

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДХОДУ VISUAL SLAM ДЛЯ НАВІГАЦІЇ АВТОНОМНОГО РОБОТА

Вінницький національний технічний університет

### Анотація

Розглянуто метод Visual SLAM, сформульована його проблематика та наведено математичний базис для вирішення задачі даного методу.

**Ключові слова:** Visual SLAM, максимум апостеріорної імовірності, закриття циклу.

### Abstract

The Visual SLAM method is considered, its problems are formulated, and the mathematical basis for solving the problem of this method is given.

**Keywords:** Visual SLAM, maximum a posteriori probability (MAP), Loop-Closure.

### Вступ

Одночасна локалізація та відображення (SLAM) — це передова технологія, яка поєднує комп'ютерне бачення, штучний інтелект і робототехніку, щоб дозволити машинам сприймати та орієнтуватися в невідомому середовищі. Це дозволяє роботам або автономним системам розуміти своє оточення, будувати карту навколишнього середовища та одночасно визначати своє власне положення на цій карті[1]. Visual SLAM — це метод, який використовує алгоритми комп'ютерного бачення та дані датчиків для створення карти невідомого середовища з одночасним визначенням положення й орієнтації камери чи робота в цьому середовищі. Це важлива технологія для автономних систем, яка дозволяє їм орієнтуватися та взаємодіяти з навколишнім середовищем, не покладаючись на вже існуючі карти чи зовнішні системи позиціонування. Традиційні методи SLAM зазвичай покладаються на датчики дальності, такі як лідар або ехолот, які забезпечують точні вимірювання відстані, але не мають детальної візуальної інформації. Visual SLAM, з іншого боку, використовує камери як основний датчик, що дозволяє багатше та детальніше сприймати навколишнє середовище. Тому використання цього методу дозволяє створювати карти навколишнього середовища з найвищою точністю.

В загальному проблематика методу SLAM будується на тому, що робот повинен працювати в невідомому середовищі, щоб побудувати карту, оцінюючи своє невизначене розташування. SLAM є фундаментальною проблемою в численних додатках робототехніки, яка вимагає від робота автономної навігації в певному середовищі та взаємодії з реальним світом[2].

### Результати дослідження

Складність проблеми пов'язана з рекурсивною залежністю: побудова карти часто залежить від того, що робот спостерігає навколишнє середовище з певного відомого місця, тоді як оцінка стану також часто вимагає від робота зробити висновок про своє місцезнаходження, спираючись на деякі відомі орієнтири. Алгоритм SLAM оцінює рух датчика і одночасно реконструює геометричну структуру відвіданої області.

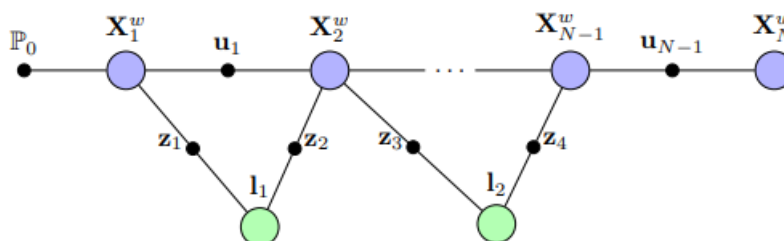


Рисунок 1 – Формулювання проблеми візуального SLAM за допомогою факторного графа, де позиції камери позначаються як  $X_i^w$ , а орієнтири як  $l_j$ . Спостереження орієнтирів і одометрії в різних положеннях камери позначаються як  $z_k$  і  $u_i$  відповідно. Попереднє переконання щодо початкової позиції позначається як  $P_0$ , і спільний розподіл ймовірностей проблеми MAP може бути обчислений до добутку зображених факторів.

R. Chatila and J.-P. Laumond[3] вперше сформулювали постановку задачі в 1985 році для навігації мобільних роботів. Проблема полягає в необхідності моделювати навколишнє середовище і правильно

визначати себе через неточності, внесені датчиками. Запропонована ними методологія визначає загальний принцип роботи з невизначеністю в зібраних даних і визначення мобільним роботом своїх орієнтирів під час дослідження навколишнього середовища.

Закриття циклу може виявити, чи був певний заданий ключовий кадр помічений раніше. Закриття циклу можна сформулювати як задачу оптимізації, таку як нелінійна задача найменших квадратів, яка зіставляє поточні сканування з раніше відвіданими областями. Однією з причин того, що закриття циклу є важким у SLAM, є те, що внутрішні оцінки, незважаючи на всі зусилля, можуть мати грубі помилки. Закриття циклу — це, по суті, проблема асоціації даних, коли позитивне закриття циклу відбувається, коли робот розпізнає локальну сцену як ту, яку він відвідав раніше[4].

SLAM — це мультидисциплінарна проблема, яка охоплює як комп'ютерний зір, так і домен робототехніки, і традиційно формулюється як максимуму апостеріорної імовірності (MAI). У Visual SLAM ми визначаємо  $X = \{X_i^w\}_{i=1}^N$  як траєкторію робота в часі, де  $X_i^w$  позначає позицію робота, параметризовану в наборі жорстких евклідових перетворень  $\mathbb{SE}$ .

Рішенням проблеми SLAM є оптимальна оцінка MAI

$$X^*, L^* = \arg \max_{X, L} \mathbb{P}(X, L | Z, U) \quad (1)$$

де  $\mathbb{P}(X, L | Z, U)$  є спільною ймовірністю всіх прихованих оціночних змінних, враховуючи всі попередні спостереження та вимірювання.

Факторний граф[5] є важливою частиною сучасних підходів до вирішення ймовірнісної проблеми SLAM шляхом факторизації та висновку щодо довільних функцій розподілу. Факторний граф  $G(V, F; E)$  — це дводольний граф, який визначає факторизацію змінних із глобальної функції на добуток локальних функцій. Зокрема, набір вершин  $V$  у графі  $G$  представляє приховані змінні, які беруть участь у процесі оцінювання. Набір факторів  $F$  представляє попередні знання щодо змінних вузлів і обмежень між вузлами, де зв'язки між вузлами представлені набором ребер  $E$ .

Ми можемо представити класичну задачу SLAM у вигляді факторного графа, як показано на рис. 1, де спільний розподіл ймовірностей оцінки MAI розкладено на множники як добуток факторів спостереження. Використовуючи позначення факторного графа, ми можемо переписати формулювання MAI у (1) як

$$\begin{aligned} X^*, L^* &= \arg \max_{X, L} \mathbb{P}(X, L | Z) \\ &= \arg \min_{X, L} \sum_{k=1}^K \|h_k(X_{l_k}^w, l_{j_k}) \ominus z_k\|_{\Sigma_k}^2 \end{aligned} \quad (2)$$

де  $h_k$  позначає  $k$ -й фактор спостереження орієнтира  $l_j$  з позиції камери  $X_i^w$  і з моделлю датчика  $z_k$ , позначення  $\|\cdot\|_{\Sigma}^2$  позначає квадрат норми Махаланобіса з коваріаційною матрицею  $\Sigma$  і  $\ominus$  є оператором різниці в цільовому просторі вимірювання.

Спільний розподіл ймовірностей усіх прихованих оціночних змінних проблеми SLAM можна записати як

$$\mathbb{P}(X, L | Z, U) \propto \mathbb{P}(X_0^w) \prod_{k=1}^K \mathbb{P}(z_k | X_{l_k}^w, l_{j_k}) \prod_{i=1}^N \mathbb{P}(X_i^w | X_{i-1}^w, u_{i-1}) \quad (4)$$

де  $\mathbb{P}(X_0^w) \equiv \mathbb{P}_0$  — попереднє переконання щодо початкової позиції робота.  $\mathbb{P}(z_k | X_{l_k}^w, l_{j_k})$  представляє ефект спостереження орієнтира  $z_k$ , з урахуванням асоціації даних  $(i_k, j_k)$ , а  $\mathbb{P}(X_i^w | X_{i-1}^w, u_{i-1})$  представляє оновлення стану з урахуванням моделі руху.

## Висновки

У результаті роботи було сформовано та описано проблематику методу Visual SLAM, яка полягає у рекурсивній залежності між позицією автономного робота у просторі та позиціями орієнтирів, які робот використовує для орієнтування у просторі. Також не меншою проблемою можна назвати проблему закриття циклу, коли роботу необхідно розпізнати раніше зафіксовану позицію для оновлення даних про власне місцезнаходження. Також наведено рисунок у вигляді факторного графу, який візуалізує класичну задачу SLAM. Було наведено основні формули для вирішення задачі SLAM, який полягає у визначенні оптимальної оцінки максимуму апостеріорної імовірності (MAI). Отримані результати дозволяють чітко усвідомити та розібрати основні проблеми алгоритмів на основі методу SLAM та реалізувати їх рішення.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Visual SLAM explained [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ai-jobs.net/insights/visual-slam-explained/>
2. H. J. S. Feder, J. J. Leonard, and C. M. Smith, "Adaptive mobile robot navigation and mapping," The International Journal of Robotics Research, vol. 18, no. 7, pp. 650–668, 1999.
3. R. Chatila and J.-P. Laumond, "Position referencing and consistent world modeling for mobile robots," in Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 2, IEEE, 1985, pp. 138–145.
4. Detection of loop closure in SLAM: A DeconvNet based approach [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1568494619302339>
5. F. R. Kschischang, B. J. Frey, and H.-A. Loeliger, "Factor graphs and the sum-product algorithm," IEEE Transactions on information theory, vol. 47, no. 2, pp. 498–519, 2001.

**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](mailto:fkca.lakitjav@gmail.com)

**Маслій Роман Васильович** – доцент кафедри АІТ, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [maslij.r.v@vntu.edu.ua](mailto: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](mailto: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](mailto:maslij.r.v@vntu.edu.ua)