УДК 004.415.2
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/29

Цяпа С. М.
Український науково-дослідний інститут
спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

ІНТЕГРАЦІЯ СЕНСОРНИХ ДАНИХ В A-UGV СИСТЕМАХ

У статті досліджується проблема інтеграції різноманітних сенсорних систем, які використовуються у сучасних автономних наземних безпілотних транспортних засобах (A-UGV), з метою підвищення рівня безпеки їх експлуатації в умовах складних погодних явищ, а також забезпечення ефективної взаємодії з динамічним середовищем, включаючи пішоходів та інші транспортні засоби. Враховуючи значну архітектурну диференціацію систем A-UGV, всі ці платформи являють собою високотехнологічні комплекси з великою кількістю взаємопов'язаних компонентів. Архітектура таких систем може бути розглянута у двох основних аспектах: технічному та функціональному. З технічної точки зору система A-UGV об'єднує апаратне забезпечення, яке включає обчислювальні модулі, сенсорні масиви та виконавчі механізми, а також програмні засоби, що складаються з алгоритмів обробки сенсорних даних, моделей прийняття рішень і систем керування. Функціональна архітектура визначає принципи послідовної обробки даних, починаючи від збору інформації про навколишнє середовище до прийняття керуючих рішень у режимі реального часу. Інтеграція сенсорних даних є критично важливим фактором, що безпосередньо впливає на експлуатаційну ефективність A-UGV. Сучасні безпілотні платформи оснащуються різними типами сенсорів, такими як LiDAR, радарні системи, відеокамери, тепловізійні сенсори, ультразвукові сенсори та GNSS-приймачі. Аналіз наукової літератури засвідчує, що інтеграція сенсорних даних є складним завданням через необхідність часової синхронізації, просторової реєстрації інформації та зниження невизначеності при обробці даних.

Розглянуто основні архітектурні підходи до інтеграції даних сенсорів в A-UGV. Так архітектура з ранньою інтеграцією забезпечує інтеграцію необроблених даних перед етапом вилучення ознак, що сприяє максимальному використанню інформації, однак потребує значних обчислювальних ресурсів. Архітектура з пізньою інтеграцією обробляє інформацію після окремого аналізу кожного типу сенсорів, що зменшує обчислювальну складність, але може призводити до втрати важливих міжсенсорних кореляцій. Гібридні архітектури поєднують ранню обробку взаємодоповнюючих сенсорів із незалежною обробкою специфічних даних, що дозволяє оптимізувати алгоритми навігації та контролю.

У статті розглянуто ключові аспекти інтеграції сенсорних систем з метою підвищення функціональності A-UGV, зокрема адаптації до динамічних умов середовища, можливості інтеграції з інтелектуальними системами керування, здатності ідентифікувати та обходити складні перешкоди, а також ефективної взаємодії з іншими автономними платформами. Показано, що вибір конфігурації сенсорного обладнання безпосередньо впливає на експлуатаційну ефективність, надійність та адаптивність A-UGV до зовнішніх умов. Наголошено, що отримані результати можуть бути використані для розробки оптимізованих конфігурацій сенсорів, які забезпечать покращене зондування навколишнього середовища, стійкість до відмов і можливість ефективної роботи в умовах невизначеності. Визначено, що подальший розвиток автономних технологій залежатиме від вдосконалення сенсорних систем, алгоритмів штучного інтелекту, адаптивних стратегій керування та ефективної мережевої взаємодії між автономними платформами. Такий підхід, у свою чергу, дозволить значно розширити сфери застосування A-UGV та підвищити їх ефективність у складних експлуатаційних середовищах.

Ключові слова: *A-UGV, конфігурації сенсорів, мультисенсорні платформи, LiDAR, радар.*

Постановка проблеми. Автономні безпілотні наземні транспортні засоби (A-UGV) функціонують як самокеровані системи, які аналізують навколишнє середовище та реалізують навігаційні алгоритми без людського втручання. Статистичні дані відображають експоненціальну траєкторію розвитку таких систем, що свідчить про їх зростаюче значення. Слід відмітити той факт, що глобальна кількість транспортних засобів із різними рівнями автономії зросла з 31 мільйона у 2019 році до 54 мільйонів у 2024 році [1]. В той же час, еволюція мікроелектроніки, сенсорних систем та комунікаційних мереж, що характеризується мініатюризацією компонентів та підвищенням обчислювальної ефективності, забезпечила диверсифікацію технічних рішень у сфері A-UGV. Однак, імплементація цих систем у реальних експлуатаційних умовах супроводжується низкою

складних питань, серед яких особливої уваги заслуговують: забезпечення операційної безпеки при несприятливих метеорологічних умовах та розробка протоколів взаємодії з динамічними елементами середовища, включаючи пішоходів та інші транспортні засоби.

Ефективне функціонування сенсорних систем A-UGV визначається їхньою адаптацією до змінних метеорологічних умов, що впливає на якість отриманих даних і стабільність алгоритмів обробки. Сонячні відблиски, опади (сніг, дощ), атмосферні помутніння (туман, імла, серпанок) та аерозольні частинки створюють значні перешкоди для сенсорних систем. З огляду на зростаюче застосування A-UGV у таких галузях, як військові операції, сільське господарство та логістика, першочерговим завданням постає створення сенсорних систем, які б забезпечували стабільну роботу у будь-яких погодних умовах.

Слід зазначити, що складність автономної навігації зростає в дорожніх умовах, які характеризуються хаотичною поведінкою транспортних засобів і непередбачуваною динамікою руху. Так наприклад, транспортні засоби змінюють свою поведінку у відповідь на зміни в організації дорожнього руху, що потребує від A-UGV здатності до швидкої адаптації. Для забезпечення безпеки руху, A-UGV повинні мати вбудовані системи, які дозволяють проводити комплексну обробку даних та прогнозування траєкторій інших учасників руху. Такі аналітичні можливості є критично важливими для зниження ризику зіткнень [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сфера технологій A-UGV перебуває в постійному розвитку, де основна увага приділяється на вдосконаленні сенсорних технологій та їх інтеграції в складні системи для підвищення автономності. Важливими компонентами A-UGV є сенсори, які перетворюють зміни навколишнього середовища або внутрішні зміни у вимірювані дані для обробки та прийняття рішень. Такі сенсори зазвичай класифікуються на основі принципів їхньої роботи, з розрізненням пропріоцептивних та екстероцептивних типів.

Пропріоцептивні сенсори надають важливу інформацію про внутрішній стан автомобіля, вимірюючи такі параметри, як сила, кутова швидкість, навантаження на колеса та енергетичні показники, такі як напруга акумулятора. Ці сенсори необхідні для оцінки динамічного стану, причому ключову роль відіграють інерційні вимірювальні блоки (IMU – Inertial Measurement Unit), які включають акселерометри, гіроскопи та магнітометри [3]. Додаткові внутрішні сенсори включають сенсори обертання і приймачі Глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS – Global Navigation Satellite System), які надають точні дані про місцезнаходження для навігації і керування.

Екстероцептивні сенсори, з іншого боку, зосереджені на зборі даних із зовнішнього середовища, що дозволяє A-UGV сприймати і реагувати на навколишнє середовище. Ці сенсори вимірюють такі змінні, як відстань, розміри об'єкта та інтенсивність світла. Прикладами є LiDAR, радар, ультразвукові сенсори і системи камер. LiDAR і радар, як активні сенсори, випромінюють енергію для картографування навколишнього середовища, тоді як камери, як пасивні сенсори, фіксують візуальні дані, використовуючи навколишнє світло.

Для гарантування надійного моніторингу навколишнього середовища та локалізації транспортного засобу, A-UGV значною мірою покладаються на мультисенсорну інтеграцію, що є основою для планування маршруту та прийняття рішень. Системи технічного зору, що складаються з камер високої роздільної здатності, допомагають розпізнавати і класифікувати об'єкти. Водночас, системи радарів і LiDAR полегшують вимірювання відстані та виявлення перешкод. Ультразвукові сенсори доповнюють їх, забезпечуючи вимірювання на коротких відстанях, що особливо корисно в умовах обмеженого простору. GNSS і IMU спільно надають інформацію про абсолютне і відносне позиціонування, забезпечуючи точне планування траєкторії.

Нещодавні дослідження акцентують увагу на важливості методів об'єднання сенсорів для підвищення ефективності і надійності A-UGV. Об'єднання декількох сенсорів використовує інтеграцію даних з різних сенсорів для зменшення обмежень окремих сенсорів, що дозволяє отримати комплексне розуміння ситуації [4]. Наприклад, об'єднання даних LiDAR і камер спостереження збільшує дальність і роздільну здатність, що є критично важливим для високоточного картографування довкілля. Крім того, вдосконалення алгоритмів машинного навчання дозволило розробити інтелектуальні сенсорні фреймворки, які оптимізують обробку та інтерпретацію даних.

Ще одним важливим аспектом, який висвітлюється в літературі, є класифікація сенсорів на основі радіусу дії зв'язку. Сенсори, що використовуються в A-UGV, можуть бути класифіковані як ближнього, середнього або дальнього радіусу дії, залежно від їхніх можливостей передачі даних

за допомогою бездротових технологій. Сенсори малого радіусу дії, такі як ультразвукові пристрої, ідеально підходять для виявлення наближення об'єктів, в той час як сенсори середнього і великого радіусу дії, в тому числі радари і LiDAR, розширюють зону дії для більш масштабних навігаційних завдань. Крім того, комунікаційні технології, такі як виділений зв'язок малого радіусу дії (DSRC – Dedicated short-range communications) і стільниковий зв'язок в технології «транспортний засіб до всього» (C-V2X – Cellular Vehicle-to-Everything), набувають все більшого значення для взаємодії на середніх і великих відстанях.

Архітектурний дизайн A-UGV акцентує увагу на синергетичній взаємодії між сенсорами і обчислювальними модулями. Згідно з [5], дані про транспортний засіб, зібрані з сенсорів, проходять послідовну обробку за допомогою чотирьох основних функціональних модулів: моніторингу, локалізації, планування і контролю. Ці модулі в сукупності дозволяють A-UGV динамічно адаптуватися до змін навколишнього середовища, зберігаючи при цьому безпеку та ефективність.

Постановка завдання. Сучасні дослідження в галузі A-UGV відзначаються значним технологічним розвитком. Проте, питання забезпечення надійного зондування навколишнього середовища шляхом інтеграції різноманітних сенсорів залишається недостатньо вивченим. Аналіз існуючих наукових публікацій виявляє відсутність комплексних рішень для актуальних проблем, що створює розрив між теоретичними моделями та практичними рекомендаціями щодо їх реалізації. Цей розрив обмежує впровадження інноваційних підходів у розробку A-UGV нового покоління.

Одним із ключових обмежень сучасних досліджень є недостатня оцінка ефективності інтегрованих сенсорних конфігурацій та стратегій інтеграції сенсорів. Більшість існуючих методологій оцінки не забезпечують необхідної деталізації для виявлення тонких, але важливих змін у функціонуванні A-UGV в різних умовах. Недостатня точність аналізу призводить до формування неоптимальних конфігурацій сенсорів, що негативно впливає на експлуатаційну ефективність, надійність та адаптивність системи.

Метою дослідження є проведення систематичного аналізу існуючих стратегій інтеграції сенсорів та оцінка їх ефективності в реальних умовах експлуатації A-UGV. На основі поєднання теоретичного моделювання та емпіричної перевірки, дослідження спрямоване на визначення найбільш ефективних архітектур інтеграції сенсорів для покращення зондування навколишнього середовища, навігації та загальних експлуатаційних характеристик A-UGV.

Виклад основного матеріалу. Розвиток A-UGV відображає значний прогрес у робототехніці і технологіях автономних систем. В основі цієї технологічної концепції лежить критично важлива вимога до надійного аналізу навколишнього середовища, що досягається за допомогою мультимодальних сенсорних систем. Інтеграція і об'єднання різнорідних потоків сенсорних даних становлять перцептивну основу, на якій будуються процеси прийняття рішень вищого рівня в даних автономних платформах. Сучасні системи A-UGV використовують різні типи сенсорів:

Системи візуального моніторингу, які базуються на відеокамерах, відіграють ключову роль у забезпеченні детального аналізу оточення в сучасних A-UGV. Різноманітність конфігурацій камер дозволяє адаптувати їх до специфічних вимог операцій [6]:

– монокулярні камери – забезпечують зображення високої роздільної здатності з точним відтворенням кольорів, що сприяє розпізнаванню та класифікації об'єктів. Впровадження нейромережевих архітектур, таких як ViT та Swin Transformer, покращує обробку даних, частково компенсуючи обмеження однокамерних систем;

– стерео камери – використовують методи тріангуляції для оцінки відстані на основі розбіжностей між синхронізованими зображеннями. Сучасні алгоритми стереозору, які включають контроль фокусування, зменшують обчислювальні витрати та підвищують точність визначення відстані, особливо в однорідних текстурних середовищах;

– камери подій – завдяки асинхронному виявленню змін яскравості на рівні пікселів, забезпечують високу тимчасову роздільну здатність (мікросекунди) та широкий динамічний діапазон (>120 дБ). Низька надлишковість даних та стійкість до розмиття при русі роблять їх ефективними для високошвидкісних операцій A-UGV в умовах динамічного освітлення.

Переваги систем на основі камер включають семантичну насиченість інформації, високу роздільну здатність кольору, високу частоту кадрів (60–240 Гц) та відносно низьку вартість. Обмеження полягають у погіршенні ефективності при несприятливому освітленні, чутливості до погодних умов, обмеженому сприйнятті глибини (для монокулярних камер) та високих обчислювальних витратах обробки зображень.

До іншого типу сенсорів слід віднести активні системи визначення дальності такі як LiDAR (Light Detection and Ranging) [7]. Сучасні технології LiDAR, які застосовуються в A-UGV, представлені наступним переліком:

– механічний скануючий LiDAR – використовуючи механізми обертання для отримання 360° горизонтального поля зору з 64–128 вертикальними каналами, такі системи забезпечують комплексну просторову вибірку. Нещодавні досягнення забезпечили зменшення форм-фактора при одночасному збільшенні роздільної здатності до >2 мільйонів точок на секунду.

– твердотільні LiDAR – у них відсутні механічні компоненти завдяки таким технологіям, як мікродзеркала MEMS, оптичні фазовані решітки або підсвічування. Зокрема, такі LiDAR-и значно покращили свої характеристики і тепер можуть працювати на дальностях понад 200 метрів з сантиметровою точністю;

– LiDAR з частотно-модульованою безперервною хвилею (FMCW – Frequency-Modulated Continuous Wave) – завдяки аналізу частотних зсувів у сигналі, отриманому в результаті зворотного проходження, такі пристрої одночасно вимірюють і відстань, і швидкість, забезпечуючи при цьому стійкість до перешкод від інших LiDAR пристроїв.

Перевагами таких пристроїв є – висока просторова роздільна здатність, пряма генерація 3D хмари точок, можливість функціонування незалежно від умов навколишнього освітлення, висока точність вимірювання відстані (±2–3 см на відстані 100 м) і все більш компактні форм-фактори.

До недоліків можна віднести – погіршення роботи в несприятливих погодних умовах (особливо під час опадів і туману), вища вартість порівняно з камерами, обмежена ефективність роботи, низька продуктивність.

Сенсори на основі радіолокаційних систем. Сучасні радіолокаційні рішення для A-UGV передбачають наступні типи систем [8]:

– РЛС міліметрового діапазону (77–81 ГГц) – вони забезпечують вищу роздільну здатність по дальності порівняно зі старими системами, що працюють на частоті 24 ГГц. Сучасні радари автомобільного класу досягають кутової роздільної здатності 1–2° з дальністю виявлення об'єктів розміром з автомобіль на відстані понад 300 метрів;

– радари з 4D зображенням – такі системи включають в себе кілька передавальних і приймальних антен в конфігурації MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), що забезпечує квазіоптичну роздільну здатність, зберігаючи при цьому стійкість радара до погодних умов. Останні розробки мають кутову роздільну здатність, що становить близько 0,5°;

– когнітивні РЛС – завдяки адаптивному проектуванню форми сигналу і регулюванню параметрів в реальному часі з урахуванням умов навколишнього середовища, такі системи є передовим досягненням радіолокаційних технологій для A-UGV.

Перевагами таких систем є – виняткова стійкість до погодних умов, пряме вимірювання швидкості за допомогою ефекту Доплера, розширений робочий діапазон (>200 м), низькі обчислювальні вимоги до обробки даних і постійне вдосконалення роздільної здатності.

До недоліків можна віднести наступні фактори – нижча просторова роздільна здатність порівняно з LiDAR системами, обмежене покриття кутів нахилу в звичайних конфігураціях і проблеми з виявленням неметалевих об'єктів.

Ультразвукові сенсори в основному використовуються для виявлення об'єктів на коротких відстанях [9]:

– широкосмугові ультразвукові решітки – сучасні розробки використовують декілька частот (30–100 кГц) одночасно для зменшення шумів навколишнього середовища і покращення роздільної здатності;

– параметричні ультразвукові решітки – такі пристрої створюють високоспрямовані діаграми направленості за рахунок генерування різночастотних сигналів у просторі, що значно покращує кутову роздільну здатність.

До переваг ультразвукових решіток можна віднести наступні фактори – ефективні в операціях на дуже близькій відстані (<10 м), низька вартість, компактний розмір і висока ефективність, на яку не впливають освітлення або помірні опади.

До недоліків можна віднести наступне – дуже обмежений радіус дії, чутливість до атмосферних впливів, чутливість до зовнішніх ультразвукових перешкод і відносно низька кутова роздільна здатність.

Для точного позиціонування A-UGV застосовуються різноманітні технології локалізації. Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS) забезпечують глобальне покриття та абсолютне позиціонування. Використання багатосистемних приймачів, які обробляють сигнали GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou та інших, покращує доступність та точність даних завдяки їх дублюванню. Методи кінематики в реальному часі (RTK – Real-Time Kinematic) та точного точкового позиціонування (PPP – Precise Point Positioning)

дозволяють досягти сантиметрової точності за рахунок диференційних поправок та точних ефемеридних даних. В умовах, де GNSS сигнали обмежені, використовуються альтернативні методи. Позиціонування на основі стільникової мережі 5G, з використанням покращених опорних сигналів позиціонування (PRS – positioning reference signals), дозволяє досягти субметрової точності в міських умовах за допомогою методів різниці часу прибуття (TDOA – time difference of arrival) та кута прибуття (AOA – angle of arrival). Надширокосмугове (UWB – Ultra-Wideband) позиціонування забезпечує високу часову роздільну здатність та сантиметрову точність у спеціалізованих застосуваннях, де GNSS недоступний [10].

До переваг цих систем належать – доповнення до GNSS у складних умовах, висока швидкість оновлення даних та використання існуючої інфраструктури. Обмеження включають – погіршення або втрату сигналу GNSS в умовах міських забудов, тунелів та густої рослинності, вразливість до перешкод та ризики маніпуляцій з сигналами GNSS, залежність від розгортання та обслуговування зовнішньої інфраструктури, а також потенційні затримки зв'язку.

Спільне повітряно-наземне зондування:

– спільне зондування UAV-A-UGV – UAV можуть забезпечити кращі точки спостереження для подолання перешкод у наземному зондуванні. Нещодавні дослідження свідчать про можливості семантичного картографування в реальному часі, коли UAV передають попередньо оброблені дані зондування на UGV для покращення оцінки поточної обстановки;

– повітряні системи з периферійними обчисленнями – сучасні безпілотні платформи мають суттєві можливості бортової обробки даних, що дозволяє проводити попередній аналіз даних перед передачею на наземний транспортний засіб, тим самим зменшуючи вимоги до каналу зв'язку.

Перевагами таких систем є – можливість подолання перешкод, розширення горизонту зондування і надання альтернативних перспектив для покращення оцінки ситуації.

До недоліків можна віднести – складність експлуатації, обмежена тривалість польоту UAV, регуляторні обмеження і складнощі в координації між повітряними і наземними платформами.

Розглянувши технічні характеристики і робочі параметри окремих сенсорів, що використовуються в A-UGV, стає очевидним, що жодна сенсорна технологія не може самостійно задовольнити високим вимогам до обробки даних, необхідним для надійної автономної роботи в різноманітних умовах навколишнього середовища. Обмеження, притаманні кожному способу зондування – чи то чутливість камер до несприятливих умов освітлення, погіршення роботи LiDAR під час опадів, чи обмежена просторова роздільна здатність радіолокаційних систем – зумовлюють необхідність системного підходу до інтеграції сенсорів, який виходить за рамки можливостей ізольованих компонентів.

Важливість об'єднання сенсорів при розробці A-UGV підкреслюється кількісним аналізом ефективності, проведеним в різних операційних умовах. Нещодавні експлуатаційні дослідження показали, що хоча системи зондування з одним сенсором досягають показників виявлення об'єктів на рівні 76–89 % за нормальних умов, ці показники стрімко знижуються до 31–58 %, коли умови навколишнього середовища погіршуються [11]. На противагу цьому, правильно налаштовані мультисенсорні системи забезпечують рівень виявлення вище 92 % навіть у складних умовах, що означає покращення ефективності на 34–61 % за несприятливих умов.

Потенційні технічні переваги, які надають сучасні методики об'єднання сенсорів, виходять за рамки простої надлишковості. Емпіричні дані свідчать про адитивний ефект, коли інтеграція взаємодоповнюючих сенсорів дає покращення ефективності, що перевищує сукупність можливостей окремих сенсорів [12]. Цей ефект кількісно виражається через індекс ефективності інтеграції сенсорів (SFEI – Sensor Fusion Efficacy Index) (1):

$$SFEI = \frac{P_{fusion}}{\max(P_1, P_2, \ldots, P_N) + \alpha \cdot \sum_{i=1}^{N} P_i}, \qquad (1)$$

де P_{fusion} – метрика ефективності об'єднаної системи; P_i – позначає ефективність окремих сенсорів; α – коефіцієнт контексту навколишнього середовища, який зазвичай знаходиться в діапазоні від 0,15 до 0,30.

Результати тестування в польових умовах показують, що значення SFEI систематично перевищують 1,4 в різних операційних умовах, що підтверджує суттєві переваги сучасних підходів до інтеграції сенсорів.

Функціональні вдосконалення, що стали можливими завдяки ефективній архітектурі об'єднання сенсорів, проявляються у багатьох експлуатаційних аспектах ефективності A-UGV (наведено в Таблиці 1):

Таблиця 1

Кількісна оцінка покращення ключових експлуатаційних характеристик A-UGV завдяки впровадженню мультисенсорної інтеграції

Параметр	Ефективність одного сенсора	Покращена ефективність інтеграції	Коефіцієнт покращення
Діапазон ідентифікації об'єктів, м	45–120	180–280	2.3–4.0×
Точність просторової локалізації, см	8–25	2–7	3.6–4.0×
Коефіцієнт помилкових спрацьовувань, %	6.8–15.2	0.8–2.4	6.3–8.5×
Стійкість до несприятливих погодних умов, %	35–52	87–94	1.8–2.5×
Точність динамічного трекінгу об'єктів, %	68–79	93–97	1.2–1.4×

Окрім кількісного покращення можливостей зондування, удосконалені архітектури об'єднання сенсорів дають можливість отримати якісно нові функціональні можливості, які докорінно змінюють операційні парадигми A-UGV. До них відносяться:

– прогностичне моделювання навколишнього середовища – синтезуючи часові потоки даних з різнорідних сенсорів, A-UGV можуть створювати прогнозні моделі динамічних елементів навколишнього середовища, що дозволяє використовувати прогностичні, а не реактивні навігаційні стратегії. Математичне моделювання показує, що такий підхід знижує ризик зіткнення на 78 % в динамічному середовищі порівняно з реактивними системами;

– семантична інтерпретація середовища – інтеграція додаткових сенсорних функцій полегшує комплексну інтерпретацію середовища, що виходить за рамки простого виявлення об'єктів, дозволяючи A-UGV розпізнавати складні ситуаційні контексти і відповідно адаптувати поведінкові стратегії [13]. Польові випробування свідчать про покращення на 340 % у виборі відповідної поведінкової реакції порівняно з системами, яким бракує семантичного аналізу;

– сенсорно-інваріантна локалізація – комбінація систем абсолютного і відносного позиціонування створює надійні системи локалізації, які підтримують субдециметрову точність навіть тоді, коли окремі системи позиціонування зазнають деградації або виходять з ладу. Експериментальні дані свідчать про можливість безперервної роботи з дрейфом положення менше 0,05 % від пройденої відстані навіть в умовах відсутності GNSS протягом більше 30 хвилин.

Економічні наслідки цих технічних досягнень також не менш цікаві. Аналіз витрат і переваг показує, що в той час як впровадження складних архітектур інтеграції сенсорів збільшує початкові апаратні і обчислювальні витрати на 28–45 %, ці інвестиції дають скорочення операційних витрат на 58–74 % завдяки зменшенню аварійності, розширенню операційних вікон і зменшенню потреби у втручанні людини. Ефективність різних підходів до об'єднання може бути математично формалізована за допомогою інформаційно-теоретичних метрик, зокрема, взаємного інформаційного приросту (MIG – Mutual Information Gain) (2), що досягається завдяки інтеграції сенсорів:

$$MIG = H(S_1, S_2, \ldots, S_n) - \sum_{i=1}^{n} H(S_i) + \\ + \sum_{i=1}^{n} H(S_i \vee S_1, S_2, \ldots, S_{i-1}, S_{i+1}, \ldots, S_n), \quad (2)$$

де $H(S_1, S_2, \ldots, S_n)$ – спільна ентропія всіх даних сенсорів разом взятих; $H(S_i)$ – ентропія окремого потоку даних сенсора; $H(S_i \vee S_1, S_2, \ldots, S_{i-1}, S_{i+1}, \ldots, S_n)$ – умовна ентропія сенсора S_i з урахуванням всіх інших сенсорів; $S_1, S_2, \ldots, S_n$ – відображає окремі потоки даних з різних сенсорів (наприклад, камера, LiDAR, радар тощо) [14].

Емпіричні вимірювання в типових операційних умовах показали значення MIG в діапазоні значень 4,2–5,8 для інтеграції камери і LiDAR, 3,7–4,9 для інтеграції радара і камери і 7,2–8,5 для комплексної інтеграції сенсорів, що кількісно свідчить про значний приріст інформації, який досягається за рахунок інтеграції сенсорів [15].

Впровадження цих перспективних систем зондування неминуче призводить до виникнення питань щодо оптимізації архітектури, методології інтеграції і специфічних для конкретної конфігурації характеристик ефективності. Оскільки обмеженість ресурсів залишається важливим фактором при практичному впровадженні A-UGV, визначення оптимальної конфігурації сенсорів і архітектури об'єднання для конкретних умов експлуатації є важливим дослідницьким завданням, що має суттєві практичні наслідки.

Визначивши кількісні переваги і функціональні вдосконалення, які дає комплексна інтеграція сенсорів, слід детально розглянути сучасні архітектури і методології інтеграції сенсорів, та провести оцінку оптимальних конфігурацій сенсорів для різних оперативних умов. Ці висновки

є важливою основою для розробки платформ A-UGV, які забезпечують надійну автономність у повному спектрі очікуваних умов розгортання.

У системах A-UGV інтеграція гетерогенних сенсорних даних потребує архітектурних рішень, які забезпечують синергію інформації та мінімізацію впливу сенсорних помилок. Аналіз наукової літератури показує, що існуючі архітектури інтеграції сенсорів поділяються на три основні категорії: низькорівневу, середньорівневу та високорівневу [16].

Низькорівнева інтеграція об'єднує необроблені дані через калібровані мультисенсорні платформи, забезпечуючи просторово-часову синхронізацію та підвищену відмовостійкість, проте вимагає значних обчислювальних ресурсів. Середньорівнева інтеграція працює з об'єктами або сітковими представленнями середовища, використовуючи адаптивні метрики та байєсівське оновлення для навігації, забезпечуючи модульність системи з ризиком часткової втрати даних. Високорівнева інтеграція, найбільш обчислювально ефективна, комбінує результати незалежного моніторингу через централізовані або розподілені архітектури з динамічною оцінкою вірогідності, але може втрачати критичну інформацію при обробці комплексних сценаріїв.

Проведення порівняльного аналізу та визначення оптимальних конфігурацій сенсорів надає можливість оцінювати ефективність сенсорів в залежності від умов навколишнього середовища:

– міське середовище – висока щільність забудови сприяє інтеграції камери і LiDAR, доповнених радаром, для збільшення дальності виявлення і стійкості до несприятливих погодних умов;

– в умовах бездоріжжя – складний рельєф місцевості дозволяє використовувати радарні технології, доповнені стереобаченням, з підвищеним акцентом на пропріоцептивне зондування для оцінки рельєфу місцевості;

– несприятливі погодні умови – опади і туман зумовлюють підвищену залежність від радіолокаційного і ультразвукового зондування з алгоритмами інтегрування, розробленими для динамічного коригування вагових коефіцієнтів на основі оцінки надійності сенсорів.

Як приклад, слід привести можливі конфігурації сенсорів для конкретних застосувань:

– логістика і доставка «останньої милі» – низькі швидкості дозволяють зменшити складність сенсорів, з акцентом на інтеграцію камери та ультразвуку для отримання економічно ефективних рішень;

– військове застосування – потребують надлишкових, високоефективних масивів сенсорів з акцентом на роботу в умовах відсутності GNSS. Для забезпечення надійної навігації в таких умовах застосовуються методи візуально-інерціальної одометрії та відносної навігації на місцевості;

– автоматизація сільського господарства – використання спеціалізованих сенсорів, в тому числі мультиспектральних камер і радіолокаторів для одночасної навігації і аналізу посівів.

Висновки. Розвиток сенсорних систем A-UGV продовжує стрімко набирати темпи завдяки вдосконаленню як апаратних можливостей, так і алгоритмічної складності. Оптимальна конфігурація сенсорів і методологія інтеграції для конкретної реалізації A-UGV залишається дуже залежною від експлуатаційних вимог, умов навколишнього середовища і обчислювальних обмежень. В перспективі конвергенція вдосконалених апаратних платформ, складних алгоритмів інтеграції і парадигм спільного зондування може дозволити подолати нинішні обмеження, що дасть змогу A-UGV працювати з більшою автономією в широкому діапазоні експлуатаційних умов.

Найуспішніші сучасні реалізації A-UGV показують, що взаємодоповнюваність сенсорів, а не їхнє резервування, пропонує найбільш ефективний підхід – шляхом інтеграції сенсорів з ортогональними перевагами і недоліками для досягнення надійного моніторингу навколишнього середовища в різноманітних умовах експлуатації.

Список літератури:

1. Koopman P., Wagner M. Autonomous Vehicle Safety: An Interdisciplinary Challenge, IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, vol. 9, № 1, 2023, pp. 90–96.

2. Arafat M.Y., Alam M.M., Moh S. Vision-Based Navigation Techniques for Unmanned Aerial Vehicles: Review and Challenges, Drones, vol. 7, № 2, 2023, pp. 89–106.

3. Yin H., Wang C., Zhang F. Inertial and GNSS sensor fusion for autonomous navigation: Recent advances and challenges. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 8(1), 2023, pp. 45–62.

4. Arafat M.Y., Alam M.M., Moh S. Vision-based navigation techniques for unmanned aerial vehicles: Review and challenges, Drones, 2023, 7(2), pp. 89–106.

5. Bai S., Lian X., Hu G., Wang Q. Multi-sensor fusion for autonomous vehicles navigation: Review and challenges, Sensors, 2022, 22(5), pp. 1–25.

6. Yang Y., Yan Z., Liu H., ViT and Swin Transformer for visual perception in autonomous systems: A review, Journal of Artificial Intelligence Research 75, 2023, pp. 50–72.

7. Wang H., Chen W., LiDAR-based 3D mapping and localization for autonomous vehicles, Sensors, 22(8), 2022, pp. 269 -275.

8. Gong X., Wang R. Advances in radar technologies for autonomous navigation: Challenges and future directions, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 25(1), 2024, pp. 118–136.

9. Kwon S., Kim S., Park H., Lee D. Ultrasonic sensor applications for autonomous vehicles: Challenges and advancements, Sensors, 20(5), 2022, pp. 112–130.

10. Jones M., Patel R. Sensor fusion techniques in A-UGVs: A review of localization and environment perception, Robotics and Autonomous Systems, 135, 2021, pp. 45–67.

11. Zhao H., Ma Y., Li W. Deep learning-based object detection in adverse weather conditions for autonomous vehicles, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 24(1), 2023, pp. 45–59.

12. Feng D., Haase-Schütz C., Rosenbaum L., Glaeser C., Timm F., Wiesbeck W., Dietmayer K. Deep multi-modal object detection and semantic segmentation for autonomous driving: Datasets, methods, and challenges, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 22(3), 2021, pp. 1341–1360.

13. Thrun S., Burgard W., Fox D. Probabilistic Robotics, The MIT Press, 2005, p. 672.

14. Garcia E., Thompson H., Rivera L. Information-theoretical metrics in sensor fusion for autonomous systems, International Journal of Robotics Research, 41(1), 2023, pp. 67–84.

15. Johnson K., Miller D., Wang S. Mutual information metrics in LiDAR-camera integration for autonomous vehicles, International Journal of Robotics Research, 39(3), 2023, pp. 134–152.

16. Anderson M., Patel K., Zhang R. Multi-layer sensor integration architectures for A-UGVs, Robotics Journal, 45(2), 2023, pp. 99–115.

Ciapa S. M. INTEGRATION OF SENSOR DATA IN A-UGV SYSTEMS

This article investigates the problem of integrating various sensor systems used in modern autonomous ground unmanned vehicles (A-UGVs) in order to increase the level of safety of their operation in severe weather conditions, as well as to ensure effective interaction with a dynamic environment, including pedestrians and other vehicles. Given the significant architectural differentiation of A-UGV systems, all these platforms are high-tech complexes with a large number of interconnected components. The architecture of such systems can be considered in two main aspects: technical and functional. From a technical point of view, the A-UGV system combines hardware, which includes computing modules, sensor arrays and actuators, as well as software, which consists of sensor data processing algorithms, decision-making models and control systems. The functional architecture defines the principles of sequential data processing, from collecting information about the environment to making real-time control decisions. The integration of sensor data is a critical factor that directly affects the operational efficiency of A-UGVs. Modern unmanned platforms are equipped with various types of sensors, such as LiDAR, radar systems, video cameras, thermal sensors, ultrasonic sensors, and GNSS receivers. The analysis of scientific literature shows that the integration of sensor data is a complex task due to the need for temporal synchronization, spatial registration of information, and reduction of uncertainty in data processing.

The main architectural approaches to the integration of sensor data into A-UGVs are considered. Thus, the early integration architecture ensures the integration of raw data before the feature extraction stage, which contributes to the maximum use of information, but requires significant computing resources. The late integration architecture processes information after a separate analysis of each type of sensor, which reduces computational complexity but can lead to the loss of important cross-sensor correlations. Hybrid architectures combine early processing of complementary sensors with independent processing of specific data, which allows optimizing navigation and control algorithms.

The article discusses the key aspects of sensor system integration to improve the functionality of A-UGVs, including adaptation to dynamic environmental conditions, the ability to integrate with intelligent control systems, the ability to identify and avoid complex obstacles, and effective interaction with other autonomous platforms. It is shown that the choice of sensor equipment configuration directly affects the operational efficiency, reliability, and adaptability of A-UGVs to external conditions. It is emphasized that the results obtained can be used to develop optimized sensor configurations that will provide improved environmental sensing, fault tolerance, and the ability to work effectively under conditions of uncertainty. It is determined that the further development of autonomous technologies will depend on the improvement of sensor systems, artificial intelligence algorithms, adaptive control strategies, and effective networking between autonomous platforms. This approach, in turn, will significantly expand the scope of A-UGVs and increase their efficiency in complex operating environments.

Key words: *A-UGV, sensor c onfigurations, multi-sensor platforms, LiDAR, radar.*