам, здатним працювати в реальному часі, виявляючи навіть незначні зміни в навколишньому середовищі.

Підсумовуючи, можна зазначити, що оптична навігація стала не лише важливим елементом сучасної бойової техніки, а й визначає майбутнє робототехніки загалом. Її здатність забезпечувати автономну орієнтацію, точність руху та ефективність у складних умовах робить її невід'ємною частиною наступного етапу розвитку високотехнологічних систем в умовах як війни, так і мирного життя.

4.4. Тенденції та майбутні напрями розвитку оптичної навігації

Сучасні тенденції розвитку оптичної навігації свідчать про її поступовий перехід з категорії допоміжної технології у розряд основних систем орієнтації та позиціонування для широкого спектру застосувань — від побутової електроніки до складних військових і космічних систем. Прогрес у галузі комп'ютерного зору, мініатюризації сенсорів, зростання обчислювальної потужності пристроїв, а також активне впровадження штучного інтелекту створюють передумови для подальшої еволюції оптичної навігації.

Однією з ключових тенденцій є поглиблення інтеграції оптичної навігації з іншими сенсорними та аналітичними системами. У найближчі роки очікується активний розвиток гібридних навігаційних рішень, де візуальна інформація буде доповнюватися даними з LIDAR, радарів, ультразвукових сенсорів, інерціальних блоків та GPS-модулів. Такий підхід забезпечить високу надійність і точність позиціонування навіть у надскладних умовах — у щільній забудові, під землею, в умовах перешкод або навмисного радіоелектронного подавлення.

Ще однією важливою тенденцією є зростання автономності навігаційних систем. Якщо на сьогодні більшість платформ з оптичною навігацією вимагають людського контролю або налаштувань, то вже найближчим часом ключову роль відіграватимуть самонавчальні системи, здатні адаптуватися до нових умов, аналізувати ситуацію на місці, робити прогнози та приймати рішення в режимі реального часу без зовнішнього втручання. Це стане можливим завдяки впровадженню глибоких нейронних мереж, машинного навчання, а також нових методів класифікації об'єктів на основі візуальних даних.

Варто відзначити і тенденцію до зменшення розмірів та енергоспоживання оптичних навігаційних модулів, що дає змогу інтегрувати їх у надлегкі платформи: портативні пристрої, малогабаритні дрони, автономні сенсори для інтернету речей. У майбутньому це сприятиме розвитку мікророботів, які можуть працювати у важкодоступних місцях: всередині людського тіла, під завалами, у каналізаційних системах, тощо.

Окремо варто виділити напрям розвитку квантових технологій та нових оптоелектронних матеріалів, які відкривають нові горизонти для створення більш чутливих, надійних та стабільних оптичних сенсорів. Наприклад, сенсори на базі графену або фотонно-кристалічних структур дозволяють досягати вищої точності фіксації зміщення, глибини або швидкості руху при мінімальних витратах енергії. Такі сенсори можуть знайти своє застосування як у космічних апаратах, так і в автономних наземних системах, що працюють в агресивних середовищах: високі температури, радіація, пил, волога.

Майбутнє оптичної навігації також тісно пов'язане з розвитком хмарних технологій та 5G/6G-зв'язку. Візуальні системи нового покоління зможуть обробляти зображення частково локально, а частково в хмарних середовищах, де виконується важка аналітика, зберігаються шаблони карт, маршрути, навчальні моделі. Це дозволить швидше реагувати на нові ситуації, обмінюватися навігаційними даними між кількома автономними пристроями та забезпечити високий рівень координації між ними.

Ще одним важливим напрямом розвитку є використання оптичної навігації в умовах обмеженої або нульової видимості. Для цього використовуються камери в інфрачервоному та ультрафіолетовому діапазонах, тепловізори, а також алгоритми покращення зображення на базі нейромереж. Це відкриває перспективи для навігації вночі, в умовах диму, туману, під водою або в закритих промислових зонах.

З практичної точки зору, у найближчому майбутньому очікується масове впровадження оптичної навігації у таких сферах як: автономні міські транспортні засоби (роботаксі, безпілотні автобуси), агропромисловість, охорона здоров'я (роботизовані хірурги, транспорт всередині лікарень), логістика (автономні платформи для складів і доставки).

У військовій сфері тенденції розвитку передбачають створення автономних бойових систем нового покоління, які зможуть не лише орієнтуватися на полі бою, а й самостійно ухвалювати рішення на основі візуального аналізу ситуації. Оптична навігація стане базовим компонентом безпілотних наземних, повітряних та морських платформ, які мають діяти в умовах електронної боротьби, коли GNSS-сигнали повністю відсутні.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що оптична навігація стрімко трансформується з додаткового інструмента у фундаментальну технологію майбутнього. Її розвиток перебуває на перетині багатьох галузей: штучного інтелекту, квантової фізики, біоінженерії, телекомунікацій і машинобудування, що гарантує її подальшу експансію в усі сфери людської діяльності.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження було встановлено, що оптична навігація на сьогодні є однією з найперспективніших технологій у сфері автономного позиціонування, орієнтації та управління рухом у різноманітних умовах. Ця технологія ґрунтується на принципах аналізу зображень та обробки візуальної інформації з метою визначення місцезнаходження, орієнтації об'єкта у просторі та побудови карти навколишнього середовища. Її гнучкість, здатність працювати у складних умовах, де інші системи, як-от GPS чи інерціальні, зазнають невдач, робить її особливо актуальною у контексті сучасних викликів, зокрема в умовах бойових дій, автономної навігації, аерокосмічних місій тощо.

Історичний огляд показав, що технології оптичної навігації мають давню наукову базу, проте лише у XXI столітті завдяки розвитку комп'ютерного зору, глибоких нейронних мереж і сенсорної техніки вони отримали широку практичну реалізацію. На сьогодні системи оптичної навігації не лише розвиваються як окремий напрям, але й активно інтегруються з іншими типами навігаційних рішень — GNSS, інерціальними модулями, SLAM-технологіями, що дозволяє створювати багаторівневі й надійні системи позиціонування.

Проаналізувавши основні компоненти таких систем, можна стверджувати, що ефективність оптичної навігації значною мірою залежить від якісного функціонування камер, обчислювальних модулів, програмного забезпечення для обробки зображень та алгоритмів штучного інтелекту. Сучасні рішення, зокрема на базі SLAM, демонструють здатність одночасно будувати карту невідомого середовища та визначати власне місцезнаходження в реальному часі — що є ключовою перевагою для автономних систем.

Окрему увагу у дослідженні було приділено технічному аналізу сучасних алгоритмів реалізації оптичної навігації. Проведено аналіз і порівняння методів виділення та відстеження ключових точок, досліджено процес побудови карти середовища, а також реалізовано власну модель класифікації об'єктів на зображеннях з використанням технологій машинного навчання. Це дозволило

продемонструвати практичну реалізацію одного з компонентів оптичної навігаційної системи, що підтверджує доцільність використання подібних моделей у реальних проєктах та сценаріях.

Було розглянуто широку сферу практичного застосування оптичної навігації, яка вже активно використовується в автономному транспорті, зокрема в автомобілях з системами автопілота, забезпечуючи високоточне розпізнавання дорожньої ситуації. У сфері аерокосмосу та БПЛА вона відіграє критичну роль у навігації на орбіті, приземленні в складних умовах, а також у розвідувальних операціях. Надзвичайно перспективним є впровадження оптичної навігації у військову техніку, роботизовані платформи та автономні бойові системи, особливо в умовах сучасної війни України проти російської агресії, де вона допомагає реалізовувати точне керування без потреби у GPS, який може бути заглушений або недоступний.

Дослідження сучасних тенденцій розвитку показало, що майбутнє оптичної навігації пов'язане з подальшою мініатюризацією компонентів, впровадженням квантових сенсорів, покращенням алгоритмів обробки зображень, а також розвитком штучного інтелекту і хмарних обчислень. Очікується, що ці системи стануть невід'ємною частиною не лише унікальних інженерних рішень, але й повсякденного життя — в побутовій техніці, логістичних процесах, охороні, медицині та міській інфраструктурі.

Загалом, оптична навігація є ключовою складовою сучасних технологічних перетворень, що не лише значно підвищує ефективність автономних систем, а й відкриває нові горизонти для науково-дослідної діяльності, розробок подвійного призначення, забезпечення національної безпеки та формування інтелектуального суспільства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Друковані та академічні джерела:

1. Бойко О. М. Комп'ютеризована оптична навігаційна система для безпілотних літальних апаратів : бакалаврська робота. – Тернопіль : ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2024. – 76 с.
2. Віхляєв Є. В., Федотов В. В. Методи побудови тривимірних карт для робототехнічних систем на основі SLAM-технологій. Наукові вісті НТУУ «КПІ». 2019. № 1. С. 60–67.
3. Гарсія Г. А. (Garcia H. A.) The Contribution of Onboard Optical Instrumentation to Deep Space Navigation. – AAS/AIAA Astrodynamics Conference, 1971.
4. Гао С., Чжан Т., Ян Ц., Лю Ю. (Gao X., Zhang T., Yan Q., Liu Y.) Introduction to Visual SLAM: From Theory to Practice. – Singapore : Springer, 2021. – 389 p.
5. Ковальчук Л. М. Інтеграція оптичної та інерціальної навігації в мобільних роботах / Л. М. Ковальчук // Наукові праці Одеської національної академії зв'язку. – 2024. – № 1. – С. 30–36.
6. Коленко Н. Д. Навігаційні системи та їх використання / Н. Д. Коленко. – Харків : ХНАДУ, 2023. – 112 с.
7. Лакоза С. Л. Навігаційні системи : навч. посібник. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 80 с.
8. Мамонько Д. В. Удосконалення методу прокладення шляху мобільної платформи в невизначеному просторі / Д. В. Мамонько. – Харків : ХНУРЕ, 2020. – 78 с.
9. Мелешко В. В., Нестеренко О. І. Навігаційні системи / В. В. Мелешко, О. І. Нестеренко. – Київ : КПІ, 2021. – 172 с.
10. Мельник О. В., Дубінський Г. О. Аналіз сучасних методів комп'ютерного зору для виявлення об'єктів у системах автономної навігації. Технічні науки та технології. 2021. № 2(24). С. 155–164.
11. Павлюк І. І. Комп'ютеризована оптична навігаційна система для безпілотних літальних апаратів / І. І. Павлюк. – Тернопіль : ТНТУ, 2024. – 78 с.
12. Попович П. В., Карпенко О. В. Використання нейронних мереж для вирішення задач семантичної сегментації зображень у системах комп'ютерного зору. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Інформаційні системи та мережі. 2020. № 6. С. 112–123.
13. Терещенко Б. Д. Оптична навігаційна система : магістерська дис. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 60 с.
14. Щекотихін О. В., Дмитренко В. П., Єфименко М. В., Проскурін М. П. Волоконно-оптичні системи передачі інформації (ВОСПІ) : навч. посібник. – Запоріжжя : НУ "Запорізька політехніка", 2022. – 114 с.

Інтернет-джерела:

15. А1-СМ Фурія [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://athlonavia.com/uk-furia/>
16. Bayraktar TB2 [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
https://uk.wikipedia.org/wiki/Bayraktar_TB2
17. FPV-дрон [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
[https://uk.wikipedia.org/wiki/FPV-%D0%B4%D1%80%D0%BE%D0%BD_\(%D0%B7%D0%B1%D1%80%D0%BE%D1%8F\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/FPV-%D0%B4%D1%80%D0%BE%D0%BD_(%D0%B7%D0%B1%D1%80%D0%BE%D1%8F))
18. Історія супутникової навігації [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://waymaps.ua/istoriia-suputnykovo-navihatsii/>
19. Комп'ютеризована оптична навігаційна система для безпілотних літальних апаратів [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/46037/2/Oleksandr_Boiko.pdf
20. MAARS [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.army-guide.com/rus/product4051.html>
21. Навігаційна система [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
https://uk.wikipedia.org/wiki/Навігаційна_система
22. Оптична навігаційна система [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://ela.kpi.ua/items/16c3e78f-1330-491b-954c-1019998f5ed6>
23. Українські дрони використовують систему оптичної навігації від Vermeer [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://military.com/uk/news/ukrayinski-drony-vykorystovuyut-sytemu-optychnoyi-navigatsiyi-vid-vermeer/>
24. Астрономічна навігація [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
https://vue.gov.ua/Астрономічна_навігація