

Сенсорне злиття на основі подієвих камер та застосування до одометрії: ОГЛЯД

Jiaqiang Zhang , Xianjia Yu , Ha Sier , Haizhou Zhang , Tomi Westerlund 

Turku Intelligent Embedded and Robotic Systems (TIERS) Lab, University of Turku, Finland.

E-mail: {jiaqiang.zhang, xianjia.yu, sierha, hazhan, tovewe}@utu.fi

Анотація—Подієві камери (event cameras), натхненні біологічним зором, — це асинхронні сенсори, які детектують зміни яскравості. Вони пропонують помітні переваги у середовищах, що характеризуються високошвидкісним рухом, слабким освітленням або широким динамічним діапазоном. Ці відмінні властивості роблять подієві камери особливо ефективними для сенсорного злиття у робототехніці й комп'ютерному зорі, зокрема для покращення традиційної візуальної або LiDAR-інерціальної одометрії. Звичайні кадрові камери страждають від таких обмежень, як розмиття руху (motion blur) і дрейф, які можна пом'якшити безперервними даними з низькою затримкою, що їх надають подієві камери. Аналогічно, LiDAR-одометрія стикається з викликами, пов'язаними із втратою геометричної інформації у таких середовищах, як коридори. Щоб розв'язати ці обмеження, на відміну від наявних оглядів, що стосуються подієвих камер, цей огляд подає всебічний виклад нещодавніх досягнень у сенсорному злитті на основі подій для одометричних застосувань, зокрема досліджуючи стратегії злиття, які поєднують кадрові камери, інерціальні вимірювальні модулі (IMU) та LiDAR. Огляд критично оцінює внесок цих методів злиття в покращення продуктивності одометрії у складних середовищах, виокремлюючи ключові застосування й обговорюючи сильні сторони, обмеження та невирішені виклики. Крім того, він пропонує погляд на потенційні напрямки майбутніх досліджень для просування сенсорного злиття на основі подій для одометричних застосувань наступного покоління.

Index Terms—подієва камера, сенсорне злиття, одометрія, візуальні сенсори, LiDAR

I. Вступ

Подієві камери — це біонатхненні зорові сенсори, що принципово відрізняються від традиційних кадрових камер. Замість захоплення зо-

бражень з фіксованими часовими інтервалами, подієві камери асинхронно детектують зміни яскравості, видаючи потік “подій”, що кодують зміни сцени [1], [2]. Ця унікальна модальність сенсингу дає значні переваги у сценаріях, що включають високошвидкісний рух, слабе освітлення або сцени зі значним динамічним діапазоном, де традиційні камери можуть зазнавати труднощів [3].

У контексті робототехніки та комп'ютерного зору сенсорне злиття за участю подієвих камер привернуло значну увагу, особливо для покращення візуальної одометрії (VO) або візуально-інерціальної одометрії (VIO). Сенсорне злиття на основі подій використовує взаємодоповнювальні переваги подієвих камер та інших сенсорів (наприклад, кадрових камер, інерціальних вимірювальних модулів (IMU), LiDAR) для підвищення стійкості й точності у складних середовищах з вимогою високої швидкості. Що стосується одометрії, LiDAR-системи зазвичай дають вищу точність і стійкість до змін освітлення порівняно з VO або VIO. Однак у середовищах, де геометрична інформація однорідна (наприклад, у довгих коридорах), LiDAR-одометрія схильна до дрейфу [4]. Подієві камери, зі своєю здатністю захоплювати динамічні зміни сцени, можуть пом'якшити цю проблему, надаючи взаємодоповнювальну інформацію, що підвищує загальну точність і стійкість одометрії у таких складних сценаріях. Рис. 1 ілюструє різні представлення довгого коридору, як їх захоплено різними сенсорами: RGB-камерою, LiDAR та подієвою камерою. З LiDAR-даних видно, що коридор чітко не детектовано; однак інтеграцією даних з RGB-камери та подієвої камери це обмеження можна пом'якшити.

Головна мотивація використання подієвих камер у сенсорному злитті — їхня здатність надавати безперервну інформацію з низькою затримкою, що доповнює обмеження тради-

Це дослідження підтримано флагманом Digital Waters (DIWA) Дослідницької ради Фінляндії (грант № 359247) та проектом DIWA Doctoral Training Pilot, що фінансується Міністерством освіти і культури (Фінляндія).

Табл. І: Виробники подієвих камер.

| Бренд | Основні продукти | Ключові особливості | Стерео-кит |
|-----------|--------------------------------|------------------------------------|------------|
| Prophesee | EVK4, EVK3 | висока роздільна здатність | × |
| IniVation | DAVIS346, DVXplorer | більша спільнота | ✓ |
| Lucid | Triton2 EVS | промислове застосування, PoE, GigE | × |
| Sony | IMX636, IMX637, IMX646, IMX647 | виробник сенсорів | × |

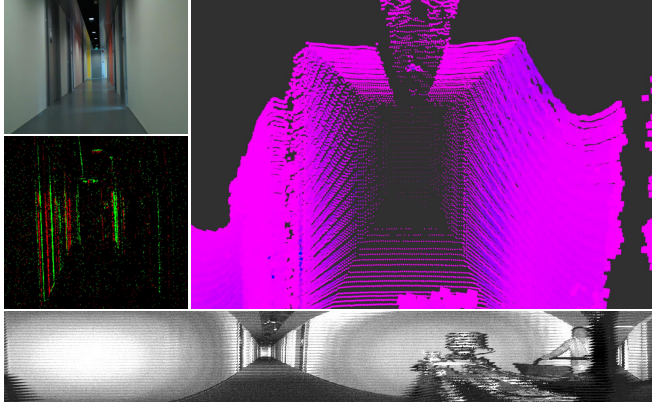


Рис. 1: Представлення сенсорних даних довгого коридору: RGB-зображення (верхній лівий), зображення з подієвої камери (середній лівий), хмара точок LiDAR (верхній правий) та зображення відбивної здатності, згенероване LiDAR (нижній). LiDAR-дані адаптовано з [5].

ційних сенсорів. Наприклад, кадрові камери схильні до розмиття руху під час швидкого руху, тоді як IMU страждають від дрейфу з часом. Зливаючи дані подієвої камери з іншими модальностями, можна підвищити точність візуальної одометрії, особливо у складних середовищах, як-от сцени, що швидко змінюються, або умови слабкого освітлення.

На відміну від інших оглядів подієвих камер [3], [6]–[9], ми зокрема зацікавлені в інтеграції подієвих камер для цілей одометрії. Цей огляд має на меті подати найбільш повний і систематичний виклад нещодавніх досягнень у сенсорному злитті на основі подій та його застосування до візуальної одометрії. Ми досліджуємо різні стратегії злиття, включно з: подієва і кадрова камера, подія і IMU, подія і LiDAR; розглядаємо їхні внески у покращення продуктивності візуальної одометрії. Також обговорюємо різні методології, виокремлюємо важливі застосування й аналізуємо сильні сторони та обмеження цих підходів. Крім того, ми виявляємо відкриті виклики та перспективні напрямки для майбутніх досліджень, надаючи погляд на те, як сенсорне злиття на основі подій можна далі розвинути для задоволення потреб роботизованих систем наступного покоління.

Решту статті структуровано так: розділ II надає огляд та основи технології подієвих камер. Далі розділ III обговорює, як сенсорне злиття використовується у роботизованій одометрії. Розділ IV досліджує ключові тенденції у задачах сенсорного злиття на основі подієвих камер — зокрема покращення одометрії інтеграцією подієвих камер з іншими сенсорами — та представляє найновіші набори даних, релевантні для подієвих камер в одометрії. Нарешті, розділ V робить висновки до статті, пропонує погляд на потенційні напрямки майбутніх досліджень.

II. Технологія подієвих камер

У робототехніці та комп'ютерному зорі подієві камери мають кілька переваг порівняно з традиційними кадровими камерами, що робить їх особливо придатними для цих специфічних застосувань [3], [6]. Наразі існує кілька виробників подієвих камер, кожен з яких пропонує різні ключові особливості. Табл. І перелічує цих виробників разом з їхніми основними продуктами та характеристиками.

Подієві камери захоплюють зміни яскравості асинхронно для кожного пікселя. На відміну від традиційних кадрових камер, що захоплюють зображення інтенсивності з фіксованою частотою кадрів, подієві камери детектують зміни логарифмічної яскравості окремих пікселів незалежно, видаючи події щоразу, коли зміна перевищує наперед визначений поріг [6]. Зокрема, подія для пікселя спрацьовує, якщо зміна логарифмічної інтенсивності $\Delta L(x, y, t)$ з моменту останньої події перевищує контрастний поріг:

$$\Delta L(x, y, t) = \log I(x, y, t) - \log I(x, y, t_{\text{last}}) = p \cdot C,$$

де $I(x, y, t)$ — інтенсивність у пікселі (x, y) у момент t ; t_{last} — час останньої події у пікселі (x, y) ; $p \in \{+1, -1\}$ — полярність події; C — контрастний поріг, що визначає чутливість камери до змін яскравості.

II-A. Порівняння з традиційними камерами

Подієві камери захоплюють зміни яскравості асинхронно для кожного пікселя. На відміну від традиційних кадрових камер, що захоплюють

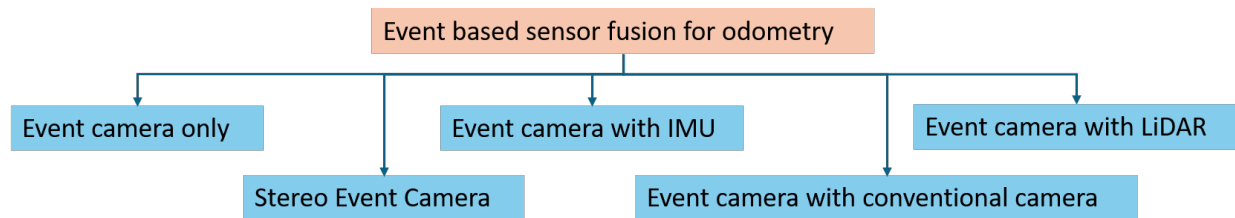


Рис. 2: Основні аспекти, висвітлені у цьому огляді щодо злиття на основі подієвих камер для цілей одометрії.

зображення інтенсивності з фіксованою частотою кадрів, подієві камери детектують зміни логарифмічної яскравості окремих пікселів незалежно, видаючи події щоразу, коли зміна перевищує наперед визначений поріг [6]. Зокрема, подія для пікселя спрацьовує, якщо зміна логарифмічної інтенсивності з моменту останньої події перевищує контрастний поріг. Ця відмінність веде до кількох ключових переваг:

- * **Висока часова роздільна здатність:** подієві камери генерують дані лише тоді, коли у сцені відбувається зміна, що дає розріджений, ефективний для зберігання вихід; на відміну від традиційних камер, які виробляють щільні кадри з фіксованими інтервалами незалежно від змін сцени.
- * **Низька затримка:** кожен піксель подієвої камери працює незалежно, передаючи зміни яскравості миттєво без глобальної експозиції, що дає мінімальну затримку (10 мс у лабораторних тестах і субмілісекунди в реальних умовах).
- * **Високий динамічний діапазон:** з динамічним діапазоном до 140 дБ (проти 60–70 дБ у традиційних камер), подієві камери добре працюють у середовищах зі значними варіаціями освітлення, уникаючи насичення та недоекспонування.
- * **Зменшене розмиття руху:** подієві камери захоплюють асинхронні зміни в кожному пікселі, що робить їх внутрішньо стійкими до розмиття руху — особливо у швидкорухомих або слабо освітлених умовах. Ідеально для візуальної одометрії в динамічних середовищах.

Попри ці переваги, подієві камери також мають виклики: складність інтерпретації потоків подій та потреба у спеціалізованих алгоритмах для обробки асинхронних даних. Традиційні кадрові камери, навпаки, надають багату просторову інформацію, яку легше використовувати для таких задач, як виділення ознак та розпізнавання об'єктів — що робить їх придатнішими для певних застосувань, де необхідна висока

просторова роздільна здатність.

Взаємодоповнювальна природа подієвих та традиційних камер призвела до розвитку методів злиття, які використовують переваги обох модальностей. Поеднуючи високу часову роздільну здатність і динамічний діапазон подієвих камер зі структурованою просторовою інформацією від традиційних камер, можна досягти стійкіших та точніших систем сприйняття.

III. Сенсорне злиття для одометрії у робототехніці

Традиційні методи VO можуть страждати від таких викликів, як розмиття руху, перекриття об'єктів та чутливість до змін освітлення. Подієві камери з їхньою високою часовою роздільною здатністю і здатністю захоплювати асинхронні зміни пропонують перспективне рішення для подолання цих викликів, надаючи взаємодоповнювальну інформацію, що підвищує стійкість і точність VO. За допомогою сенсорного злиття ми можемо інтегрувати дані з цих та інших сенсорів — візуальних, IMU, LiDAR і радарів — щоб отримати надійніші й точніші вимірювання.

Ці сенсори використовуються у багатьох дослідженнях для підвищення стійкості оцінювання одометрії в робототехніці. Fast-LIO [10], [11] поєднав LiDAR та IMU для одометрії: точки LiDAR виокремлювались як планарні та граничні (edge) ознаки. Ітеративний фільтр Калмана використовувався для злиття цих ознак з вимірюваннями IMU, забезпечуючи точне оцінювання стану. Розвиваючи це, COIN-LIO [12] впровадив покращення, інкорпорує фотометричну інформацію з даних інтенсивності LiDAR. Система проектувала значення інтенсивності LiDAR у формат зображення і застосовувала фільтрування для підвищення узгодженості яскравості. Ключові ознаки в цих зображеннях інтенсивності обирались за їхньою взаємодоповнювальністю до геометричних ознак

хмари точок LiDAR — зокрема, націлюючись на ділянки з обмеженою геометричною інформацією.

Зображення з камер, з іншого боку, надають багату семантичну інформацію, що робить їх вирішальними для роботизованого сприйняття. Щоб використати цю перевагу, дані камер часто зливають з іншими сенсорами — як-от IMU (надають прискорення і кутову швидкість) або LiDAR (надає точну інформацію про глибину). Це злиття суттєво покращує продуктивність одометрії, особливо у складних середовищах або за поганого освітлення. Каркаси як VINS-Mono [13], що зливає камеру і IMU, та Kimera-VIO [14], [15], що інтегрує LiDAR, камеру та IMU, ілюструють переваги таких підходів. Ці системи дозволяють надійнішу навігацію навіть у низькотекстурних або погано освітлених середовищах, забезпечуючи точнішу і стійкішу одометрію для реальних застосувань.

IV. Сенсорне злиття на основі подій для одометрії

IV-A. Лише подієва камера

Оскільки подієва камера детектує лише зміни яскравості, вона надає менше ознак для локалізації, ніж кадрова камера; тому кількість досліджень, що використовують лише подієву камеру для одометрії, невелика. Першу роботу з оцінювання пози на основі подій представили Weikersdorfer і Conradt [16] у 2012 році. Ця робота використовувала тільки подієву камеру і була розширена до подієвої системи візуального SLAM у 2013 році [17].

IV-B. Злиття з кадровою камерою

Поєднання подієвих камер з кадровими камерами дозволяє мати високу часову роздільну здатність разом зі структурованішою інформацією про сцену. Liu et al. [18] представили підхід до поєднання обох модальностей сенсорів для детектування та трекінгу об'єктів. У [19] Pan et al. запропонували метод реконструкції високочастотних чітких відео з одного розмитого кадру та подієвих даних, використовуючи модель подієвого подвійного інтегрування. Злиття асинхронних подієвих даних з кадровими даними знижує розмиття та покращує візуальну якість, демонструючи взаємодоповнювальні переваги обох модальностей. Злиття подієвої та кадрової камер може подолати обмеження окремого сенсора і оцінити стереоглибину. Наприклад, Wang et al. [20] реалізували оцінювання стереоглибини, використовуючи граничну

(edge) інформацію подій разом з даними інтенсивності кадрів, пропонуючи покращене оцінювання диспаратності порівняно з провідними алгоритмами стереозіставлення.

Злиття подієвої камери і кадрової камери може підвищити стійкість і точність VO. У 2014 році Censi і Scaramuzza запропонували подієву VO-систему з низькою затримкою [21] — значне просування у зниженні затримки традиційних кадрових методів. Ця система використовувала асинхронні подієві дані для обчислення одометрії в реальному часі, прокладаючи шлях до швидшого й ефективнішого оцінювання пози у динамічних середовищах. Розвиваючи це, Rebecq et al. [22] ввели VO з низькою затримкою з використанням подієвих треків ознак. Цей метод відстежував характерні точки на основі подієвих даних, досягаючи надійної і малозатримкової одометрії навіть в умовах, де традиційні кадрові методи зазнавали труднощів — як-от швидкий рух або погане освітлення. Та сама група розробила подієву систему трекінгу і відображення з 6 ступенями свободи (6-DoF), що покладалась на геометричні принципи для виконання паралельного трекінгу і відображення в реальному часі [23]. Ця робота продемонструвала потенціал подієвих камер для виконання повних задач 3D-трекінгу і відображення, став ще одним помітним кроком у подієвій VO.

У 2022 році Hidalgo-Carrió et al. запропонували подія-підтриману пряму розріджену одометрію (event-aided direct sparse odometry, DSO), де подієві дані поєднувались з традиційним DSO для підвищення стійкості VO у середовищах зі складним освітленням або швидкими змінами руху [24]. Цей метод продемонстрував злиття подієвих і кадрових підходів у покращенні продуктивності VO.

IV-C. Злиття з IMU

IMU надають інерціальні дані, які можна злити з подіями для покращення оцінювання руху, особливо у високошвидкісних сценаріях. IMU здатні оцінювати швидкість та орієнтацію, допомагаючи візуальній одометрії шляхом зменшення дрейфу та підвищення стійкості [25]. У [26] Mohamed et al. дослідили використання злиття подієвих даних і IMU для покращення продуктивності VO у динамічних середовищах. Дослідження запропонувало методи, що використовують високу часову роздільну здатність подієвої камери разом зі стійкими інерціальними даними IMU для точного оцінювання руху навіть у дуже динамічних сценаріях. Chamorro

et al. запропонували нові методи інтеграції подієвих даних і показів IMU для досягнення надшвидкого оцінювання пози камери [27]. Вони ввели дві нові схеми злиття, що поєднують моделі прогнозування зі сталою швидкістю та сталим прискоренням зі надшвидкими подієвими оновленнями 10 кГц і повільнішими оновленнями IMU 1 кГц. Результати демонструють вищу продуктивність на пропускну спроможності, що в 100 разів швидша за провідні методи.

Інтеграція IMU у VO-системи суттєво покращує їхню продуктивність, надаючи додаткову надійну інформацію про рух, що компенсує обмеження самих лише візуальних даних. У 2017 році Zhu et al. розширили можливості подієвої одометрії шляхом інтеграції інерціальних вимірювань у своїй роботі з подієвою візуально-інерціальною одометрією [28]. Поєднання подієвих камер та інерціальних сенсорів дозволяло стійке оцінювання пози навіть у складних сценаріях — як-от високошвидкісний рух або складні динамічні сцени. У 2018 році Mueggler і його команда представили підхід до неперервно-часової візуально-інерціальної одометрії для подієвих камер, що далі підвищило точність і стійкість подієвих одометричних систем [29]. Їхня робота підкреслила важливість злиття часової інформації з подієвих даних та інерціальних сенсорів у неперервно-часовому каркасі.

Mahlknecht et al. [30] дослідили подієву одометрію для планетарних роботів у 2022 році, демонструючи потенціал подієвих камер у позаземних середовищах, де традиційні камери можуть зазнавати труднощів через жорсткі умови. У 2023 році Lee et al. [31] ввели гібридний підхід, що поєднує подієву та кадрову візуально-інерціальну одометрію з адаптивними методами фільтрування на основі невизначеності 8-DoF деформації (warping). Цей метод посилив стійкість одометричної системи до шуму та динамічних змін, додатково покращуючи стійкість і адаптивність подієвих систем у різних сценаріях застосування.

IV-D. Стереовізуальна одометрія на основі подій

Стереовізуальна одометрія на основі подій — галузь, що розвивається, і використовує переваги стереоподієвих камер, які надають асинхронні дані з двох синхронізованих подієвих сенсорів, дозволяючи 3D-сприйняття глибини у складних середовищах з високошвидкісним рухом або змінним освітленням. Перші роботи з подієвої стерео VO опубліковано у 2018 році. Rebecq et al. [32] ввели подієву багатовидову

стерео VO (Event-based Multi-View Stereo), що дозволяла 3D-реконструкцію в реальному часі за допомогою подієвих камер. Цей метод використовував асинхронну природу подій для обчислення інформації про глибину шляхом злиття подієвих даних з кількох точок зору, забезпечуючи точну й ефективну 3D-реконструкцію. Того ж року запропоновано напівщільний метод 3D-реконструкції з використанням стереоподієвих камер [33]. Цей підхід використовував стереоподієві камери для реконструкції напівщільних 3D-карт, суттєво покращуючи точність і стійкість систем візуальної одометрії, навіть у динамічних середовищах.

У 2021 році Zhou et al. [34] розширили свою попередню роботу [33], представивши повну подієву стереовізуальну одометричну систему. Їхній метод поєднав стереоподієві камери та надійний конвеєр одометрії для оцінювання руху камери в реальному часі. Завдяки високій часовій роздільній здатності подієвих камер ця система могла відстежувати швидко рухомі об'єкти та сцени зі складним освітленням. Методи на основі ознак також можна застосовувати для подієвої стереовізуальної одометрії [35], [36]. Цей підхід детектує і відстежує ознаки безпосередньо з стереоподієвих даних, використовуючи їх для оцінювання руху.

Останнім часом увагу привертає дослідження стереоподієвої VIO, оскільки вона підвищує оцінювання руху шляхом злиття інерціальних вимірювань з візуальними даними для покращення точності й стійкості — особливо в умовах, де лише візуальна інформація може бути ненадійною. У 2023 році Wang et al. розробили стереоподієву VIO-систему, що інкорпорує як стереоподієві камери, так і інерціальні вимірювання для покращення точності оцінювання пози [37]. Подальші дослідження у стереоподієвій VIO привели до роботи Chen et al. [38]. Паралельно Liu et al. також представили подієву стереовізуально-інерціальну одометричну систему [39]. Їхні методи демонстрували вищу продуктивність як за точністю, так і за стійкістю порівняно з кадровими VIO-системами — особливо у сценаріях зі швидким рухом.

Найновіші роботи Niu et al. продовжують розширювати межі подієвої стерео VO. Їхня IMU-підтримана стереоподієва візуальна одометрія [40] та ESVO2 [41] інкорпорують пряму візуально-інерціальну одометрію зі стереоподієвими камерами, суттєво покращуючи точність оцінювання пози в реальному часі.

Табл. II: Набори даних з подієвими камерами, що стосуються одометрії.

| Рік | Назва набору | Сценарії | Сенсори |
|------|----------------------|--|---|
| 2024 | CoSEC [42] | Сценарії водіння | Подієва камера, LiDAR, RGB-камера, IMU, GNSS |
| 2023 | ECMD [43] | Сценарії водіння | Подієва камера, LiDAR, RGB-камера, інфрачервона камера, IMU, GNSS |
| 2023 | UNIZG-FER LAMOR [36] | У приміщенні (ручне) і на вулиці (водіння) | Сtereo-подієва камера, LiDAR, IMU, GNSS |
| 2022 | Evimo2 [44] | Сцени у приміщенні | Сtereo-подієва камера, IMU |
| 2021 | DSEC [45] | Сценарії водіння | Сtereo-подієва камера, LiDAR, RGB-камера, IMU, GNSS |
| 2018 | MVSEC [46] | Ручне, БПЛА і водіння | Сtereo-подієва камера, LiDAR, VI-сенсор, IMU, GNSS |
| 2017 | DAVIS Datasets [47] | Високошвидкісна робототехніка | Подієва камера, RGB-камера, IMU |

IV-E. Злиття з LiDAR

Технологія LiDAR генерує точні 3D-карти і здатна продукувати високоточну одометричну інформацію. Однак вона працює на нижчій частоті і стикається з викликами у специфічних сценаріях (як зазначено раніше), де геометрична інформація скомпрометована або втрачена. Кілька досліджень зосередились на злитті подієвих камер з LiDAR-системами, з метою використати переваги подієвих камер для підвищення продуктивності LiDAR.

Деякі дослідження ще на ранніх стадіях і зосереджені насамперед на досягненні автоматичного й точного калібрування. У [48] Ta et al. ввели метод прямого зовнішнього калібрування між подієвими камерами і LiDAR, використовуючи високу часову роздільну здатність і динамічний діапазон подієвих камер. Ця техніка усуває потребу в кадрових посередниках і оптимізує 6-DoF зовнішнє калібрування через методи кореляції на основі інформації, покращуючи вирівнювання сенсорів. Аналогічно, Song et al. [49] запропонували новий метод калібрування з використанням 3D-маркера для генерації стабільних патернів, детектованих як у 2D-наборах точок, так і в 3D-хмарах точок. Цей підхід полегшує точне калібрування між подієвою камерою і LiDAR, використовуючи зміни світла для тригера детектування подій — що вирішально для досягнення стабільного злиття. Це прокладає шлях до злиття подієвих камер та LiDAR.

Окрім калібрування, злиття LiDAR і подієвої камери може покращити сприйняття глибини. Cui et al. [50] запропонували метод злиття розрізженого LiDAR і подієвих даних для генерації щільних карт глибини, покращуючи просторове сприйняття. Така покращена точкова карта може далі полегшити LiDAR-одометрію. У [51] Zhou et al. виявили, що дані з подієвих камер мають однорідну природу з RGB та LiDAR-даними як у візуальному, так і в моторному просторах. Ця характеристика робить подієві камери особливо придатними для перекидання містка між RGB і LiDAR у задачах злиття руху або потоку сцени (scene flow). Це відкриття підкреслює потенціал ієрархічного каркасу злит-

тя, що ефективно інтегрує ці сенсори, роблячи злиття подієвих камер з іншими сенсорами на кшталт LiDAR та звичайних камер дуже перспективним.

IV-F. Набори даних з подієвими камерами

Зі зростанням інтересу до подієвих камер та їхнього використання у роботизованій одометрії, в останні роки введено багато наборів даних. У табл. II ми перелічуємо ті набори даних, що були розроблені спеціально для підтримки досліджень сенсорного злиття на основі подій для одометрії, забезпечуючи точне оцінювання пози й трекінг руху в динамічних середовищах.

V. Висновок та обговорення

Завдяки своїй високій часовій роздільній здатності, низькій затримці, високому динамічному діапазону та зменшеному розмиттю руху порівняно з традиційними камерами, подієві камери дають значні потенційні переваги для обчислення одометрії шляхом захоплення точних змін яскравості. На відміну від попередніх оглядових статей, зосереджених на подієвих камерах, цей огляд подає комплексний і детальний аналіз застосування подієвих камер для одометрії, досліджуючи різні підходи сенсорного злиття. Серед них — системи лише з подієвою камерою, злиття з IMU, конфігурації стерео-подієвих камер, інтеграція з традиційними камерами та комбінації з LiDAR. Крім того, ми коротко обговорюємо набори даних, пов'язані з подієвими камерами, які релевантні для просування сенсорного злиття — особливо у задачах одометрії.

Подієва камера має значний потенціал для майбутніх застосувань у різних областях. Її роль в одометрії або оцінюванні пози конкретно розглянуто в статті. У візуальній одометрії (VO) або візуально-інерціальній одометрії (VIO) використання подієвих камер може ефективно пом'якшувати розмиття руху та зменшувати виклики, що їх спричиняють умови слабого освітлення — завдяки ширшому динамічному діапазону. Для LiDAR-одометрії, аналогічно до їх застосування зі звичайними камерами, подієві камери можуть допомогти зменшити дрейф,

компенсуючи втрату геометричної інформації у LiDAR-хмарах точок фотометричною інформацією. Крім того, події камери можна інтегрувати з зображеннями, згенерованими LiDAR, оскільки сучасні LiDAR-системи часто продукують щільні низько-роздільні панорамні зображення з закодованою відбивною здатністю та інтенсивністю інфрачервоного світла (див. нижню частину рис. 1). Така інтеграція може ще більше підвищити стійкість і точність одометрії у складних середовищах. Хоча поточний етап злиття з LiDAR все ще відносно ранній, він демонструє перспективний потенціал для майбутніх розробок.

Література

- [1] Patrick Lichtsteiner and Tobi Delbruck. A 64x64 aer logarithmic temporal derivative silicon retina. In *Research in Microelectronics and Electronics, 2005 PhD*, volume 2. IEEE, 2005.
- [2] Patrick Lichtsteiner, Christoph Posch, and Tobi Delbruck. A 128 × 128 120 db 15 μ s latency asynchronous temporal contrast vision sensor. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 43(2), 2008.
- [3] Guillermo Gallego, Tobi Delbrück, Garrick Orchard, Chiara Bartolozzi, Brian Taba, Andrea Censi, Stefan Leutenegger, Andrew J. Davison, Jörg Conradt, Kostas Daniilidis, and Davide Scaramuzza. Event-based vision: A survey. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 44(1), 2020.
- [4] Sier Ha, Honghao Du, Xianjia Yu, Jian Song, and Tomi Westerlund. Enhancing the reliability of lidar point cloud sampling: A colorization and super-resolution approach based on lidar-generated images. *arXiv preprint arXiv:2409.11532*, 2024.
- [5] Ha Sier, Qingqing Li, Xianjia Yu, Jorge Peña Queraltá, Zhuo Zou, and Tomi Westerlund. A benchmark for multi-modal lidar slam with ground truth in gnss-denied environments. *Remote Sensing*, 15(13), 2023.
- [6] Waseem Shariff, Mehdi Sefidgar Dilmaghani, Paul Kietly, Mohamed Moustafa, Joe Lemley, and Peter Corcoran. Event cameras in automotive sensing: A review. *IEEE Access*, 2024.
- [7] Siqi Jia. Event camera survey and extension application to semantic segmentation. In *Proc. of the 4th Int. Conference on Image Processing and Machine Vision*, 2022.
- [8] Khadija Iddrisu, Waseem Shariff, Peter Corcoran, Noel O'Connor, Joe Lemley, and Suzanne Little. Event camera based eye motion analysis: A survey. *IEEE Access*, 2024.
- [9] Bharatesh Chakravarthi, Aayush Atul Verma, Kostas Daniilidis, Cornelia Fermüller, and Yezhou Yang. Recent event camera innovations: A survey. *arXiv preprint arXiv:2408.13627*, 2024.
- [10] Wei Xu and Fu Zhang. Fast-lio: A fast, robust lidar-inertial odometry package by tightly-coupled iterated kalman filter. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(2), 2021.
- [11] Chungue Bai, Tao Xiao, Yajie Chen, Haoqian Wang, Fang Zhang, and Xiang Gao. Faster-lio: Lightweight tightly coupled lidar-inertial odometry using parallel sparse incremental voxels. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(2), 2022.
- [12] Patrick Pfreundschuh, Helen Oleynikova, Cesar Cadena, Roland Siegwart, and Olov Andersson. Coin-lio: Complementary intensity-augmented lidar inertial odometry. In *IEEE Int. Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2024.
- [13] Tong Qin, Peiliang Li, and Shaojie Shen. Vins-mono: A robust and versatile monocular visual-inertial state estimator. *IEEE transactions on robotics*, 34(4), 2018.
- [14] Antoni Rosinol, Marcus Abate, Yun Chang, and Luca Carlone. Kimera: an open-source library for real-time metric-semantic localization and mapping. In *2020 IEEE Int. Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2020.
- [15] Antoni Rosinol, Andrew Violette, Marcus Abate, Nathan Hughes, Yun Chang, Jingnan Shi, Arjun Gupta, and Luca Carlone. Kimera: From slam to spatial perception with 3d dynamic scene graphs. *The Int. Journal of Robotics Research*, 40(12-14), 2021.
- [16] David Weikersdorfer and Jörg Conradt. Event-based particle filtering for robot self-localization. In *2012 IEEE Int. Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. IEEE, 2012.
- [17] David Weikersdorfer, Raoul Hoffmann, and Jörg Conradt. Simultaneous localization and mapping for event-based vision systems. In *Computer Vision Systems*, Berlin, Heidelberg, 2013. Springer Berlin Heidelberg.
- [18] Hongjie Liu, Diederik Paul Moeys, Gautham Das, Daniel Neil, Shih-Chii Liu, and Tobi Delbrück. Combined frame- and event-based detection and tracking. In *2016 IEEE Int. Symposium on Circuits and systems (ISCAS)*. IEEE, 2016.
- [19] Liyuan Pan, Cedric Scheerlinck, Xin Yu, Richard Hartley, Miaomiao Liu, and Yuchao Dai. Bringing a blurry frame alive at high frame-rate with an event camera. In *Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, June 2019.
- [20] Ziwei Wang, Liyuan Pan, Yonhon Ng, Zheyu Zhuang, and Robert Mahony. Stereo hybrid event-frame (shef) cameras for 3d perception. In *2021 IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2021.
- [21] Andrea Censi and Davide Scaramuzza. Low-latency event-based visual odometry. In *2014 IEEE Int. Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2014.
- [22] Beat Kueng, Elias Mueggler, Guillermo Gallego, and Davide Scaramuzza. Low-latency visual odometry using event-based feature tracks. In *2016 IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2016.
- [23] Henri Rebecq, Timo Horstschäfer, Guillermo Gallego, and Davide Scaramuzza. Evo: A geometric approach to event-based 6-dof parallel tracking and mapping in real time. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(2), 2016.
- [24] Javier Hidalgo-Carrió, Guillermo Gallego, and Davide Scaramuzza. Event-aided direct sparse odometry. In *Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, June 2022.
- [25] Davide Scaramuzza and Zichao Zhang. Visual-inertial odometry of aerial robots. *arXiv preprint arXiv:1906.03289*, 2019.
- [26] Sherif AS Mohamed, Mohammad-Hashem Haghbayan, Mohammed Rabah, Jukka Heikkonen, Hannu Tenhunen, and Juha Plosila. Towards dynamic monocular visual odometry based on an event camera and imu sensor. In *Intelligent Transport Systems. From Research and Development to the Market Uptake: Third EAI Int. Conference, INTSYS 2019*. Springer, 2020.
- [27] William Chamorro, Joan Solà, and Juan Andrade-Cetto. Event-imu fusion strategies for faster-than-imu estimation throughput. In *Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) Workshops*, June 2023.
- [28] Alex Zihao Zhu, Nikolay Atanasov, and Kostas Daniilidis. Event-based visual inertial odometry. In *Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, July 2017.
- [29] Elias Mueggler, Guillermo Gallego, Henri Rebecq, and Davide Scaramuzza. Continuous-time visual-inertial odometry for event cameras. *IEEE Transactions on Robotics*, 34(6), 2018.

- [30] Florian Mahlknecht, Daniel Gehrig, Jeremy Nash, Friedrich M Rockenbauer, Benjamin Morrell, Jeff Delaune, and Davide Scaramuzza. Exploring event camera-based odometry for planetary robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(4), 2022.
- [31] Min Seok Lee, Jae Hyung Jung, Ye Jun Kim, and Chan Gook Park. Event-and frame-based visual-inertial odometry with adaptive filtering based on 8-dof warping uncertainty. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023.
- [32] Henri Rebecq, Guillermo Gallego, Elias Mueggler, and Davide Scaramuzza. Emvs: Event-based multi-view stereo—3d reconstruction with an event camera in real-time. *Int. Journal of Computer Vision*, 126(12), 2018.
- [33] Yi Zhou, Guillermo Gallego, Henri Rebecq, Laurent Kneip, Hongdong Li, and Davide Scaramuzza. Semi-dense 3d reconstruction with a stereo event camera. In *Proc. of the European conference on computer vision (ECCV)*, 2018.
- [34] Yi Zhou, Guillermo Gallego, and Shaojie Shen. Event-based stereo visual odometry. *IEEE Transactions on Robotics*, 37(5), 2021.
- [35] Antea Hadviger, Igor Cvišić, Ivan Marković, Sacha Vražić, and Ivan Petrović. Feature-based event stereo visual odometry. In *2021 European Conference on Mobile Robots (ECMR)*. IEEE, 2021.
- [36] Antea Hadviger, Vlaho-Josip Štironja, Igor Cvišić, Ivan Marković, Sacha Vražić, and Ivan Petrović. Stereo visual localization dataset featuring event cameras. In *2023 European Conference on Mobile Robots (ECMR)*. IEEE, 2023.
- [37] Kunfeng Wang, Kaichun Zhao, and Zheng You. Stereo event-based visual-inertial odometry. *arXiv preprint arXiv:2303.05086*, 2023.
- [38] Peiyu Chen, Weipeng Guan, and Peng Lu. Esvio: Event-based stereo visual inertial odometry. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(6), 2023.
- [39] Zhe Liu, Dianxi Shi, Ruihao Li, and Shaowu Yang. Esvio: event-based stereo visual-inertial odometry. *Sensors*, 23(4), 2023.
- [40] Junkai Niu, Sheng Zhong, and Yi Zhou. Imu-aided event-based stereo visual odometry. *arXiv preprint arXiv:2405.04071*, 2024.
- [41] Junkai Niu, Sheng Zhong, Xiuyuan Lu, Shaojie Shen, Guillermo Gallego, and Yi Zhou. Esvo2: Direct visual-inertial odometry with stereo event cameras. *arXiv preprint arXiv:2410.09374*, 2024.
- [42] Shihan Peng, Hanyu Zhou, Hao Dong, Zhiwei Shi, Haoyue Liu, Yuxing Duan, Yi Chang, and Luxin Yan. Cosec: A coaxial stereo event camera dataset for autonomous driving. *arXiv preprint arXiv:2408.08500*, 2024.
- [43] Peiyu Chen, Weipeng Guan, Feng Huang, Yihan Zhong, Weisong Wen, Li-Ta Hsu, and Peng Lu. Ecnd: An event-centric multisensory driving dataset for slam. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023.
- [44] Levi Burner, Anton Mitrokhin, Cornelia Fermüller, and Yiannis Aloimonos. Evimo2: an event camera dataset for motion segmentation, optical flow, structure from motion, and visual inertial odometry in indoor scenes with monocular or stereo algorithms. *arXiv preprint arXiv:2205.03467*, 2022.
- [45] Mathias Gehrig, Willem Aarents, Daniel Gehrig, and Davide Scaramuzza. Dsec: A stereo event camera dataset for driving scenarios. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(3), 2021.
- [46] Alex Zihao Zhu, Dinesh Thakur, Tolga Özaslan, Bernd Pfrommer, Vijay Kumar, and Kostas Daniilidis. The multivehicle stereo event camera dataset: An event camera dataset for 3d perception. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(3), 2018.
- [47] Elias Mueggler, Henri Rebecq, Guillermo Gallego, Tobi Delbruck, and Davide Scaramuzza. The event-camera dataset and simulator: Event-based data for pose estimation, visual odometry, and slam. *The Int. Journal of Robotics Research*, 36(2), 2017.
- [48] Kevin Ta, David Bruggemann, Tim Brödermann, Christos Sakaridis, and Luc Van Gool. L2e: Lasers to events for 6-dof extrinsic calibration of lidars and event cameras. In *2023 IEEE Int. Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2023.
- [49] Rihui Song, Zhihua Jiang, Yanguo Li, Yunxiao Shan, and Kai Huang. Calibration of event-based camera and 3d lidar. In *2018 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation (WRC SARA)*, 2018.
- [50] Mingyue Cui, Yuzhang Zhu, Yechang Liu, Yunchao Liu, Gang Chen, and Kai Huang. Dense depth-map estimation based on fusion of event camera and sparse lidar. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 2022.
- [51] Hanyu Zhou, Yi Chang, and Zhiwei Shi. Bring event into rgb and lidar: Hierarchical visual-motion fusion for scene flow. In *Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2024.