

Голові

разової спеціалізованої вченої ради
Інституту математики НАН України
доктору фізико-математичних наук,
заступнику директора з наукових питань
Інституту математики НАН України
Василику Віталію Богдановичу

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

САМОЙЛЕНКА Олега Андрійовича на тему:

«Applied mathematical problems of visual object localization under resource constraints»
(«Прикладні математичні задачі візуальної локалізації об'єктів за умови обмежених
ресурсів»),

подану на здобуття ступеня доктора філософії
у галузі знань 11 Математика та статистика
за спеціальністю 113 Прикладна математика.

Дисертаційне дослідження О.А. Самойленка присвячено побудові системи визначення координат рухомого апарата, у якій дані бортової камери та покази сенсорів руху опрацьовуються в єдиному контурі оцінювання стану. Локалізацію тут розглянуто як задачу обробки різномірних інформаційних потоків: відеопотік дає прив'язку до земної поверхні через порівняння спостережуваного кадру з наперед підготовленим картографічним матеріалом, сенсори руху дають приріст координат між такими прив'язками, а фільтр Калмана виконує роль вирішального елемента, що зважає обидва потоки за їхньою достовірністю. Описану систему реалізовано програмно і перевірено вимірюваннями.

Актуальність дослідження визначає стан розвитку безпілотних систем. Переважна більшість наявних платформ будує маршрут за сигналом супутникової системи, і саме цей канал найлегше вивести з ладу постановкою завад або підміною сигналу. Тому дедалі більший інтерес викликають способи автономного визначення координат, що спираються на власні спостереження апарата, передусім на телевізійне зображення місцевості. Технічно ця ідея відома давно, проте її впровадження впирається у два питання, які й досліджує здобувач. Перше: наскільки можна довіряти конкретному результату розпізнавання місцевості, адже якість збігу кадру з картою помітно коливається залежно від умов спостереження. Друге: чи вкладаються потрібні обчислення в ресурс бортового процесора малогабаритного апарата, де немає ані потужного графічного модуля, ані запасу живлення. Обидва

питання лежать у прикладній площині і потребують експериментальної відповіді, яку досліджує здобувач.

Наукову новизну дисертації визначають такі положення. Набули подальшого розвитку методи рекурсивного оцінювання стану та злиття сенсорів, через побудову та експериментальну перевірку алгоритму для колісної платформи. Запропоновано числову міру якості розпізнавання пари знімків, коефіцієнт валідних відповідей, яка обчислюється однаково для будь-якого способу опису ознак і завдяки цьому пов'язує підсистему комп'ютерного зору з підсистемою оцінювання стану. Вперше два класичні та один нейромережевий способи виявлення ознак випробувано за однією методикою і одним критерієм; зіставлення знімків безпілотних апаратів з геоприв'язаними опорними знімками набуло подальшого розвитку. Набули подальшого розвитку адаптивні методи фільтрації Калмана: рівень довіри до вимірювання за зображенням поставлено в пряму залежність від згаданої міри якості, тому невдалий кадр впливає на оцінку слабше, ніж вдалий.

У дисертації одержано такі **основні наукові результати**:

- Складено математичний опис руху колісної платформи і зведено його до вигляду, з яким працює фільтр Калмана; похибки сенсорів описано шумовими моделями з обґрунтованими числовими параметрами.
- Реалізовано алгоритм спільного опрацювання показів колісної одометрії та супутникового приймача і випробувано в моделюючому середовищі ROS2/Gazebo, де відома істинна траєкторія руху. Похибка визначення координат становила 0,33 м, що помітно краще, ніж дає кожен із каналів поодиночі: зменшення на 91,4% щодо одометрії та на 68,5% щодо супутникових даних. Результат одержано без ускладнення моделі руху, самим лише коректним урахуванням статистики похибок.
- Підсистему комп'ютерного зору реалізовано програмно в повному обсязі, від виявлення ознак до перевірки геометричної узгодженості, що й дало змогу виміряти витрати машинного часу на кожному етапі. Запропоновану міру якості розпізнавання обчислено для всіх трьох досліджених дескрипторів на єдиній вибірці супутникових знімків. Для пар знімків однієї ділянки вона становить десятки відсотків, а для пар різних ділянок не перевищує часток відсотка, тобто відмінність сягає двох порядків. Це дає змогу і відсіювати хибне розпізнавання, і чисельно виражати ступінь довіри до правильного.
- Вперше проведено пряме зіставлення класичних дескрипторів SIFT і ORB із нейромережевим SuperPoint одночасно за якістю розпізнавання та за витраченим машинним часом на процесорі без графічного

прискорювача. З дослідів впливають конкретні проектні рекомендації: SIFT переважає ORB за будь-якої кількості ознак, причому навіть 100 ознак SIFT дають кращий результат, ніж 2000 ознак ORB; збільшення кількості ознак понад 500 практично не поліпшує розпізнавання; SuperPoint дає найвищу якість розпізнавання, 43,81% при 34,45% у SIFT, проте працює у кілька разів повільніше, що для бортового застосування здебільшого невиправдано.

- Побудовано модель, за якою вимірювання координат за зображенням надходить у ту саму процедуру оцінювання, причому ступінь довіри до нього визначає поточна якість розпізнавання. Передбачено два режими роботи: підміну супутникового каналу на час його втрати та спільну роботу обох каналів із ваговим розподілом за їхньою достовірністю.

Структура викладення матеріалу є послідовною. *Перший розділ* оглядовий: перша його частина охоплює методи комп'ютерного зору, а саме класичні та навчені ознаки зображень, перевірку геометричної узгодженості, побудову компактного опису знімка для швидкого пошуку по базі, розпізнавання місцевості, а також обмеження, що їх накладає бортова обчислювальна техніка. Друга частина огляду присвячена обробці показів сенсорів: рекурсивному оцінюванню, схемам об'єднання різнорідних вимірювань, самоналагоджувальним варіантам фільтра та побудові карти під час руху. Слід відзначити увагу до праць вітчизняних дослідників у галузі навігації за зображенням. Розділ закінчено постановкою невирішеного питання, з якого будується дисертація. *Другий розділ* описує підсистему оцінювання стану: від рівнянь руху до робочих формул прогнозу й корекції, з поясненням, як коефіцієнт передачі розподіляє довіру між моделлю та вимірюванням. Працездатність цієї підсистеми підтверджено розрахунком на моделі з відомою істинною траєкторією; для порівняння окремо прораховано варіанти, у яких працює тільки одометрія або тільки супутниковий приймач. *Третій розділ* найбільш прикладний: у ньому подано програмну реалізацію підсистеми комп'ютерного зору, методику випробувань і зведені в таблиці показники якості та швидкодії для всіх досліджених способів опису ознак. Окремо відзначу, що всі три способи опису ознак пропущено через один і той самий обчислювальний конвеєр з однаковими налаштуваннями, тому одержана різниця показників характеризує самі алгоритми, а не умови випробування. Розділ завершує опис стикування двох підсистем: результат розпізнавання місцевості надходить на вхід оцінювача разом із числовою оцінкою власної достовірності, і саме ця оцінка визначає його вплив на підсумкові координати. Обидва розділи побудовано за однією схемою: теоретичне положення, програмна реалізація, вимірювання. Саме це й робить одержані результати відтворюваними.

Результати роботи мають широке прикладне застосування. Таблиці якості та швидкодії дають розробнику готовий орієнтир під час вибору алгоритму комп'ютерного зору для конкретного бортового процесора. Схема спільного опрацювання одометрії, супутникових даних і вимірювань за зображенням може бути покладена в основу навігаційного забезпечення наземних роботизованих платформ та безпілотних літальних апаратів, які працюють у зоні дії засобів радіоелектронної боротьби. Запропонована міра якості розпізнавання переноситься на інші системи комп'ютерного зору, де потрібно кількісно оцінювати достовірність результату. Створені програмні складники придатні до повторного використання і здатні скоротити цикл розробки бортового навігаційного забезпечення. Робота є перспективною з точки зору подальших досліджень: закладений у ній принцип узгодження довіри до каналу комп'ютерного зору з його поточним станом природно поширюється на інші типи сенсорів та інші носії.

Дисертацію оформлено відповідно до вимог, що висуваються до кваліфікаційних робіт на здобуття ступеня доктора філософії. Порухень академічної доброчесності у дисертації та наукових працях О.А. Самойленка не виявлено.

До роботи є такі **зауваження**:

1. Ваше дослідження виконано на однорідному наборі супутникових знімків, що не враховує сезонних змін (освітлення, сніговий покрив, стан рослинності). Водночас у реальній експлуатації саме ці фактори найчастіше спричиняють зриви візуальної прив'язки. Чи досліджували ви робастність запропонованої метрики якості (Inlier Ratio) до таких змін для класичних (SIFT, ORB) та навченого (SuperPoint) дескрипторів? Доречно було б дослідити можливість дотреновування нейромережевого детектора-дескриптора під такі умови, оскільки навчені моделі найлегше пристосувати до конкретного застосування.

2. У запропонованій схемі ви передбачаєте використання візуального спостереження як альтернативу або доповнення до GPS. Чи досліджували ви роботу фільтра в найгіршому сценарії — коли і GPS, і візуальний канал мають низьку якість (наприклад, втрата супутників і низький Inlier Ratio)? Як при цьому змінюється невизначеність Pest (зокрема, як швидко вона зростає) і чи не призводить це до втрати збіжності оцінки або до необхідності додаткових обмежень?

3. Усі експерименти виконано програмними засобами: підсистему оцінювання стану перевірено в моделюючому середовищі, а підсистему комп'ютерного зору на заздалегідь зібраній вибірці знімків. Для остаточного висновку про працездатність запропонованих рішень потрібні випробування на реальному апаратному забезпеченні в польових умовах, коли обидві складові працюють одночасно на бортовому обчислювачі рухомого апарата.

Зазначені зауваження мають характер побажань щодо продовження досліджень і не впливають на позитивну оцінку роботи. Дисертація є самостійним завершеним дослідженням прикладного спрямування, доведеним до працездатних програмних рішень і кількісно перевіреним.

Дисертаційна робота і наукові публікації Олега Андрійовича Самойленка відповідають спеціальності 113 Прикладна математика та задовольняють вимоги постанови № 44 Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», а їх автор заслуговує на присудження ступеня доктора філософії.

Офіційний опонент:

провідний науковий співробітник
відділу чисельних методів та
комп'ютерного моделювання
Інституту кібернетики
імені В. М. Глушкова НАН України,
кандидат фізико-математичних наук,
старший дослідник
Ніколаєвська Олена Анатоліївна



20 серпня 2026 р.