

РЕЦЕНЗІЯ

кандидата технічних наук, доцента кафедри
комп'ютерних технологій та інформаційної безпеки
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова
Сірівчука Андрія Сергійовича
на дисертаційну роботу
Роботька Сергія Павловича

«Багаторівнева автоматизована система керування роботизованою платформою для
задач просторового моніторингу на основі комп'ютерного зору»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
в галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування
за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Актуальність теми дисертаційної роботи

Інтенсивний розвиток безпілотних авіаційних комплексів та мобільних робототехнічних платформ відкриває принципово нові горизонти для автоматизації процесів дистанційного зондування, особливо у сферах, пов'язаних із критичним ризиком для життя людини, таких як гуманітарне розмінування територій. Сучасні інженерні вимоги до таких систем безапеляційно диктують необхідність переходу від класичних телекерованих платформ до високоавтономних кіберфізичних систем. Такі комплекси повинні мати здатність не лише пасивно збирати сенсорні дані, але й інтелектуально адаптувати свою просторову поведінку, коригуючи траєкторію, швидкість та висоту польоту на основі складного семантичного розуміння мінливого оточуючого середовища.

Відсутність надійних, математично обґрунтованих методів замкненого адаптивного керування рухом на основі мультимодальних гетерогенних сенсорних даних залишається ключовою науково-технічною проблемою галузі. У зв'язку з цим,

розробка багаторівневої автоматизованої системи керування, що безшовно інтегрує алгоритми глибокого комп'ютерного зору та аналогові геофізичні датчики безпосередньо в контур стабілізації та навігації безпілотного апарата, є виключно актуальною, своєчасною та практично затребуваною.

Дисертаційна робота органічно пов'язана з пріоритетними напрямками досліджень у сфері робототехніки та систем керування. Робота є невід'ємною складовою частиною держбюджетної науково-дослідної теми «Новітні системи дистанційного керування мобільними роботами для відновлення суден і портової інфраструктури», де здобувач брав безпосередню участь як виконавець, фокусуючись на дослідженні та розробці систем автоматичного керування мобільними платформами.

Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямками Університету та кафедри

У тексті дисертації зазначено використання результатів у межах держбюджетної теми «Новітні системи дистанційного керування мобільними роботами для відновлення суден і портової інфраструктури» (номер державної реєстрації 0126U001721), а також впровадження у навчальний процес.

Ступінь наукової обґрунтованості результатів, сформульованих в роботі, їх наукова новизна

З позиції теорії складних систем та процесів автоматичного керування, наукові результати, отримані здобувачем, відзначаються глибоким теоретичним підґрунтям та бездоганною обґрунтованістю. Автором проведено масштабну системну декомпозицію складної нелінійної задачі керування гетерогенною робототехнічною системою. Високої оцінки заслуговує застосування жорсткого математичного апарату кватерніонів для опису просторової орієнтації та побудови динамічної моделі обертального руху гексакоптера. Такий підхід дозволив елегантно усунути проблему кінематичної сингулярності, притаманну класичним системам на базі кутів

Ейлера та забезпечити математично строгу і стабільну роботу контурів пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання при виконанні складних просторових маневрів, зокрема інтенсивного зниження над ціллю.

Наукова новизна результатів дослідження концептуально розкривається у таких ключових аспектах. По-перше, створено та обґрунтовано багаторівневу ієрархічну архітектуру розподілених обчислень. Ця архітектура математично оптимізує баланс системи, забезпечуючи сувору мінімізацію транспортних затримок для критичного внутрішнього контуру навігації та стабілізації, і водночас безмежно розширюючи аналітичні можливості системи зовнішніми ресурсами штучного інтелекту.

По-друге, набув фундаментального розвитку метод автоматичного адаптивного керування польотом, який технічно реалізує замкнений контур «сенсорне сприйняття – семантична верифікація – фізична дія» за допомогою вбудованих мікросервісів комунікаційного протоколу телеметрії. Автоматизована платформа отримала здатність самостійно здійснювати перехід з режиму пасивного проходження маршрутних точок у режим активного маневрування та дослідження цілі на основі розрахованої інтегральної оцінки ризику.

По-третє, удосконалено математичну модель агрегації довіри, яка в контексті теорії керування виступає як потужне нелінійне наближення рекурсивного байєсівського фільтра. Модель динамічно зважує та асимілює інформацію від візуального детектора, текстових дескрипторів та сигналів електромагнітних аномалій, що кардинально підвищує загальну робастність системи автоматичного керування до інтенсивних зовнішніх збурень та сенсорних шумів.

Структура і зміст дисертації

Дисертаційна робота характеризується чіткою логічною побудовою, структурованістю викладу та глибокою аналітикою, що повністю відповідає поставленій меті та завданням дослідження.

У вступній частині технічно коректно обґрунтовано актуальність проблематики, чітко визначено об'єкт, предмет, мету та комплекс завдань дослідження, а також розкрито методологічну базу.

Перший розділ містить ґрунтовний аналітичний огляд архітектур сучасних систем керування безпілотними платформами, протоколів цифрової телеметрії, алгоритмів жорсткого сенсорного злиття на базі розширеного фільтра Калмана та еволюції методів комп'ютерного зору. Автор на високому експертному рівні обґрунтовує технічну неспроможність класичних розімкнених систем керування у задачах прецизійного моніторингу вибухонебезпечних предметів та формулює жорсткі вимоги до архітектури замкненого контуру.

Другий розділ фундаментально присвячений синтезу апаратної структури та кінематики кіберфізичної системи. Здобувач детально виводить математичну модель динаміки гексакоптера на основі формалізму Ньютона-Ейлера з кватерніонним поданням. Особливу увагу приділено матриці мікшування моторів, яка є математичним ядром для перетворення віртуальних команд керування у фізичні ШІМ-сигнали для гвинтомоторних груп.

Третій розділ розкриває повне алгоритмічне забезпечення системи. Сформульовано математичну модель мультимодального злиття даних у режимі реального часу. Здобувач вичерпно описує структуру контуру зворотного зв'язку: як саме результати оптичної детекції та семантичної хмарної верифікації проходять через цифрові фільтри та перетворюються у жорсткі керуючі команди просторового переміщення платформи. Розділ демонструє, як семантична верифікація виступає логічним фільтром у контурі керування, запобігаючи дестабілізації системи хибними цілевказівками.

У четвертому розділі представлено розгорнуті результати натурних польових експериментів, які безперечно підтверджують стійкість розробленої системи керування, прецизійну точність просторової локалізації об'єктів та феноменальну

здатність системи автоматично париувати апаратні та алгоритмічні помилки першого роду, утримуючи стабільну траєкторію польоту в умовах зовнішніх збурень.

Практичне значення наукових результатів

Отримані науково-технічні результати мають надзвичайно високу інженерну та прикладну цінність для галузі проєктування систем автоматичного керування складними мобільними робототехнічними комплексами. Запропоновані математичні моделі та алгоритмічні рішення доведені до стадії діючого програмно-апаратного забезпечення. Комплексне тестування в реальних умовах підтвердило працездатність системи. Офіційні акти впровадження від профільних технологічних підприємств та активне використання матеріалів дослідження у навчальному процесі профільного університету беззаперечно підтверджують високий рівень прикладної значущості та зрілості виконаної роботи.

Повнота викладення основних результатів дослідження в опублікованих наукових працях

Результати дисертаційної роботи відображено у 21 науковій публікації, 7 з яких є основними. Зокрема, одну статтю опубліковано у виданні, що індексується у наукометричній базі Scopus (квартиль Q3), і ще шість – у наукових журналах, включених до переліку фахових видань України. Такий рівень апробації свідчить про належну якість і наукову значущість отриманих результатів. Достовірність головних наукових положень дисертаційної роботи також підтверджується їхньою апробацією на Міжнародних і Всеукраїнських наукових конференціях, опубліковано 13 тез доповідей. В опублікованих наукових працях у повному обсязі відображено основний зміст дисертації, а також викладено отримані наукові результати та сформульовані висновки, що становлять її основу.

Відомості про дотримання академічної доброчесності

Під час ознайомлення з дисертаційною роботою встановлено наявність посилань на використані джерела та відсутність ознак недоброчесного запозичення у формулюваннях основних положень.

Дискусійні положення та зауваження щодо дисертації

Оцінюючи дисертаційну роботу як фундаментальне, комплексне та логічно завершене наукове дослідження, необхідно вказати на окремі технічні недоліки, вузькі місця та дискусійні питання, що природно виникають при детальному аналізі роботи з позиції жорсткої теорії систем автоматичного керування:

– перше зауваження стосується неповноти опису динамічної моделі в частині налаштування регуляторів. У другому розділі наведено математичні рівняння динаміки гексакоптера з використанням кватерніонного апарату. Проте у тексті роботи відсутній детальний інженерний опис процесу синтезу та параметричного налаштування каскадних пропорційно-інтегрально-диференціальних регуляторів контурів кутової та лінійної швидкості автопілота. При виконанні автоматичного маневру зниження до висоти 1-2 метри для забезпечення ефективної роботи магнітного сенсора, безпілотник неминуче потрапляє в зону інтенсивного аеродинамічного впливу екрану землі. У дисертації не розкрито, чи використовується в алгоритмах адаптивне підлаштування коефіцієнтів регулятора в реальному часі, чи застосовуються більш складні робастні методи керування для надійної компенсації цих потужних нелінійних аеродинамічних збурень;

– другим важливим аспектом є відсутність суворого математичного аналізу впливу транспортної затримки на стійкість замкненого контуру. Запропонована гібридна обчислювальна архітектура передбачає передачу масивів зображень на наземний рівень, а згодом пересилання обраних кадрів на хмарний рівень для ресурсомісткої семантичної верифікації, після чого формується зворотна керуюча команда. Цей багатоетапний мережевий процес генерує значну і стохастичну

транспортну затримку у зовнішньому контурі навігації, яка може сягати кількох секунд. У роботі бракує формального аналізу стійкості такої системи з урахуванням запізнення, наприклад, з використанням предиктора Сміта або частотних критеріїв стійкості. Залишається не повністю розкритим механізм гарантування того, що система уникне автоколивань, якщо під час очікування відповіді від хмарного сервера дрон продовжує інерційний рух або зміщується під інтенсивною дією вітрових збурень;

– третє дискусійне положення охоплює формалізацію математичного закону адаптації вагових коефіцієнтів. Впроваджена модель зваженої агрегації довіри математично об'єднує ймовірності від оптичного детектора, магнітного сенсора та хмарних моделей. Автором зазначено, що вагові коефіцієнти можуть адаптивно коригуватися системою залежно від мінливих умов середовища. Однак у тексті дослідження не наведено строгого аналітичного закону або детермінованого адаптивного алгоритму, наприклад, на основі нечіткої логіки або методів оптимізації, за яким обчислюються поточні динамічні значення цих ваг під час польоту. Наданий опис механізму адаптації виглядає переважно евристичним і потребує жорсткішої математичної формалізації;

– четверте зауваження стосується відсутності глибокого аналізу енергетичного балансу бортової системи керування. Постійне використання обчислювального вузла для захоплення відео високої роздільної здатності, апаратного стиснення потоку, роботи з сенсорами та підтримки бездротового зв'язку створює додаткове та суттєве енергетичне навантаження на систему живлення апарата. У дослідженні бракує кількісного інженерного аналізу компромісу між значними витратами енергії на інтенсивні бортові обчислення та відповідним скороченням загального безпечного часу автономного польоту гексакоптера. Детальний розрахунок енергетичного бюджету місії значно посилив би технічну цінність розробки.

– п'ятий аспект пов'язаний з прецизійною точністю просторово-часової синхронізації апаратних сигналів. У роботі вказано, що синхронізація відеокадрів і сигналів індукційного металодетектора здійснюється за еталонним часом супутникових систем. Проте аналоговий сигнал металодетектора оцифровується апаратним перетворювачем, підключеним до мікрокомп'ютера. В умовах обробки переривань операційної системи загального призначення неминуче виникає апаратний та програмний часовий джитер. Дисертації бракує статистичного аналізу розподілу цих часових похибок синхронізації та оцінки їхнього прямого кінематичного впливу на просторову похибку локалізації вибухонебезпечного предмета на карті при русі платформи з маршовими швидкостями.

Наведені вище зауваження та дискусійні положення є елементом глибокої наукової дискусії щодо шляхів удосконалення складних багатовимірних кіберфізичних систем. Вони жодним чином не ставлять під сумнів беззаперечну достовірність отриманих експериментальних результатів, вагомих особистий внесок автора у розвиток робототехніки та загальну високу оцінку виконаної дисертаційної роботи.

Загальний висновок

Дисертаційна робота на тему «Багаторівнева автоматизована система керування роботизованою платформою для задач просторового моніторингу на основі комп'ютерного зору» є глибоким, методологічно цілісним і логічно завершеним науковим дослідженням, яке робить фундаментальний та практичний внесок у розвиток теорії і практики систем автоматичного керування автономними безпілотними комплексами.

Робота повністю відповідає всім критеріям та вимогам нормативних документів, що регламентують присудження наукових ступенів, а її автор, безперечно, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у відповідній галузі знань. Інженерні рішення, математичні моделі та архітектурні

концепції, розроблені в межах даного дослідження, мають значний потенціал для подальшого масштабування та впровадження у критично важливих секторах промисловості та безпеки.

Рецензент:

кандидата технічних наук, доцента кафедри

комп'ютерних технологій та інформаційної безпеки

Національного університету кораблебудування

імені адмірала Макарова

_____ Сірівчука А. С.

Підпис Сірівчука А. С. підтверджую:

начальник відділу кадрів

Національного університету кораблебудування

імені адмірала Макарова

_____ Зубарєв А.А.