УДК 535.8

DOI: https://doi.org/10.20535/0203-3771502025347447

О. В. Збруцький[1], *д.т.н., професор*, **В. Ю. Степаненко**[2], *аспірант*

МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ПРОЙДЕНОЇ ВІДСТАНІ ОПТИЧНИМ ОДОМЕТРОМ

Ua Розглядається метод візуальної одометрії для вимірювання пройденої відстані наземним рухомим об'єктом на основі оптичного потоку. Метод полягає у обробці зміщень ключових точок у послідовності зображень, отриманих із камери. Метод відрізняється від відомих способів використанням монокулярної системи технічного зору, що суттєво спрощує апаратну реалізацію та знижує вимоги до обчислювальних ресурсів порівняно зі стереоскопічними системами. Проведені експериментальні дослідження показали, що метод демонструє високу точність на текстурованих і контрастних поверхнях. Причиною зниження точності вимірювання на однорідних та слабко текстурованих поверхнях є недостатня кількість ключових точок на зображенні.

Показана можливість застосування методу вимірювання пройденої відстані у системах навігації наземних транспортних засобів.

En A visual odometry method is examined for measuring the distance traveled by a terrestrial mobile object based on optical flow. The method involves processing the displacements of key points within a sequence of images captured by a camera. The method differs from known approaches through the use of a monocular technical vision system, which substantially simplifies hardware implementation and reduces computational resource requirements relative to stereoscopic systems. Experimental studies have shown that the method demonstrates high accuracy on textured and high-contrast surfaces. The decrease in measurement accuracy on uniform and weakly textured surfaces is due to an insufficient number of key points in the image.

The feasibility of applying the distance measurement method in ground vehicle navigation systems has been demonstrated.

Вступ

Однією із найпоширеніших систем локалізації автономних транспортних засобів є глобальна система позиціонування (*GPS*). Проте її функціональність залежить від доступності потрібної кількості супутників, тому у деяких ситуаціях вона стає непрацездатною [1]. Застосування гіроінерціальниих систем необхідної для навігації точності пов'язане із суттєвим ростом вартості та габаритів [2], а використання навіть найкращих *МЕМС*-систем не дозволяє отримувати задовільну точність навігації [3, 4]. Тому задача автономного визначення положення рухомих об'єктів залиша-

[1] *КПІ ім. Ігоря Сікорського*
[2] *КПІ ім. Ігоря Сікорського*

ється актуальною. Широке застосування для вирішення цієї задачі у наземних транспортних засобах знаходять одометри, побудовані на різних фізичних принципах [5]. *Колісна одометрія* із використанням енкодерів [6] має накопичення похибки вимірювання за часом та у разі ковзання коліс. *Лазерні одометри (LiDAR)* складні у реалізації на платформах із обмеженими обчислювальними ресурсами [7, 8], мають низьку продуктивність під час отримання точного сканування та виправлення спотворень руху [9]. Візуальна одометрія використовує для оцінки переміщення оптичний потік [10, 11, 12] та оптичні зміщення [13]. Проблеми її використання пов'язані із обчислювальною складністю, неоднозначністю масштабу, умовами формування зображення (освітлення, області із низькою текстурою, розмитість зображень) [14], накопичення похибок обчислень [15, 16, 17]. Тому важливими задачами використання візуальної одометрії є зменшення обчислювальних ресурсів та мінімізація похибок.

Постановка задачі

Метою статті є удосконалення методу визначення пройденої відстані оптичним одометром шляхом мінімізації обчислювальних витрат у разі обробці оптичного потоку.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо математичну модель вимірювання пройденої відстані на основі аналізу оптичного потоку у послідовності зображень. Метод базується на відстеженні зміщень ключових точок між суміжними кадрами за використанням алгоритму Лукаса-Канаде [10].

Кожному пікселю приписується положення у вигляді координат (x, y, t), де x та y – це просторові координати, а t – момент часу або номер кадру зображення. Яскравість (інтенсивність) пікселя описується функцією $I(x, y, t)$. Під час переміщення пікселя між кадрами зміна інтенсивності пов'язується зі змінами його просторових та часової координат.

Використаємо метод Лукаса-Канаде із припущенням, що маленькі ділянки зображення (пікселі в околі) залишаються незмінними між кадрами, а їхній рух можна розглядати, як зсув.

За цієї умови зміна положення пікселя описується співвідношенням:

$$I(x, y, t) = I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t). \quad (1)$$

Зміщення $(\Delta x, \Delta y)$ між двома кадрами є малим, що дозволяє застосувати розкладання у ряд Тейлора для апроксимації:

$$I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) = I(x, y, t) + \frac{\partial I}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial I}{\partial y}\Delta y + \frac{\partial I}{\partial t}\Delta t. \quad (2)$$

У припущенні незмінності інтенсивності, отримуємо:

$$\frac{\partial I}{\partial x}\Delta x+\frac{\partial I}{\partial y}\Delta y+\frac{\partial I}{\partial t}\Delta t=0. \quad (3)$$

Для того щоб перейти від зміщення $\Delta x, \Delta y$ до швидкості V_x, V_y розділимо рівняння (3) на Δt:

$$\frac{\partial I}{\partial x}V_x+\frac{\partial I}{\partial y}V_y+\frac{\partial I}{\partial t}=0, \quad (4)$$

де $V_x=\frac{\Delta x}{\Delta t}$ та $V_y=\frac{\Delta y}{\Delta t}$ – це компоненти вектору швидкості(оптичного потоку). Позначимо $u=V_x$, $v=V_y$, $I_x=\frac{\partial I}{\partial x}$, $I_y=\frac{\partial I}{\partial y}$, $I_t=\frac{\partial I}{\partial t}$, та запишемо (4) у вигляді:

$$I_x u+I_y v=-I_t, \quad (5)$$

або у векторній формі:

$$\nabla I\cdot\vec{V}=-I_t, \quad (6)$$

де $\nabla I=\left(I_x, I_y\right)$– оператор Лапласа, $\vec{V}$ – невідомий вектор потоку. Проблема традиційного підходу до обчислення оптичного потоку полягає у наявності двох невідомих u і v, що породжує так звану проблему апертури – неоднозначність у визначенні напрямку руху об’єкта у послідовності кадрів [18].

Для вирішення задачі вимірювання пройденої відстані за використанням оптичної камери скористаємося методом Лукаса-Канаде із пірамідами [19].

На першому етапі всі зображення (кадри) послідовно *N* разів зменшуємо у *k* разів, створюючи *N*-рівневу піраміду масштабів зі зменшенням розміру зображення на кожному рівні у *k* разів:

$$\left(u_{\text{новий}}, v_{\text{новий}}\right)=\left(u\cdot k,\ v\cdot k\right), \quad (7)$$

де u, v — компоненти потоку на поточному рівні, k – коефіцієнт масштабування (приймаємо $k=2$). Таким чином, $u_{\text{новий}}$ і $v_{\text{новий}}$ є більшими за відповідні компоненти потоку на попередньому, зменшеному рівні, оскільки швидкість масштабується відповідно до переходу на вищу (більш детальну) роздільну здатність.

На кожному рівні піраміди зображення має меншу роздільну здатність порівняно із попереднім рівнем або із оригінальним зображенням, що дозволяє зменшити обчислювальну складність і працювати із великими зміщеннями. Обчислення починається із найменшого рівня піраміди (най-

більш зменшеного зображення). Потік, обчислений на поточному рівні, масштабується і використовується як початкове наближення для наступного рівня із вищою роздільною здатністю. На найвищих рівнях піраміди видимі зміщення зменшуються пропорційно розміру зображення, що дозволяє уникнути великих помилок у локальному потоці. Після завершення обчислень оптичного потоку на всіх рівнях піраміди (починаючи із найменшого зображення і закінчуючи найбільш деталізованим), ми отримуємо остаточне поле оптичного потоку, тобто для кожного пікселя (або ключової точки) маємо відповідний вектор:

$$\left(u(x,y),\, v(x,y)\right)=\left(\frac{\Delta x}{\Delta t},\, \frac{\Delta y}{\Delta t}\right). \tag{8}$$

Вектор (8) означає, що для кожної ключової точки відомо, наскільки змінилася її позиція між двома кадрами.

Розглянемо приклад, коли камера зафіксувала зміщення ключової точки між двома послідовними кадрами на 12 пікселів по горизонталі $(\Delta x=12)$, і по вертикалі на 9 пікселів $(\Delta y=9)$. Камера працює із частотою $f = 30$ кадрів/с, тобто $\Delta t=1/f=1/30=0{,}033$с. Тоді компоненти оптичного потоку у цій точці визначаються як:

$$u(x,y)=\frac{\Delta x}{\Delta t}=12\Big/\frac{1}{30}=360\,\text{пікселів/с},$$

$$v(x,y)=\frac{\Delta y}{\Delta t}=9\Big/\frac{1}{30}=270\,\text{пікселів/с}.$$

Отже, вектор оптичного потоку для даної точки буде наступним:

$$\left(u(x,y),v(x,y)\right)=(360,270).$$

Цей вектор визначає напрямок та швидкість переміщення точки зображення у пікселях за секунду. Модуль вектору (швидкість) обчислюється як:

$$S=\sqrt{u^2+v^2}=\sqrt{360^2+270^2}=450\,\text{пікселів / с},$$

а кут напрямку вектора відносно осі x, визначається за допомогою аргументу вектору, тобто функції:

$$\theta=atan2(v,u)=atan2(270,360)\approx 0{,}6435\,\text{радіан}.$$

У цьому випадку використано функцію $atan2(v,u)$, оскільки вона однозначно визначає кут векторного напрямку в усіх чотирьох чвертях координатної площини, враховуючи знаки обох компонент – v,u.

Отримані значення зміщення у пікселях переводимо у реальні величини для обчислення реально пройденої відстані, із урахуванням парамет-

рів камери – її висоти над площиною руху, кута нахилу та фокусної відстані.

Алгоритм вимірювання пройденої відстані наземним транспортним засобом

Послідовність кадрів отримується з камери, спрямованої на поверхню під транспортним засобом, для фіксування зміни текстури.

Кожен кадр містить три канали даних (*RGB*). Оскільки метод Лукаса-Канаде працює на основі локального аналізу зміни яскравості, а не кольору, переведемо кожен кадр у градації сірого, де кожен піксель має лише одне значення яскравості (інтенсивності), а не три. Це дозволяє значно скороти обчислювальні ресурси.

Для зменшення тангенціального і радіального спотворення, які зростають до країв зображення [15, 16], і підвищення точності визначення ключових точок, використовуємо область по центру кадру, розміром 500X500 пікселів.

На наступному етапі реалізуємо метод Лукаса-Канаде із пірамідами [19] для визначення зміщення між послідовними кадрами. Отримані зміщення ключових точок по двох осях x та y використаємо для обчислення пройденої відстані.

Формулу для розрахунку зміщення по осях x та y, отримуємо із класичної моделі центральної проекції (камера-обскура), яка має вигляд:

$$\frac{X}{Z} = \frac{x}{f}, \tag{9}$$

де X – координата об’єкта у реальному просторі по осі x, Z – відстань до об’єкта по оптичні осі, x – координата пікселя, f – фокусна відстань. Через нахил камери під кутом θ, реальна відстань від камери до площини руху по нормалі буде:

$$Z = H/\cos\theta, \tag{10}$$

де H – висота камери над площиною.

Отже, з формули (8) маємо:

$$X = \frac{x\cdot\left(H/\cos\theta\right)}{f}. \tag{11}$$

Знаходимо зміщення між кадрами:

$$D_x = X_1 - X_2 = \frac{x_1\cdot\left(H/\cos\theta\right)}{f} - \frac{x_2\cdot\left(H/\cos\theta\right)}{f}. \tag{12}$$

Із формул (4) і (8) отримуємо залежність для підрахунку зміщення у реальних величинах по осі *x*:

$$D_x = \frac{\Delta x \cdot \left(H/\cos\theta\right)}{f}. \tag{13}$$

Аналогічно отримуємо реальне зміщенні по осі *y*:

$$D_y = \frac{\Delta y \cdot \left(H/\cos\theta\right)}{f}. \tag{14}$$

Тоді загальна пройдена відстань матиме вигляд:

$$d = \sum \sqrt{D_x^{\ 2} + D_y^{\ 2}}\ . \tag{15}$$

Калібрування камери для аналізу оптичного потоку

Камера моделюється як ідеальний перспективний проєктор, що перетворює 3*D*-координати (X, Y, Z) у фізичному просторі у 2*D*-координати $(u\ , v)$ на площині зображення за допомогою перспективного проєціювання [20]. Відображення 3*D*-точки на матрицю зображення описується рівнянням:

$$s\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K\left[R\ T\right]\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \tag{15}$$

де s – масштабний фактор, $R \in \mathbb{R}^{3\times3}$ – матриця повороту, що описує орієнтацію камери у просторі, $T \in \mathbb{R}^{3\times1}$ – вектор переносу (трансляції), що описує положення камери, K – матриця внутрішніх параметрів камери:

$$\mathrm{K} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{16}$$

де f_x, f_y – фокусні відстані в пікселях, c_x, c_y – координати головної точки.

Фізичні властивості лінз камери спричиняють спотворення зображення, які поділяють на радіальні та тангенціальні. Радіальне спотворення виникає через вигин лінз. Тангенціальне спотворення викликане нерівномірністю монтажу лінз.

Задача калібрування полягає у відновленні внутрішніх і зовнішніх параметрів камери, за набором зображень що були отримані за допомогою камери.

Задача розв'язується у рамках проведеного дослідження шляхом попереднього калібрування камери *Logitech C*270 *HD*, яка використовується для фіксації зображень у процесі вимірювання оптичного потоку. Калібрування проводилось за допомогою функцій бібліотеки *OpenCV* із використанням стандартної шахової калібрувальної мішені розміром 9×6 клітинок. Для цього було знято серію зображень шахової дошки під різними кутами та на різних відстанях.

На рис. 1 зображено шахову калібрувальну мішень розміром 9×6 клітинок. Внутрішні кути, які використовуються функцією *cv*2.*calibrateCamera* для калібрування камери, позначено червоними колами. Лінії, що з'єднують кути, відображають внутрішню структуру шаблону, яка аналізується під час обчислення параметрів камери.

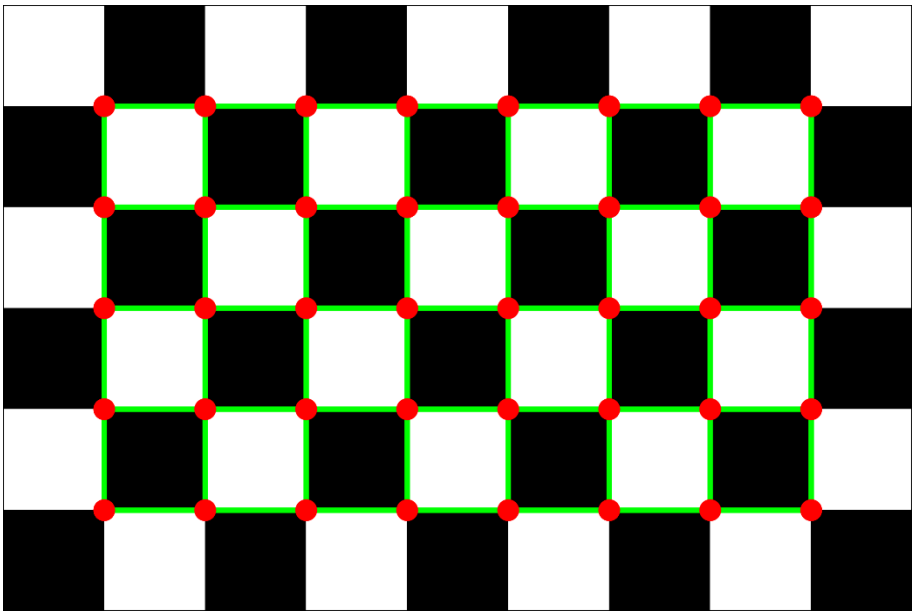

Рис. 1. Зображення шахової калібрувальної мішені розміром 9×6 клітинок

На основі автоматично виявлених кутів шахового візерунка обчислюються внутрішні параметри камери за допомогою функції *cv*2.*calibrateCamera*. Які використані для корекції зображень перед обчисленням оптичного потоку, що дало змогу зменшити спотворення та підвищити точність подальших обчислень відстані.

Аналіз [21] існуючих методів калібрування відеокамер підтвердив ефективність використання плоского калібрувального об'єкта у вигляді шахової дошки. Поєднання автоматизованого та ручного визначення ключових точок у процесі калібрування дозволяє значно підвищити точність.

Експериментальна перевірка розглянутого алгоритму. Опис експериментальної установки

Алгоритми обчислення оптичного потоку реалізовано на основі бібліотеки комп'ютерного зору *OpenCV*. Для отримання оптично потоку використовується камера *Logitech C270 HD*. Швидкість отримання оптичного потоку з камери 30 кадрів/сек. Розмір кадру 1280×960 пікселів.

На рис. 2 зображенні приклади текстури поверхонь на яких проводилися експериментальні дослідження для оцінки якості обчислення пройденої відстані. Текстури *А* є контрастною та має чітко виражений візерунок, що сприяє стабільному визначенню оптичного потоку завдяки наявності великої кількості ключових точок. Текстура *Б* також є контрастною але не має чітко вираженого візерунку. Текстура *В* є контрастною, з великою кількістю дрібних деталей, що забезпечує достатню кількість ключових точок, але не формує стабільного регулярного візерунку. Текстура *Г* характеризується менш вираженим контрастом і меншою кількістю текстурних деталей, що дещо ускладнює процес обчислення. Текстура *Д* є майже однорідною, з низькою структурною насиченістю, що значно ускладнює визначення зміщення та знижує точність оцінки пройденої відстані.

А) *Б)* *В)* *Г)* *Д)*

Рис. 2. Зображення текстури поверхонь для оцінки точності обчислень

Проведені експериментальні дослідження на різних текстурованих і однорідних поверхнях за різних кутах нахилу камери та різній дистанції (табл. 1, табл. 2) показують вплив текстури поверхні та кута нахилу камери на точність вимірювання.

Алгоритми обчислення оптичного потоку реалізовано на основі бібліотеки комп'ютерного зору *OpenCV*. Для зменшення впливу спотворень зображення [15, 16] ключові точки визначались по центру зображення.

***Таблиця* 1.**

Результати експериментальних вимірювань ($\theta = 0°$)

Текстура поверхні	Дистанція, м	Кут нахилу камери, °	Швидкість, м/с	Середня похибка, %
А	30	0	0,28	$\varepsilon = 1{,}28$
Б	30	0	0,28	$\varepsilon = 1{,}59$

Текстура поверхні	Дистанція, м	Кут нахилу камери, °	Швидкість, м/с	Середня похибка, %
В	30	0	0,28	$\varepsilon = 1{,}93$
Г	30	0	0,28	$\varepsilon = 4{,}9$
Д	30	0	0,28	$\varepsilon > 20$
А	1000	0	0,28	$\varepsilon = 1{,}87$
Б	1000	0	0,28	$\varepsilon = 1{,}94$
В	1000	0	0,28	$\varepsilon = 2{,}03$
Г	1000	0	0,28	$\varepsilon = 5{,}7$
Д	1000	0	0,28	$\varepsilon > 20$

***Таблиця* 2.**

Результати експериментальних вимірювань ($\theta = 45°$)

Текстура поверхні	Дистанція, м	Кут нахилу камери, °	Швидкість, м/с	Середня похибка, %
А	1	45	0,28	$\varepsilon = 4.9$
Б	1	45	0,28	$\varepsilon = 4.73$
В	1	45	0,28	$\varepsilon = 4.93$
Г	1	45	0,28	$\varepsilon = 7.8$
Д	1	45	0Є28	$\varepsilon > 20$

Результати експериментальних досліджень для різних текстур поверхонь(табл. 1) показують високу точність для контрастних поверхонь. Текстури *А* і *Б* за нульового кута нахилу камери демонструють середню похибку 1,28 % та 1,59 % відповідно. Така точність безпосередньо корелює sз якістю і кількістю виявлених ключових точок, що є важливим для надійного розрахунку оптичного потоку. На менш контрастній поверхні *Г* середня похибка обчислення збільшується до 4,9 %. Це пояснюється тим, що на менш контрастних поверхнях складніше виявляти та надійно відслідковувати ключові точки. На однорідній текстурі *Д* спостерігається сильне зростання середньої похибки понад 20 %.

Зі збільшенням кута нахилу камери до 45°, точність обчислень дещо знижується: навіть для добре текстурованих поверхонь похибка зростає до 4,9 % (*А*) та 4,73 % (*Б*), а для слабко текстурованих — до 7,8 % (Г). Тенденція до зростання похибки безпосередньо пов’язана зі зміною геометрії зйомки. Збільшення кута нахилу призводить до сильніших перспективних спотворень та зміни масштабу у різних частинах кадру.

Наведені вище результати підтверджують чутливість методу до текстури поверхні та геометрії зйомки. З метою підвищення точності було використано стратегії компенсації спотворень, спричинених радіальними і тангенціальними викривленнями шляхом відслідковування ключових точок по центру кадра.

Висновок

Показано, що запропонований підхід у реалізації оптичного одометра із використанням покращеного методу Лукаса-Канаде із пірамідами демонструє високу точність визначення пройденої відстані. Використання монокулярного зору дозволяє значно скоротити обчислювальні ресурси за рахунок обробки меншої кількості даних, спрощує конструкцію та зменшує енерговитрати.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили ефективність запропонованого методу для обчислення пройденої відстані транспортного засобу. Аналіз впливу текстури поверхонь показав, що метод забезпечує високу точність на контрастних і добре текстурованих покриттях, але має тенденцію до зростання похибки на однорідних або слабко текстурованих поверхнях.

Отримані результати підтверджують перспективність запропонованого підходу для автономних наземних роботизованих комплексів, забезпечуючи точне та енергоефективне вимірювання переміщення без зовнішніх навігаційних сигналів.

References

1. *Schmidt, G. T.*, “GPS Based Navigation Systems in Difficult Environments”, Gyroscopy and Navigation, vol. 10, pp. 41–53, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1134/S207510871902007X.
2. *Dovhopolyi A. S.* and *Zahirskyi A. V.* " Conceptual principles and method of creating a high-through autonomous ground robotic complex" *Mechanics of Gyroscopic Systems*, no. 48, pp. 5–14, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.20535/0203-3771482024317860.
3. *Du, Shuang, Wei Sun,* and *Yang Gao* “MEMS IMU Error Mitigation Using Rotation Modulation Technique”, Sensors, vol. 12, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/s16122017.
4. *Nesterenko O. I.* "Features of errors in a micro-mechanical inertial navigation system in autonomous mode of operation," in Proc. XXIII Int. Conf. *Instrument Making*, pp. 28–31.
5. *Mohamed S. A. S., Haghbayan M. H., Westerlund T., Heikkonen J., Tenhunen H.,* and *Plosila J.* “A Survey on Odometry for Autonomous Navi-

gation Systems", IEEE Access, vol. 7, pp. 97466–97486, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2929133.
6. *Yousif, K., Bab-Hadiashar, A,* and *Hoseinnezhad, R.*, "An Overview to Visual Odometry and Visual SLAM: Applications to Mobile Robotics", Intelligent Industrial Systems SP, vol. 1, pp. 289–311, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s40903-015-0032-7.
7. *Saito, R., Watanabe, K.,* and *Nagai, I.*, "Laser odometry taking account of the tilt on the laser sensor", in 2015 10th Asian Control Conference (ASCC), IEEE, 2015, pp. 1–4. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ASCC.2015.7244648.
8. *Mohammad O. A. Aqel, Mohammad H. Marhaban, M. Iqbal Saripan,* and *Napsiah Bt. Ismail*, "Review of visual odometry: types, approaches, challenges, and applications", SpringerPlus, vol. 5, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1186/s40064-016-3573-7.
9. *Joachim Horn* and *Günther Schmidt*, "Continuous localization of a mobile robot based on 3D-laser-range-data, predicted sensor images, and dead-reckoning", Robotics and Autonomous Systems, vol. 14, pp. 99–118, 1995. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/0921-8890(94)00023-U.
10. *Vedant Gaur*, "Lucas-Kanade Optical Flow Machine Learning Implementations", Journal of Student Research, vol. 11, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.47611/jsrhs.v11i3.2957.
11. *Farnebäck, G.*, Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion, Berlin, 2003. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/3-540-45103-X_50.
12. *Berthold K. P. Horn* and *Brian G. Schunck*, "Determining optical flow", Brian G. JO - Artificial. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/0004-3702(81)90024-2.
13. *Xie Xiaomei*, "Visual inertia odometer method based on improved optical flow method", CN111609868A, Sep. 01, 2020.
14. *Gonzalez, R., Rodriguez, F., Guzman, J. L., Pradalier, C.,* and *Siegwart, R.*, "Control of off-road mobile robots using visual odometry and slip compensation", Advanced Robotics, vol. 27, pp. 893–906, 2013. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/01691864.2013.791742.
15. *Arman Neyestani, Francesco Picariello, Imran Ahmed, Pasquale Daponte,* and *Luca De Vito*, "From Pixels to Precision: A Survey of Monocular Visual Odometry in Digital Twin Applications", Sensors, vol. 24, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/s24041274.
16. *Davies E. R.*, Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities, vol. 3. San Francisco, CA , United States: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2004.
17. *Beauchemin S. S.* and *Barron J. L.*, "The computation of optical flow", ACM Computing Surveys, vol. 27, pp. 433–466, 1995. [Online]. Available: https://doi.org/10.1145/212094.212141.

18. *Fleet D.* and *Weiss Y.*, “Optical Flow Estimation”, in Handbook of Mathematical Models in Computer Vision, Boston, MA: Springer, pp. 237-257. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/0-387-28831-7_15.
19. *Bouguet J.*, “Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Feature Tracker Description of the algorithm.” [Online]. Available: https://robots.stanford.edu/cs223b04/algo_tracking.pdf.
20. *Richard Hartley* and *Andrew Zisserman*, Multiple View Geometry in Computer Vision, 2nd ed. Cambridge University Press, 2003.
21. *Pampukha I. V.*, *Nikiforov M. M.*, *Stelya O. B.*, and *Katrychuk D. O.*, "Methodology for determining internal parameters of a digital camera through calibration," *Scientific Works of the Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv*, no. 57, pp. 47–55, 2017. [Online]. Available: https://miljournals.knu.ua/index.php/zbirnuk/article/view/251.