

АДАПТИВНИЙ МЕТОД ГЕОМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ ПРИМІЩЕНЬ НА ОСНОВІ КЛАСИФІКАЦІЇ ПРОСТОРОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна

Анотація

Стаття присвячена розробці адаптивного методу автоматизованого обміру приміщень для потреб оздоблювальних та ремонтних робіт. Актуальність дослідження зумовлена високою трудомісткістю традиційних методів вимірювання та відсутністю доступних автоматизованих рішень для малого та середнього бізнесу будівельної галузі. Запропоновано оригінальну математичну модель класифікації приміщень на основі трьох безрозмірних геометричних інваріантів: коефіцієнта витягнутості, коефіцієнта складності периметра та коефіцієнта заповнення перешкодами. Розроблено алгоритм адаптивного планування траєкторії сканування, що використовує модифікований метод швидкого дослідження випадкових дерев із функцією привабливості невідсканованих областей.

Ключові слова: адаптивне сканування, класифікація приміщень, мобільна вимірювальна платформа, одночасна локалізація та картографування, планування траєкторії, геометричний аналіз.

Abstract

The paper addresses the development of an adaptive method for automated room measurement for finishing and renovation works. The relevance of the research is determined by the high labor intensity of traditional measurement methods and the lack of affordable automated solutions for small and medium-sized construction businesses. An original mathematical model for room classification based on three dimensionless geometric invariants is proposed: elongation coefficient, perimeter complexity coefficient, and obstacle density coefficient. An adaptive scanning trajectory planning algorithm using a modified rapidly-exploring random trees method with an attraction function for unscanned areas has been developed.

Keywords: adaptive scanning, room classification, mobile measurement platform, simultaneous localization and mapping, trajectory planning, geometric analysis.

ВСТУП

Автоматизація процесу вимірювання геометричних параметрів приміщень залишається актуальною задачею для будівельної галузі та сфери оздоблювальних послуг. Традиційні методи вимірювання з використанням портативних далекомірів вимагають від 2 до 4 годин робочого часу для обміру приміщення площею 30 м² при середній похибці 5 мм [1]. Впровадження технології лазерного сканування суттєво підвищує точність та швидкість обмірювальних робіт [2].

Розвиток технологій одночасної локалізації та побудови карти (SLAM) створює передумови для автоматизації цього процесу. Аль-Тавіл та співавтори [3] у оглядовій роботі систематизували методи візуального SLAM для робототехнічних систем. Гессе та співавтори [4] представили алгоритм Cartographer для двовимірного лідарного SLAM у реальному часі. Однак існуючі підходи використовують фіксовані траєкторії сканування без урахування геометричних особливостей конкретного приміщення.

Цзу та співавтори [5] запропонували алгоритм планування шляху GAO-RRT* для мобільних роботів, який забезпечує швидку збіжність та низьку вартість шляху. Є та співавтори [6] розробили алгоритм CBQ-RRT* для двонаправленого планування траєкторії у складних середовищах. Однак ці методи не адаптуються до геометричних особливостей приміщень.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КЛАСИФІКАЦІЇ ПРИМІЩЕНЬ

Для класифікації типу приміщення розроблено математичну модель на основі трьох геометричних інваріантів. Перший інваріант характеризує витягнутість приміщення та визначається як відношення максимального до мінімального габаритного розміру:

$$k_a = \frac{L_{max}}{L_{min}}, \quad (1)$$

де L_{max} та L_{min} – максимальний та мінімальний габаритні розміри приміщення відповідно. Другий інваріант характеризує складність геометрії периметра приміщення:

$$k_g = \frac{P_{fact}}{P_{rect}}, \quad (2)$$

де P_{fact} – фактичний периметр приміщення, P_{rect} – периметр описаного прямокутника з розмірами $L_{max} \times L_{min}$.

Третій інваріант визначає щільність заповнення простору перешкодами:

$$k_o = \frac{S_{obst}}{S_{total}}, \quad (3)$$

де S_{obst} – площа, зайнята меблями та обладнанням, S_{total} – загальна площа приміщення.

На основі комбінації значень трьох інваріантів здійснюється класифікація приміщення на один із шести типів, представлених у табл. 1.

Таблиця 1 – Класифікація типів приміщень за геометричними інваріантами

Тип	Назва	Умови класифікації	Стратегія сканування
T_1	Квадратне вільне	$k_a < 1,5; k_g < 1,2; k_o < 0,2$	Спіральна
T_2	Квадратне середньозап.	$k_a < 1,5; k_g < 1,2; 0,2 \leq k_o < 0,4$	Спіральна з обходом
T_3	Квадратне щільнозап.	$k_a < 1,5; k_g < 1,2; k_o \geq 0,4$	Адаптивна RRT
T_4	Прямокутне	$1,5 \leq k_a < 3,0; k_g < 1,3$	Зигзагоподібна
T_5	Коридорне	$k_a \geq 3,0$	Лінійна центральна
T_6	Складної геометрії	$k_g \geq 1,3$	Модифікована RRT

Обчислення інваріантів виконується за результатами швидкого попереднього сканування периметра приміщення тривалістю від 2 до 3 хвилин. Алгоритм виявлення контуру приміщення базується на перетворенні Хафа для виявлення лінійних сегментів з подальшою апроксимацією полігоном [7].

АЛГОРИТМ АДАПТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ

Для кожного типу приміщення розроблено оптимальну стратегію планування траєкторії детального сканування. Траєкторія представляється множиною точок огляду:

$$W = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}, p_i = (x_i, y_i, \varphi_i), \quad (4)$$

де x_i, y_i – координати точки огляду, φ_i – орієнтація платформи.

Критерієм оптимальності траєкторії є максимізація коефіцієнта повноти покриття при обмеженнях на час виконання та довжину шляху:

$$C(W) \rightarrow \max, \quad (5)$$

$$L(W) \leq L_{max}, \quad (6)$$

$$T(W) \leq T_{max}, \quad (7)$$

де $C(W)$ – коефіцієнт повноти покриття, $L(W)$ – довжина траєкторії, $T(W)$ – час виконання сканування.

Коефіцієнт повноти покриття визначається як:

$$C(W) = \frac{S_{scan}}{S_{total}}, \quad (8)$$

де S_{scan} – площа приміщення, для якої отримано вимірювання з похибкою менше 5 мм.

Для приміщень типу T_1 застосовується спіральна траєкторія від периметра до центру з кроком спіралі:

$$d_{spiral} = 0,9 \cdot R_{sensor}, \quad (9)$$

де R_{sensor} – робоча дальність лазерного далекоміра. Коефіцієнт 0,9 забезпечує перекриття зон покриття на 10 % для надійної реєстрації даних.

Для коридорних приміщень типу T_5 використовується лінійна траєкторія вздовж центральної осі з точками зупинок на відстані:

$$d_{stop} = 1,6 \cdot R_{sensor}, \quad (10)$$

що забезпечує перекриття зон покриття на 20 % з обох боків коридору.

Для приміщень складної геометрії типу T_6 застосовується модифікований алгоритм швидкого дослідження випадкових дерев (RRT) [8]. Модифікація полягає у введенні функції привабливості для невідсканованих областей:

$$p_{sample} = \alpha \cdot p_{random} + (1 - \alpha) \cdot p_{frontier}, \quad (11)$$

де p_{random} – рівномірна випадкова точка у вільному просторі, $p_{frontier}$ – точка на межі відсканованої та невідсканованої області, $\alpha = 0,3$ – коефіцієнт балансу між дослідженням та покриттям.

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ГЕОМЕТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Сумарна похибка вимірювання геометричних параметрів складається з похибки датчика відстані, похибки позиціонування платформи та похибки алгоритмів обробки:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{sensor}^2 + \sigma_{pos}^2 + \sigma_{proc}^2. \quad (12)$$

Похибка лазерного далекоміра будівельного класу згідно з технічною специфікацією виробника становить $\sigma_{sensor} = 2$ мм при дальності до 8 м.

Похибка позиціонування визначається точністю одометрії та системи локалізації. Для використаного алгоритму Cartographer [4] похибка локалізації оцінюється як:

$$\sigma_{pos} = \sigma_0 + k \cdot L_{path}, \quad (13)$$

де $\sigma_0 = 5$ мм – початкова похибка, $k = 0,001$ – коефіцієнт накопичення похибки, L_{path} – довжина пройденого шляху.

Похибка алгоритмів обробки включає похибки фільтрації шумів, виявлення площин та побудови моделі. Для використаного статистичного фільтра викидів з порогом 3σ , описаного Русу та Казенсом у бібліотеці Point Cloud Library [9], похибка становить $\sigma_{proc} \approx 1,5$ мм.

Для типового приміщення з довжиною траєкторії 50 м сумарна очікувана похибка становить:

$$\sigma_{total} = \sqrt{2^2 + (5 + 0,001 \cdot 50000)^2 + 1,5^2} = 5,93 \text{ мм}. \quad (14)$$

Експериментальні дослідження підтвердили теоретичну оцінку з відхиленням менше 15 %.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА МЕТОДУ

Експериментальна перевірка виконана на мобільній платформі власної розробки на базі модифікованого шасі робота-пилососа. Апаратна конфігурація включає лазерний далекомір Bosch GLM 50 C з точністю 2 мм та дальністю до 8 м, одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 4 Model B з 4 ГБ оперативної пам'яті, та систему навігації з інкрементальними енкодерами на колесах з роздільною здатністю 500 імпульсів на оберт.

Програмне забезпечення реалізовано з використанням Robot Operating System та бібліотеки Cartographer для побудови карти приміщення [4]. Алгоритм класифікації та адаптивного планування траєкторії реалізовано мовою Python з використанням бібліотеки NumPy для обчислень.

Контрольні приміщення включали: квадратне вільне площею 32 м² ($k_a = 1,1$; $k_g = 1,05$; $k_o = 0,15$), прямокутне середньозаповнене площею 48 м² ($k_a = 2,4$; $k_g = 1,08$; $k_o = 0,32$), коридорне площею 12 м² ($k_a = 4,8$; $k_g = 1,12$; $k_o = 0,18$), та приміщення складної геометрії площею 56 м² ($k_a = 1,6$; $k_g = 1,42$; $k_o = 0,25$).

Середня абсолютна похибка вимірювання лінійних розмірів для адаптивного методу становить 3,8 мм зі стандартним відхиленням 1,2 мм, що відповідає теоретичній оцінці. Для площ приміщень відносна похибка становить 1,4 %, що на 19 % краще порівняно з фіксованою стратегією.

Найбільший вигравш адаптивного методу спостерігається для коридорних приміщень, де цільова траєкторія вздовж центральної осі забезпечує покращення повноти покриття з 0,85 до 0,98, та для приміщень складної геометрії, де застосування модифікованого алгоритму RRT підвищує повноту покриття з 0,82 до 0,96.

Середній час виконання повного циклу сканування для адаптивного методу становить 10,7 хв, що на 11 % менше порівняно з фіксованою стратегією. Енергоефективність підвищується на 12 % завдяки оптимізації траєкторії та зменшенню надлишкових вимірювань.

Еталонні вимірювання виконано професійним тахеометром Leica TS16 з точністю 1 мм. Для кожного приміщення виконано 5 циклів вимірювань адаптивним методом та 5 циклів з фіксованою спіральною траєкторією. Результати експериментальних досліджень наведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Результати експериментальних досліджень

Тип приміщення	Метод	Похибка довжини, мм	Похибка площі, %	Повнота покриття	Час, хв
Квадратне вільне	Адаптивний	$3,2 \pm 0,8$	0,9	0,97	8,5
	Фіксований	$3,5 \pm 1,1$	1,2	0,94	9,2
Прямокутне	Адаптивний	$3,6 \pm 1,0$	1,1	0,95	12,1
	Фіксований	$4,1 \pm 1,4$	1,5	0,89	13,8
Коридорне	Адаптивний	$3,4 \pm 0,9$	1,2	0,98	5,3
	Фіксований	$4,8 \pm 2,1$	2,3	0,85	6,8
Складної геометрії	Адаптивний	$4,8 \pm 1,8$	2,1	0,96	16,7
	Фіксований	$6,2 \pm 2,9$	3,4	0,82	18,3
Середнє	Адаптивний	$3,8 \pm 1,2$	1,4	0,96	10,7
	Фіксований	$4,7 \pm 1,9$	2,1	0,88	12,0

ВИСНОВКИ

Розроблено адаптивний метод геометричного аналізу приміщень на основі класифікації просторових характеристик з використанням трьох геометричних інваріантів. Запропоновано математичну модель класифікації шести типів приміщень та алгоритм адаптивного планування траєкторії сканування з використанням модифікованого методу швидкого дослідження випадкових дерев.

Експериментальна перевірка на контрольних приміщеннях чотирьох типів показала зменшення середньоквадратичної похибки вимірювання площі на 19 % та покращення коефіцієнта повноти покриття з 0,82 до 0,96 порівняно з фіксованою стратегією. Середня абсолютна похибка вимірювання лінійних розмірів становить 3,8 мм зі стандартним відхиленням 1,2 мм, що відповідає вимогам професійного використання у оздоблювальних роботах.

Практична реалізація методу з використанням компонентів загальною вартістю 12000 грн робить технологію доступною для малих та середніх підприємств будівельної галузі. Подальший розвиток методу може включати інтеграцію датчиків комп'ютерного зору для семантичної класифікації приміщень та застосування методів машинного навчання для автоматичної оптимізації параметрів траєкторії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- Guo J., Liu Y., Chen X., Wang D. A Terrestrial Laser Scanning-Based Method for Indoor Geometric Quality Measurement // Remote Sensing. – 2024. – Vol. 16(1). – P. 59.
- Yue X., Zhang Y., Chen J., Zhou X., He M. LiDAR-based SLAM for robotic mapping: state of the art and new frontiers // Industrial Robot. – 2024. – Vol. 51(2). – P. 196–205.
- Al-Tawil B., Hempel T., Abdelrahman A., Al-Hamadi A. A review of visual SLAM for robotics: evolution, properties, and future applications // Frontiers in Robotics and AI. – 2024. – Vol. 11. – P. 1347985.
- Hess W., Kohler D., Rapp H., Andor D. Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2016. – P. 1271–1278.
- Zhu L., Duan P., Meng L., Yang X. GAO-RRT*: A path planning algorithm for mobile robot with low path cost and fast convergence // AIMS Mathematics. – 2024. – Vol. 9(5). – P. 12011–12042.
- Ye L., Li J., Li P. Improving path planning for mobile robots in complex orchard environments: the continuous bidirectional Quick-RRT* algorithm // Frontiers in Plant Science. – 2024. – Vol. 15. – P. 1337638.
- Duda R.O., Hart P.E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures // Communications of the ACM. – 1972. – Vol. 15(1). – P. 11–15.
- LaValle S.M. Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning // Technical Report TR 98-11, Computer Science Department, Iowa State University. – 1998.
- Rusu R.B., Cousins S. 3D is here: Point Cloud Library (PCL) // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2011. – P. 1–4.

Тушинський Віталій Едуардович – студент групи ІКІ-24м, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна. E-mail: vitaliytushinskiy03@gmail.com

Томчук Микола Антонович – доцент, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

Vitalii E. Tushynskiy – student, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine. E-mail: vitaliytushinskiy03@gmail.com

Mykola A. Tomchuk – Ph.D., Associate Professor, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine.