

ВІЗУАЛЬНО-ІНЕРЦІЙНИЙ SLAM З ВИКОРИСТАННЯМ ІНВАРІАНТНОГО РОЗШИРЕНОГО ФІЛЬТРУ КАЛМАНА ДЛЯ АВТОНОМНОЇ НАВІГАЦІЇ

Вінницький національний технічний
університет

Анотація: дана робота присвячена розвитку та застосуванню візуально-інерційного SLAM на основі інваріантного розширеного фільтра Калмана (IEKF) для задач автономної навігації. Попередні підходи на базі класичного EKF демонструють суттєві обмеження через похибки лінеаризації у необоротних станах, що призводить до явища хибної спостережуваності та експоненційного накопичення дрейфу під час складних маневрів. У цій роботі запропоновано підхід на основі теорії матричних груп Лі ($SE_2(3)$), який дозволяє зберігати геометричну узгодженість системи під час високодинамічного руху. Для тестування та порівняльного аналізу розроблено середовище комп'ютерного моделювання реалістичним сценарієм траєкторій: міський квартал із різкими поворотами. Результати експериментів підтверджують, що IEKF SLAM забезпечує вищу точність побудови траєкторії та практично повністю усуває масштабний дрейф кута рискування у порівнянні з класичним EKF SLAM.

Ключові слова: візуально-інерційний SLAM, інваріантний розширений фільтр Калмана, групи Лі, інерційний вимірювальний пристрій, автономна навігація, дрейф траєкторії.

Abstract: This work is devoted to the development and application of visual-inertial SLAM based on the invariant extended Kalman filter (IEKF) for autonomous navigation tasks. Previous approaches based on the classical EKF demonstrate significant limitations due to linearization errors in irreversible states, which leads to the phenomenon of false observability and exponential accumulation of drift during complex maneuvers. In this work, an approach based on the theory of Lie matrix groups ($SE_2(3)$) is proposed, which allows preserving the geometric consistency of the system during highly dynamic motion. For testing and comparative analysis, a computer simulation environment with a realistic trajectory scenario is developed: a city block with sharp turns. Experimental results confirm that IEKF SLAM provides a higher trajectory construction accuracy and almost completely eliminates the large-scale yaw angle drift compared to the classic EKF SLAM.

Keywords: visual-inertial SLAM, invariant extended Kalman filter, Lie groups, inertial measurement device, autonomous navigation, trajectory drift.

Вступ

Одночасна локалізація та картографування (SLAM) є базовою та найбільш критичною технологією для забезпечення повної автономності мобільних роботів, безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та автономних автомобілів у невідомих середовищах. В умовах відсутності або придушення сигналів глобальних систем позиціонування (GPS), що є особливо актуальним для проведення пошуково-рятувальних або розвідувальних операцій у зонах конфліктів, візуально-інерційний SLAM виступає найбільш надійною альтернативою.

Візуально-інерційна одометрія та SLAM поєднують переваги двох комплементарних сенсорів. Камери забезпечують високу роздільну здатність і багату інформацію про навколишнє середовище, дозволяючи фіксувати візуальні орієнтири для корекції дрейфу. Водночас інерційні вимірювальні пристрої (ІВП) надають дані про лінійні прискорення та кутові швидкості з високою частотою, забезпечуючи надійну оцінку масштабу та стійкість системи при різких змінах освітлення або перекриттях камери (оклюзіях).

Традиційні підходи до вирішення задач візуально-інерційного SLAM, засновані на використанні розширеного фільтра Калмана (EKF), мають ряд фундаментальних математичних недоліків. Основна проблема полягає у некоректній лінеаризації нелінійних моделей кінематики. У класичному EKF матриця Якобіана, яка використовується для поширення коваріації похибок, залежить від поточної (і часто помилкової) оцінки стану системи. Це призводить до явища "помилкової спостережуваності" (false observability), коли фільтр починає "довіряти" невірним оцінкам напрямку руху (yaw), що неминуче викликає дрейф траєкторії у довготривалих місіях [1-2].

Для подолання цих недоліків останніми роками активно досліджується Invariant Extended Kalman Filter. Цей підхід базується на глибокому використанні симетрій кінематичних систем і поданні простору станів у вигляді елементів матричних груп Лі. IEKF дозволяє переглянути поняття помилки стану: замість стандартної адитивної різниці використовується так звана інваріантна похибка. Це

гарантує, що рівняння поширення похибок стає лінійним (або майже лінійним) незалежно від поточної траєкторії робота [3].

Технічний підхід

SLAM стикається з фундаментальними математичними викликами: суттєвою нелінійністю проєктивної геометрії, неспостережуваністю масштабу та променевою невизначеністю глибини при ініціалізації візуальних орієнтирів. Класичний розширений фільтр Калмана через однократну лінеаризацію схильний до накопичення помилок усічення ряду Тейлора, що призводить до звуження коваріаційних матриць та неминучої дивергенції. Для розв'язання цих проблем застосовується ітерований розширений фільтр Калмана у комбінації з параметризацією оберненої глибини (IDP)[4-5].

Глобальний вектор стану системи x_k об'єднує кінематичний 13-вимірний стан камери $x_{v,k}$ (позиція, кватерніон орієнтації, лінійна та кутова швидкості) та стани n візуальних орієнтирів y_i :

$$x_k = [x_{v,k}^T y_{1,k}^T \dots y_{n,k}^T]$$

Класична декартова параметризація (XYZ) не здатна коректно моделювати негауссівську променеву невизначеність при першому спостереженні об'єкта. Метод IDP вирішує цю проблему, кодує орієнтир 6-вимірним вектором y_i :

$$y_i = [r_i^T \theta_i \phi_i \rho_i]$$

де $r_i \in \mathbb{R}^3$ - координати оптичного центру камери в момент ініціалізації, θ_i та ϕ_i - азимут і кут місця одиничного напрямкового вектора, а ρ_i - обернена глибина. Завдяки високій лінійності залежності дисперсії піксельних вимірювань від параметра ρ , IDP дозволяє миттєву ініціалізацію орієнтирів (undelayed initialization) без очікування паралаксу, включаючи об'єкти на нескінченності ($\rho_i \rightarrow 0$).

IEKF переформулює етап оновлення вимірювань у задачу нелінійної оптимізації найменших квадратів. Метою є мінімізація цільової функції Махаланобіса $c(x)$, яка балансує між відхиленням моделі від фактичних піксельних спостережень z_k та відхиленням від апріорного кінематичного передбачення $\widehat{x}_{k|k-1}$:

$$c(x) = \frac{1}{2} (z_k - h(x))^T R^{-1} (z_k - h(x)) + \frac{1}{2} (x - \widehat{x}_{k|k-1})^T P_{k|k-1}^{-1} (x - \widehat{x}_{k|k-1})$$

Мінімізація здійснюється ітеративним алгоритмом Гаусса-Ньютона. На кожній внутрішній ітерації j модель вимірювань перелінеаризується навколо поточного наближення, і вектор стану оновлюється з використанням ітеративного коефіцієнта Калмана $K^{(j)}$ та контролера довжини кроку γ_j (backtracking):

$$x^{(j+1)} = x^{(0)} + \gamma_j K^{(j)} (z_k - h(x^{(j)}) - H^{(j)}(x^{(0)} - x^{(j)}))$$

Ітерації тривають до досягнення збіжності, після чого матриця коваріації P_{kk} оновлюється один раз у знайденій оптимальній точці оцінки максимальної вірогідності.

Результати

Для оцінювання якості роботи алгоритмів візуально-інерційного SLAM використовувалася метрика абсолютної похибки траєкторії, яка визначає середнє евклідове відхилення між оціненою траєкторією та еталонною (ground truth) у просторі. Крім того, окремо аналізувався дрейф кута ристання (yaw drift) та обчислювальна складність обох методів [6-7].

Сценарій імітував рух міськими вулицями з різкими поворотами на 90 та 60 градусів. Цей тест виявив фундаментальний недолік класичного розширеного фільтра Калмана - явище хибної спостережуваності (false observability).

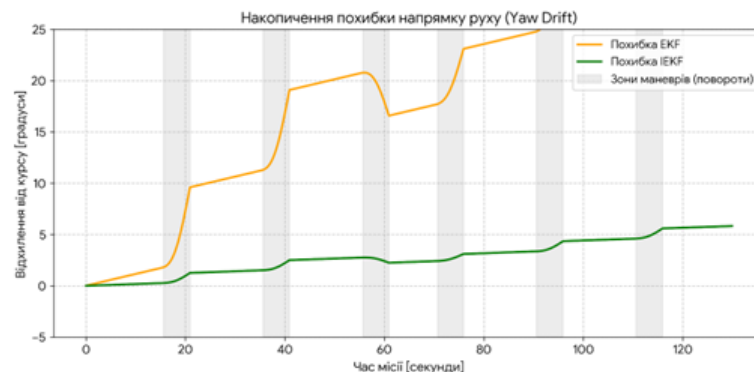


Рисунок 1 – Накопичення похибки напрямку руху

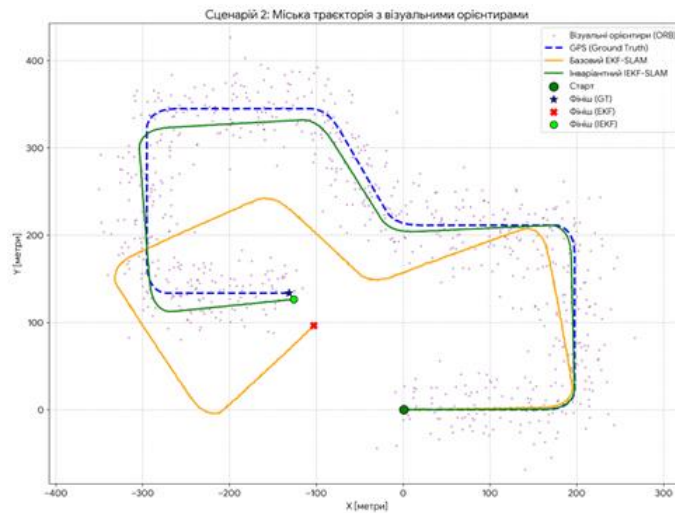


Рисунок 2 – Міська траєкторія з візуальними орієнтирами

На прямолінійних ділянках обидва алгоритми працюють стабільно. Однак під час кожного повороту на перехресті матриця Якобіана базового ЕКФ піддається сильним нелінійним змінам. Графік похибки кута рискання чітко демонструє, що в зонах маневрів похибка ЕКФ стрибкоподібно зростає. Через це кожна наступна пряма ділянка будується під хибним кутом, що призводить до катастрофічного відхилення траєкторії від еталону. Натомість IEKF-SLAM повністю ігнорує ці нелінійності: його похибка кута залишається стабільно низькою протягом усієї місії.

Висновки

Проведене дослідження підтвердило високу ефективність застосування візуально-інерційного підходу на основі інваріантного розширеного фільтра Калмана для задач автономної навігації мобільних роботів. Теоретичний аналіз та практичні експерименти довели, що подання простору станів системи як елементів матричної групи Лі $SE_2(3)$, дозволяє успішно подолати фундаментальні недоліки класичного ЕКФ, зокрема явище хибної спостережуваності та некоректну лінеаризацію під час складних просторових маневрів.

Завдяки експериментам у контрольованому середовищі комп'ютерного моделювання, було наочно продемонстровано переваги інваріантного підходу в умовах високої динаміки. Алгоритм IEKF SLAM забезпечив меншу абсолютну похибку траєкторії та практично повністю усунув проблему експоненційного накопичення дрейфу кута рискання.

Подальші напрями вдосконалення візуально-інерційного IEKF SLAM полягатимуть у його тестуванні на реальних апаратних платформах у високодинамічних середовищах із рухомими перешкодами. Окрему увагу буде приділено інтеграції фільтра з алгоритмами глибокого навчання для адаптивної оцінки матриць шумів моделі руху (Q) та сенсорних вимірювань (R) в реальному часі.

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. А. В. Жарков і Р. В. Маслій, «ВІЗУАЛЬНО-ІНЕРЦІЙНИЙ SLAM З ВИКОРИСТАННЯМ РОЗШИРЕНОГО ФІЛЬТРА КАЛМАНА ДЛЯ АВТОНОМНОЇ НАВІГАЦІЇ», Вісник ВПІ, вип. 2, с. 118–126, Квіт. 2025. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-179-2-118-126>
3. Barrau A., Bonnabel S. The Invariant Extended Kalman Filter as a Stable Observer. IEEE Transactions on Automatic Control. 2017. Vol. 62, no. 4. P. 1797–1812. URL: <https://doi.org/10.1109/TAC.2016.2594085>.
4. Solà J., Deray J., Vidal-Calleja D. A micro Lie theory for state estimation in robotics. ArXiv Preprint. 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1812.01537>.
5. MDPI Remote Sensing. "Lie Group EKF-VSLAM". 2022. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/3/571>
6. Brossard M., Bonnabel S., Barrau A. Invariant Kalman Filtering for Visual Inertial SLAM. ArXiv Preprint. 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1810.05648>.
7. He Y., Zhao J., Guo Y., He W., Yuan K. Right Invariant Extended Kalman Filter for Visual-Inertial Navigation. 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2020. P. 2374–2381. URL: <https://doi.org/10.1109/IROS45743.2020.9341050>.

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