

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

РЕЦЕНЗІЯ

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.

Дисертаційну роботу присвячено задачі рекурсивного оцінювання стану рухомого об'єкта на площині за неповними та зашумленими вимірюваннями, коли абсолютні вимірювання положення надходять нерегулярно або відсутні. Неперервну кінематичну модель дискретизують і лінеаризують навколо поточної оцінки стану, після чого здійснюється корекція стану з використанням фільтру Калмана та наявної інформації про відносне переміщення об'єкту. Розглянуто випадок, коли абсолютне вимірювання положення одержують зіставленням зображень, а його достовірність змінюється від вимірювання до вимірювання і має бути врахована в моделі спостереження.

Актуальність теми зумовлена потребами задач автономного руху наземних і повітряних апаратів, у яких абсолютне вимірювання положення за допомогою супутникових систем навігації буває неточним або недоступним – у приміщеннях, у міській забудові та/чи за наявності завад. У таких умовах оцінку стану об'єкту доводиться отримувати з використанням відносних координат. Самостійно, такий підхід призводить до необмеженого зростання похибки оцінки стану, а тому реалістична процедура локалізації потребує використання додаткового джерела інформації про абсолютне положення, яке не залежить від супутникового сигналу. В якості такого додаткового джерела інформації зазвичай використовується локалізація за допомогою зіставлення поточного зображення, отриманого апаратом, з попередньо побудованою картою. З цим пов'язані дві проблеми, що розглядаються в представлений до захисту дисертації. Перша полягає в тому, що достовірність такого вимірювання істотно змінюється від кадру до кадру, тоді як

класична схема оцінювання спирається на фіксовану коваріацію вимірювання, а наявні підходи або повністю ігнорують ненадійне вимірювання або прирівнюють його до надійного, таким чином втрачаючи наявну інформацію про його достовірність. Друга проблема пов'язана з тим, що автономний апарат (наземний робот, дрон, тощо), стан якого визначається, має обмежені обчислювальні ресурси. Тому, точність кожного зі способів оцінювання стану за допомогою зіставлення зображень потрібно враховувати спільно з його обчислювальною вартістю, а не окремо від неї.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному. Набули подальшого розвитку методи рекурсивного оцінювання стану та злиття сенсорів (sensor fusion): побудовано й експериментально підтверджено відповідний метод для рухомого об'єкта на площині. Запропоновано єдиний показник якості зіставлення пари зображень і проведено порівняння класичних й нейромережевих способів ідентифікації локальних ознак. Набули подальшого розвитку адаптивні методи фільтрації Калмана. Зокрема, одержано математичну модель, що доповнює метод злиття сенсорів інформацією про положення, отриманою через зіставлення бортових знімків із попередньо побудованою картою, а коваріація цього спостереження є заданою монотонно спадною функцією запропонованого показника якості. Завдяки цьому не повністю достовірні вимірювання не ігноруються, як раніше, а враховуються з деякою (залежною від рівня достовірності) вагою. Практичне значення роботи визначається застосовністю одержаних результатів до задач визначення положення рухомих об'єктів за відсутності надійних абсолютних вимірювань що спричинена пасивною (фізичні перешкоди руху сигналу) чи активною (електронні перешкоди) протидією.

Основними науковими результатами роботи є:

- Зведено нелінійну кінематику диференціального приводу до лінійно-гаусової форми: побудовано неперервну модель руху, її дискретизацію за Ейлером і, для кусково-сталих швидкостей, точну дискретизацію, а також лінеаризацію першого порядку навколо поточної оцінки стану. Похибки джерел вимірювань формалізовано у вигляді моделей шуму процесу та шуму вимірювання.
- Для одержаної моделі побудовано метод злиття вимірювань на основі фільтру Калмана, що поєднує високочастотні вимірювання відносного переміщення з низькочастотними вимірюваннями абсолютного положення, і встановлено практичну придатність цього методу за допомогою чисельного експерименту з точними еталонними даними. Проведений експеримент демонструє істотне зменшення похибки оцінювання положення отриманого з допомогою розробленого методу

злиття в порівнянні з методами що використовують кожне з джерел вимірювань окремо.

- Запропоновано єдиний показник якості зіставлення пари зображень, а саме коефіцієнт валідних відповідностей, який характеризує частку зіставлень дескрипторів, що проходять геометричну перевірку; проведено чисельний експеримент, у якому цей показник обчислено для трьох різних способів опису локальних ознак на єдиному наборі даних. Показано що показник не залежить від способу опису ознак.
- Використовуючи запропонований показник, проведено чисельне порівняння трьох способів виявлення та опису локальних ознак (двох класичних і одного нейромережевого) за критеріями точності зіставлення та обчислювальної вартості. Розроблено алгоритм вибору конкретного методу виявлення/опису ознак за умови обмеженого обчислювального бюджету.
- Одержано математичну модель що доповнює метод злиття сенсорів візуальним спостереженням положення апарату, яке отримують зіставленням бортових знімків із попередньо побудованою картою. Коваріацію цього вимірювання задано як явну монотонно спадну функцію показника якості зіставлення, тож вагу внеску вимірювання при корекції стану визначає його достовірність, а не фіксована стала.

Дисертація має логічну **структуру**, побудовану від огляду стану проблеми до одержання нових результатів та їх чисельної перевірки. У *першому розділі* наведено систематизований огляд літератури. У частині оцінювання стану розглянуто рекурсивне байєсове оцінювання та фільтр Калмана; фільтрацію нелінійних та негаусових систем; схеми злиття різнорідних вимірювань; адаптивні модифікації, у яких коваріація вимірювання оновлюється використовуючи поточні дані про достовірність джерела інформації; а також методи одночасного оцінювання стану та побудови карти. У частині зіставлення зображень розглянуто локальні ознаки та їх опис; геометричну перевірку відповідностей; стійкі до викидів (стрибкоподібних змін шуму) методи; пошук за глобальними ознаками та розпізнавання місць; а також обмеження зумовлені скінченням обчислювальним ресурсом апарату. Окрему увагу приділено внеску української наукової спільноти в розбудову теорії систем навігацій з корекцією за зображенням. Розділ завершується формулюванням наукової прогалини, яку заповнює дисертація: співвідношення точності та обчислювальної вартості, з одного боку, і зв'язок якості зіставлення з поведінкою фільтра, з другого, не зведено до єдиного математичного трактування, а кількісний показник достовірності візуальної локалізації втрачається при використанні методів зі сталою коваріацією або жорстким відсіюванням недостовірних вимірювань. *Другий розділ* присвячено теоретичному

обґрунтуванню методу оцінювання стану. Відштовхуючись від неперервної кінематичної моделі диференціального приводу, з використанням дискретизації та лінеаризації навколо поточного значення стану, автором одержано лінійно-гаусову форму, до якої в подальшому застосовано фільтр Калмана. Побудовано рекурсивну модель кроку «прогноз-корекція», у якій коефіцієнт підсилення постає як оптимальний у середньоквадратичному сенсі баланс між прогнозом отриманим з рівняння еволюції стану (руху) та поточним вимірюванням, а шуми процесу та вимірювання моделюють похибки відповідних джерел; наведено граничні режими коефіцієнта підсилення, які роблять його роль наочною. Працездатність методу підтверджено чисельним експериментом з відомою еволюцією стану, в якому проведено порівняння побудованого гібридного методу оцінювання стану з алгоритмами, що спираються на єдине джерело вимірювань. У *третьому розділі* формалізовано моделі виявлення та опису локальних ознак і геометричної перевірки відповідностей, а також проведено порівняння цих моделей на єдиному наборі даних, використовуючи показник якості що запропоновано здобувачем. Основним результатом розділу є розроблена модель оцінювання стану, яка поширює запропонований у попередніх розділах метод, доповнюючи крок корекції стану інформацією отриманою через візуальне співставлення зображень з урахуванням згаданого вище показнику якості. Розглянуто два режими використання вищезазначеної інформації – замість абсолютного вимірювання на інтервалах де це вимірювання відсутнє; або спільно з ним у розширеному кроці корекції, коли використовується зважена сума обох вимірювань, з коефіцієнтами які пропорційні їх достовірностям.

Дисертацію оформлено відповідно до вимог, що висуваються до кваліфікаційних робіт на здобуття ступеня доктора філософії.

До дисертаційної роботи є наступні **зауваження**:

- Опис чисельного експерименту неповний. Не до кінця обґрунтовано вибір кроку дискретизації що використовується: крок узято меншим за період надходження абсолютних вимірювань, і з тексту не видно, чим це зумовлено. Про похибку дискретизації сказано лише те, як швидко вона спадає зі зменшенням кроку, проте її величини не наведено, тому залишається невідомим, чи є вона малою порівняно з шумом вимірювань. З тексту також не зовсім зрозуміло, з якою періодичністю обчислюють керування і чи визначають його за поточною оцінкою стану. Доцільно доповнити виклад кількісною оцінкою похибки дискретизації та розглянути інші схеми інтегрування, окрім явної схеми Ейлера, зокрема схеми другого порядку та неявні схеми.
- Чисельне дослідження обмежене одним режимом руху. Поза розглядом залишився випадок коли початковий стану апарату не є відомий, який

не може бути оцінений за наявними вимірюваннями; та випадок розривної зміни стану під дією зовнішнього збурення. В таких режимах можна було б краще оцінити межі застосовності побудованих методів.

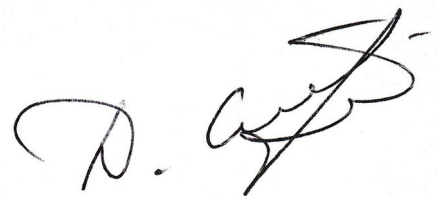
- Більшість результатів роботи є прикладними, проте бажано було б доповнити їх розвитком теоретичних напрямів, що природно впливають із побудованих моделей. Такими є, зокрема, постановка вибору кроку дискретизації як задачі оптимізації з обмеженнями на обчислювальний ресурс; обґрунтування вибору функції, що зв'язує показник якості зіставлення з коваріацією вимірювання. Теоретичне та практичне моделювання апаратів з більш розповсюдженим набором сенсорів (гіроскопи, акселерометри, електронний компас і т. п.), а також порівняння наведеного підходу з такими моделями є пріоритетом.
- Деякі формули з розділу 2 дисертації наведено без цитувань та детальних викладок про їх виведення. Більшість з таких формул є загальновідомими в контексті літератури на тему теорії керування та моделювання автономного руху огляд якої виконано в розділі 1.

Зазначені зауваження не впливають на достовірність одержаних результатів. Дисертація є завершеним дослідженням, виконаним на достатньому науковому рівні, має прикладну спрямованість, а її результати можуть бути використані в задачах визначення положення рухомих об'єктів за відсутності надійних абсолютних вимірювань.

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.

Рецензент:

старший науковий співробітник
відділу обчислювальної математики
Інституту математики НАН України,
кандидат фізико-математичних наук,
Ситник Дмитро Олексійович



20 серпня 2026 р.