

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ІНВАРІАНТНОГО РОЗШИРЕНОГО ФІЛЬТРУ КАЛМАНА ДЛЯ АВТОНОМНОЇ НАВІГАЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ВІЗУАЛЬНО-ІНЕРЦІЙНОГО SLAM

Вінницький національний технічний
університет

Анотація: дана робота присвячена дослідженню застосування інваріантного розширеного фільтра Калмана (IEKF) у системах візуально-інерційного SLAM для автономної навігації. Проведено порівняльний аналіз традиційного розширеного фільтра Калмана (EKF) та його модифікації IEKF, з метою оцінки їх ефективності в задачах локалізації та картографування. Особливу увагу приділено здатності IEKF враховувати симетрії системи для підвищення точності оцінки положення та орієнтації, а також зменшення дрейфу. Результати дослідження демонструють, що IEKF перевершує EKF, особливо в умовах нелінійностей та необоротних змін станів, забезпечуючи кращу узгодженість моделі та мінімізацію накопичення помилок. Показано, що IEKF-SLAM є перспективним рішенням для автономних транспортних засобів, мобільних роботів та інших застосувань, що потребують надійної навігації у складних середовищах. Ключовим напрямком подальших досліджень є оптимізація обчислювальних витрат IEKF та його адаптація для використання у вбудованих системах з обмеженими ресурсами.

Ключові слова: візуально-інерційний SLAM, інерційний вимірювальний пристрій, розширений фільтр Калмана, інваріантний фільтр.

Abstract: This work is devoted to the study of the application of the invariant extended Kalman filter (IEKF) in visual-inertial SLAM systems for autonomous navigation. A comparative analysis of the traditional extended Kalman filter (EKF) and its modification IEKF is carried out to assess their effectiveness in localization and mapping tasks. Particular attention is paid to the ability of IEKF to take into account system symmetries to increase the accuracy of position and orientation estimation, as well as to reduce drift. The results of the study demonstrate that IEKF outperforms EKF, especially in conditions of nonlinearities and irreversible state changes, providing better model consistency and minimizing error accumulation. It is shown that IEKF-SLAM is a promising solution for autonomous vehicles, mobile robots, and other applications that require reliable navigation in complex environments. The key direction of further research is the optimization of the computational costs of IEKF and its adaptation for use in embedded systems with limited resources.

Keywords: visual-inertial SLAM, inertial measurement device, extended Kalman filter, invariant filter.

Вступ

Одночасна локалізація та картографування (SLAM) є фундаментальною проблемою в робототехніці, яка полягає в здатності робота будувати карту невідомого середовища, одночасно визначаючи своє місцезнаходження в цій карті. Без SLAM роботи позбавлені справжньої автономії та покладаються на заздалегідь визначені шляхи або зовнішнє керування. SLAM є ключовою технологією, що використовується в робототехніці, автономних транспортних засобах, а також у таких галузях, як дослідження космосу, підводна навігація та підземне картографування. Вона навіть відіграє роль в інтерактивних іграх та програмах на основі штучного інтелекту. Широке застосування SLAM підкреслює її важливість як основної технології в автономних системах у різних сферах.

Одним із найраніших і найпоширеніших підходів до вирішення проблеми SLAM є використання розширеного фільтра Калмана. EKF SLAM використовує ймовірнісний підхід для оцінки стану робота (його положення та орієнтації) та карти навколишнього середовища, представляючи невизначеності за допомогою гауссових розподілів та коваріаційних матриць. Цей метод використовує фреймворк фільтра Калмана для обробки шумних даних датчиків та невизначеності як у русі робота, так і у вимірюваннях навколишнього середовища. Фільтр Калмана надає рекурсивний метод для оптимального оцінювання стану в лінійних гауссових системах, який EKF розширює для нелінійних систем через лінеаризацію [1-2].

Нещодавнім удосконаленням у галузі SLAM є інваріантний розширений фільтр Калмана. IEKF SLAM спрямований на усунення деяких обмежень та невідповідностей, властивих традиційному підходу EKF SLAM, особливо в обробці нелінійностей та симетрій проблеми SLAM. Цей метод використовує концепції теорії груп Лі для забезпечення більш геометрично узгодженої структури оцінювання. Застосування теорії груп Лі в IEKF SLAM дозволяє точніше представляти стан робота та

невизначеності, пов'язані з його рухом та сприйняттям, особливо щодо обертань . Групи Лі забезпечують природний спосіб моделювання жорстких перетворень тіла (обертань та переміщень), які є фундаментальними для проблеми SLAM [3-4].

Результати дослідження

IEKF SLAM є модифікацією стандартного EKF, яка використовує властиві багатьом роботизованим системам симетрії (або інваріантності), особливо ті, що пов'язані з рухом жорсткого тіла . IEKF SLAM часто формулюється в рамках теорії груп Лі, яка забезпечує математично строгий спосіб представлення та маніпулювання позами та перетвореннями робота . Використання груп Лі дозволяє більш природно та точно представляти простір станів та пов'язані з ним невизначеності, особливо щодо обертальних компонентів .

IEKF використовує інваріантні представлення помилок: замість стандартної лінійної помилки (різниці між істинним станом та оцінкою), IEKF використовує лівоінваріантні або правоінваріантні помилки, які визначаються на основі структури групи Лі . Ці інваріантні визначення помилок призводять до динаміки помилок, яка часто є незалежною від траєкторії, спрощуючи аналіз та покращуючи властивості збіжності фільтра . Ця незалежність від траєкторії є ключовою перевагою над стандартним EKF, де динаміка помилок залежить від конкретного шляху, пройденого роботом.

IEKF використовує терм корекції, заснований на інваріантній помилці виходу, а не на лінійній помилці виходу. Аналогічно, коефіцієнт Калмана оновлюється на основі інваріантної помилки стану . Ця геометрична адаптація зменшує залежність рівнянь коефіцієнта та коваріації від оціненого значення стану, часто призводячи до кращої збіжності . Поважаючи основну геометрію, IEKF уникає деяких підводних каменів лінеаризації навколо потенційно неточної оцінки стану.

Математичне формулювання IEKF SLAM підкреслює відмінності від стандартного EKF. IEKF часто включає використання алгебри Лі, пов'язаної з групою Лі, експоненційне відображення та операцію ретракції. Математичний фреймворк груп Лі надає інструменти для визначення узгоджених представлень невизначеності та поширення помилок у нелінійних системах . Цей фреймворк дозволяє більш принципово обробляти обертальні компоненти стану робота та пов'язані з ними невизначеності. Якобіани в IEKF часто обчислюються інакше, іноді з використанням перших доступних оцінок для покращення узгодженості . Обчислення якобіанів при перших оцінках може забезпечити, щоб лінеаризована система помилок стану мала той самий спостережуваний підпростір, що й базова нелінійна система SLAM, покращуючи узгодженість . Цей підхід спрямований на вирішення проблеми помилкового отримання інформації, яка може виникнути в стандартному EKF SLAM [5-7].

Переваги IEKF SLAM:

- **Покращена узгодженість:** IEKF SLAM зазвичай демонструє кращі властивості узгодженості порівняно з традиційним EKF SLAM, особливо в сценаріях зі значними невизначеностями обертання . Ця покращена узгодженість означає, що оцінена невизначеність точніше відображає фактичну помилку оцінювання, що призводить до більш надійних результатів . Узгоджені оцінювачі надають більш надійну міру точності своїх оцінок стану.
- **Стійкість до початкових умов:** IEKF може бути більш стійким до поганих початкових оцінок пози порівняно зі стандартним EKF . Зменшення залежності від поточної оцінки стану в IEKF сприяє цій підвищеній стійкості . Навіть при значних початкових помилках IEKF може збігатися до більш точного рішення.
- **Кращі властивості збіжності:** Рівняння коефіцієнта та коваріації в IEKF можуть збігатися до постійних значень на більшій множині траєкторій, що призводить до кращої загальної збіжності оцінювання . Ця покращена збіжність гарантує, що фільтр залишається стабільним та точним протягом триваліших періодів та складніших рухів робота . Фільтр менш схильний до розбіжності або видачі ненадійних оцінок під час дослідження роботом навколишнього середовища.
- **Ефективніше обробляє неспостережувані напрямки:** IEKF може правильно відображати неспостережуваний підпростір проблеми SLAM, запобігаючи помилковому отриманню інформації . Поважаючи властиву неспостережуваність, IEKF уникає тенденції стандартного EKF ставати надмірно впевненим у напрямках, де немає інформації . Це запобігає помилковому зменшенню коваріаційної матриці в неспостережуваних напрямках, що призводить до більш реалістичних оцінок невизначеності.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз EKF SLAM та Invariant EKF SLAM

Характеристика	EKF SLAM	Invariant EKF SLAM
Математична основа	Розширений фільтр Калмана, лінеаризація через розклад Тейлора першого порядку	Розширений фільтр Калмана на групах Лі, інваріантна помилка, геометрична корекція

Узгодженість	Схильний до невідповідностей, особливо при великих невизначеностях обертання	Покращена узгодженість завдяки геометричній формулюванню та обробці неспостережуваності
Точність	Може бути точним у простіших сценаріях, але страждає у високонелінійних випадках	Зазвичай вища точність, особливо у складних середовищах з високим рівнем шуму
Обчислювальна складність	$O(n^2)$ на крок оновлення (n: кількість орієнтирів)	Схожа на EKF SLAM, але можуть бути варіації залежно від реалізації
Чутливість	Чутливий до початкових умов, шуму датчиків та помилок асоціації даних	Більш стійкий до початкових умов та може краще обробляти певні типи шуму
Неспостережуваність	Може призвести до помилкового отримання інформації в неспостережуваних напрямках	Явно розглядає та обробляє неспостережуваний підпростір SLAM
Застосування	Роботи-пилососи, прості роботи для приміщень, навчальні цілі	Автономні транспортні засоби, підводна навігація, аерокосмічна галузь, високоточна робототехніка

Висновки

У даній роботі проведено аналіз методів локалізації та картографування на основі розширеного фільтра Калмана (EKF) та його інваріантної версії (IEKF). Дослідження показало, що EKF SLAM є фундаментальним та обчислювально ефективним методом, придатним для простіших сценаріїв, тоді як Invariant EKF SLAM пропонує значні переваги в узгодженості, надійності та точності, особливо у складних середовищах та застосуваннях, що вимагають точного оцінювання орієнтації.

Вибір між EKF SLAM та Invariant EKF SLAM залежить від конкретних вимог застосування, включаючи складність середовища, необхідність високої точності та узгодженості, доступні обчислювальні ресурси та необхідну стійкість до шуму датчиків та невизначеностей початкової пози. Для застосувань, що вимагають високої продуктивності та працюють у складних або динамічних середовищах, Invariant EKF SLAM часто є кращим вибором, незважаючи на потенційно вищу складність реалізації. Для простіших, ресурсно-обмежених застосувань EKF SLAM все ще може забезпечити адекватне рішення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. А. Жарков, Р. Маслій, В. Гармаш, “Аналіз підходів Visual SLAM для задачі навігації автономного робота”, Herald Khmelnytskyi Nat. Univ. Tech. sci., т. 335, № 3(1), с. 67–77, трав. 2024. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-335-3-10>.
2. M. Quan, S. Piao, M. Tan та S.-S. Huang, “Accurate Monocular Visual-Inertial SLAM Using a Map-Assisted EKF Approach”, IEEE Access, т. 7, с. 34289–34300, 2019. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2904512>.
3. Y. Ning, “A Comprehensive Introduction of Visual-Inertial Navigation”. 2023. <https://arxiv.org/abs/2307.11758>.
4. J. A. Castellanos, J. Neira та J. D. Tardós, “Limits to the consistency of EKF-based SLAM”, IFAC Proc. Vol., т. 37, № 8, с. 716–721, лип. 2004. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)32063-3](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)32063-3).
5. A. Barrau та S. Bonnabel, “Invariant kalman filtering”, Annu. Rev. Control, Robot., Auton. Syst., т. 1, № 1, с. 237–257, трав. 2018. <https://doi.org/10.1146/annurev-control-060117-105010>.
6. M. Xu, Y. Song, Y. Chen, S. Huang та Q. Hao, “Invariant EKF based 2D Active SLAM with Exploration Task”, у 2021 IEEE Int. Conf. Robot. Automat. (ICRA), Xi'an, China, 30 трав.–5 черв. 2021. IEEE, 2021. <https://doi.org/10.1109/icra48506.2021.9561951>.
7. T. Zhang, K. Wu, J. Song, S. Huang та G. Dissanayake, “Convergence and Consistency Analysis for a 3-D Invariant-EKF SLAM”, IEEE Robot. Automat. Lett., т. 2, № 2, с. 733–740, квіт. 2017. Дата звернення: 15 берез. 2025. <https://doi.org/10.1109/lra.2017.2651376>

Жарков Анатолій Володимирович — аспірант кафедри АІТ, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, с. Вила, Вінницького р-ну, Вінницької обл., e-mail: fkca.lakitjav@gmail.com

Маслій Роман Васильович – доцент кафедри АІТ, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: maslij.r.v@vntu.edu.ua

Zharkov Anatoliy — Department of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, village Vyla, Vinnytsia district, Vinnytsia region, e-mail: fkca.lakitjav@gmail.com

Maslii Roman V. – associate professor at the Department of AIIT, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: maslij.r.v@vntu.edu.ua