

УДК 535.8

*Збруцький О.В.¹, д.т.н., професор;**Степаненко В.Ю.², PhD студент;**^{1,2} КІП ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна*

МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ПРОЙДЕНОЇ ВІДСТАНІ ОПТИЧНИМ ОДОМЕТРОМ

Вступ. Однією з найпоширеніших систем локалізації автономних транспортних засобів є глобальна система позиціонування (*Global Positioning System, GPS*). Проте функціональність GPS сильно залежить від наявності супутників, що робить її недоступною в деяких ситуаціях [1]. Використання гіроінерціальних систем необхідної для навігації точності пов'язане з суттєвим ростом вартості та габаритів [2]. Використання навіть найкращих МЕМС-систем не дозволяє отримувати задовільну точність навігації [3, 4]. Тому задача автономного визначення положення залишається актуальною у контексті розвитку навігаційних систем. Широке застосування для вирішення цієї задачі в наземних транспортних засобах знаходять одометри, побудовані на різних фізичних принципах, таких як: *колісна одометрія* [5]; *інерціальна одометрія* [3]; *лазерна одометрія* [6]; *візуальна одометрія* [7].

Постановка проблеми. Визначення пройденої відстані за допомогою візуальних одометрів, що функціонують на основі обчислення оптичного потоку, є перспективним напрямком досліджень. У роботі запропоновано метод вимірювання дистанції, який використовує обчислення оптичного потоку. Останній являє собою векторне поле, що характеризує видиме зміщення об'єктів, поверхонь або текстур на зображенні, спричинене відносним рухом камери та спостережуваної сцени.

Методологія досліджень. Запропоновано підхід до вимірювання пройденої відстані базується на методі Лукаса-Канаде із застосуванням пірамідальної апроксимації [8]. 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 в k разів. Таким чином, нові компоненти оптичного потоку 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 з попереднім рівнем або з оригінальним зображенням, що дозволяє зменшити обчислювальну складність і працювати з великими зміщеннями. Обчислення починається з найменшого рівня піраміди (найбільш зменшеного зображення). Оптичний потік, обчислений на поточному рівні, масштабується і використовується як початкове наближення для наступного рівня з 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 з найменшого зображення і закінчуючи найбільш деталізованим), ми отримуємо остаточне поле оптичного потоку. Результатом попереднього кроку будуть дані про зміщення пікселів разом із відомою висотою камери над поверхнею та фокусною відстанню камери дадуть можливість для розрахунку реальної відстані.

Результати. Проведені експериментальні дослідження на різних текстурованих і однорідних поверхнях при різних кутах нахилу камери та різній дистанції (табл. 1,2). Алгоритми обчислення оптичного потоку реалізовано на основі бібліотеки комп'ютерного зору OpenCV. Для зменшення впливу спотворень зображення [9, 10] ключові точки визначались по центру зображення.

Таблиця 1

Результати експериментальних вимірювань (кут нахилу $\theta = 0^\circ$)

Текстур	Дистанці	Ку т нахилу	Швидкість	Середн

а поверхні	я, м	камери, °	ь, м/с	я похибка, %
<i>A</i>	1	0	0.28	$\varepsilon = 1.18$
<i>B</i>	1	0	0.28	$\varepsilon = 1.57$
<i>B</i>	1	0	0.28	$\varepsilon = 4.5$
<i>Г</i>	1	0	0.28	$\varepsilon > 20$
<i>A</i>	10	0	0.28	$\varepsilon = 1.25$
<i>B</i>	10	0	0.28	$\varepsilon = 1.54$
<i>B</i>	10	0	0.28	$\varepsilon = 4.6$
<i>Г</i>	10	0	0.28	$\varepsilon > 20$
<i>A</i>	30	0	0.28	$\varepsilon = 1.28$
<i>B</i>	30	0	0.28	$\varepsilon = 1.59$
<i>B</i>	30	0	0.28	$\varepsilon = 4.9$
<i>Г</i>	30	0	0.28	$\varepsilon > 20$

Таблиця 2

Результати експериментальних вимірювань (кут нахилу $\theta = 45^\circ$)

Текстур а поверхні	Дистанці я, м	Ку т нахилу камери, °	Швидкіст ь, м/с	Середн я похибка, %
<i>A</i>	1	45	0.28	$\varepsilon = 4.9$
<i>B</i>	1	45	0.28	$\varepsilon = 4.73$
<i>B</i>	1	45	0.28	$\varepsilon = 7.8$
<i>Г</i>	1	45	0.28	$\varepsilon > 20$

Результати експериментальних досліджень для різних текстур поверхонь (табл. 1) показують високу точність для контрастних текстур *A* і *B*. На менш контрастній поверхні *B* похибка обчислення збільшується, а на однорідній текстурі *Г* сильно зростає.

Вплив кута нахилу камери на точність вимірювання (табл.1,2) можна зменшити, застосовуючи матриці гомографії[11].

Висновки. Розроблений алгоритм вимірювання пройденої відстані показує свою ефективність та можливість використання для вирішення задач автономної навігації наземних транспортних засобів. Встановлено, що

основними факторами, які впливають на точність вимірювань, є текстура поверхні та кут нахилу камери до поверхні.

Джерела

1. Schmidt, G.T. GPS Based Navigation Systems in Difficult Environments. *Gyroscopy and Navigation*. 2019. Vol. 10. P. 41–53. URL: <https://doi.org/10.1134/S207510871902007X>.
2. А. С. Довгополий, А. В. Загірський. Концептуальні засади та метод створення високопрохідного автономного наземного роботизовного комплексу. *Механіка гіроскопічних систем*. 2024. вип. 48. С. 5–14. URL: <https://doi.org/10.20535/0203-3771482024317860>.
3. Du, Shuang, Wei Sun, Yang Gao. MEMS IMU Error Mitigation Using Rotation Modulation Technique. *Sensors*. 2017. Vol. 12. URL: <https://doi.org/10.3390/s16122017>.
4. Нестеренко О.І. Особливості похибок мікромеханічної інерціальної навігаційної системи у автономному режимі роботи. *XXIII Міжнародна конференція «Приладобудування»*, НТУУ «КПІ». С. 28–31.
5. Yousif, K., Bab-Hadiashar, A, Hoseinnezhad, R. An Overview to Visual Odometry and Visual SLAM: Applications to Mobile Robotics. *Intelligent Industrial Systems SP*. 2015. Vol. 1. P. 289–311. URL: <https://doi.org/10.1007/s40903-015-0032-7>.
6. Saito, R., Watanabe, K., Nagai, I. Laser odometry taking account of the tilt on the laser sensor.. *2015 10th Asian Control Conference (ASCC)*, Kota Kinabalu, Malaysia, 31 May 2015. IEEE, 2015. P. 1–4. URL: <https://doi.org/10.1109/ASCC.2015.7244648>.
7. Control of off-road mobile robots using visual odometry and slip compensation / Gonzalez, R. et al. *Advanced Robotics*. 2013. Vol. 27. P. 893–906. URL: <https://doi.org/10.1080/01691864.2013.791742>.

8. Colín-Espinoza, A., Montes-Venegas, H.A., Barilla-Pérez, M.E. Improved Image Dominant Plane Extraction for Robot Navigation. *Research and Education in Robotics - EUROBOT 2010*, Berlin, Heidelberg. Springer. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-27272-1_1.
9. From Pixels to Precision: A Survey of Monocular Visual Odometry in Digital Twin Applications / Arman Neyestani et al. *Sensors*. 2024. Vol. 24. URL: <https://doi.org/10.3390/s24041274>.
10. E. R. Davies. Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities. San Francisco, CA , United States : Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2004. Vol. 3. ISBN 978-0-12-206093-9.
11. 21. A Review of Homography Estimation: Advances and Challenges / Yinhui Luo et al. *Electronics*. 2023. Vol. 12. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics12244977>.