

АЛГОРИТМИ SLAM-ТРЕКІНГУ В СИСТЕМАХ БЕЗМАРКЕРНОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ОБ'ЄМНИХ МОДЕЛЕЙ ПАКОВАННЯ

Супрун О.О., доцент, кафедра МСТ, ХНУРЕ

Трубчанінова С.В., бакалавр, кафедра МСТ, ХНУРЕ

Сиромятникова Д.О., бакалавр, кафедра МСТ, ХНУРЕ

Анотація. Системи безмаркерної доповненої реальності на основі SLAM-трекінгу трансформують пакування в інтерактивний цифровий носій. Дослідження розглядає SLAM як технологію підвищення взаємодії користувача з продуктом. Акцент зроблено на переході до динамічних візуальних систем без використання маркерів.

Ключові слова: доповнена реальність, відстеження SLAM, безмаркерна доповнена реальність, інтерактивна упаковка, комп'ютерний зір.

Сучасний розвиток цифрових технологій суттєво трансформує підходи до візуальної комунікації, змінюючи не лише способи подання інформації, але й саму логіку взаємодії користувача з цифровим контентом. Одним із найбільш інноваційних напрямів у цій сфері є доповнена реальність (Augmented Reality, AR), яка забезпечує накладання цифрових об'єктів, 3D-моделей, анімацій та інтерактивних елементів на фізичне середовище в режимі реального часу. Це створює новий рівень комунікації між продуктом і споживачем, де фізичний об'єкт перестає бути статичним носієм інформації та перетворюється на мультимедійний інтерфейс.

Особливо перспективним напрямом застосування AR є сфера пакування товарів. Традиційно упаковка виконувала переважно інформаційну та захисну функції, однак у цифрову епоху вона набуває додаткової ролі комунікаційної та інтерактивної. Раніше для активації AR-контенту використовувалися QR-коди або спеціальні маркери, які виступали тригерами для запуску цифрового контенту. Однак такі підходи мають обмеження, пов'язані з естетикою дизайну, необхідністю попередньої підготовки поверхні та низькою гнучкістю використання [1].

Сьогодні розвиток технологій SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) дозволяє створювати повністю безмаркерні AR-системи, які працюють без прив'язки до штучних маркерів і здатні взаємодіяти з будь-яким фізичним середовищем. SLAM-трекінг забезпечує одночасне визначення положення пристрою в просторі та побудову динамічної карти навколишнього середовища, що відкриває принципово нові можливості для інтерактивної візуалізації упаковки.

У межах SLAM-системи мобільний пристрій або AR-гарнітура використовує дані з камери, гіроскопів, акселерометрів та, у деяких випадках, сенсорів глибини. На основі цих даних система виконує постійну оцінку руху та просторового положення користувача, одночасно формуючи карту середовища. Це дозволяє розміщувати віртуальні об'єкти стабільно відносно реальних поверхонь без необхідності попереднього сканування або маркування сцени.

Принцип роботи SLAM у AR-системах можна розглядати як послідовний процес, що включає захоплення відеопотоку, виділення характерних ознак зображення (features), їх відстеження у часі, оцінку руху камери та оновлення карти простору.

Завершальним етапом є рендеринг AR-об'єктів, які інтегруються у реальне середовище з урахуванням перспективи, освітлення та геометрії сцени. Завдяки цьому створюється ефект «присутності» цифрових об'єктів у фізичному світі [2].

Порівняння маркерного та безмаркерного підходів до AR (табл. 1) демонструє суттєві відмінності в архітектурі та можливостях систем. Маркерні рішення, попри свою простоту та низьку обчислювальну складність, обмежені фіксованими точками активації та потребують спеціального дизайну упаковки.

Таблиця 1 – Порівняння маркерного та безмаркерного AR

Характеристика	Маркерний AR	Безмаркерний AR (SLAM)
Необхідність маркера	Так	Ні
Гнучкість використання	Обмежена	Висока
Реалістичність інтеграції	Середня	Висока
Швидкість налаштування	Швидка	Середня
Складність реалізації	Низька	Висока
UX (користувацький досвід)	Статичний	Інтерактивний

Застосування SLAM у візуалізації пакування відкриває широкий спектр практичних сценаріїв. У цифровому маркетингу упаковка стає інтерактивним носієм із 3D-анімаціями, демонстрацією властивостей продукту, інструкціями та гейміфікованими елементами. В освітньому контексті такі рішення дозволяють наочно пояснювати склад і використання продуктів [4].

AR у пакуванні застосовується в харчовій промисловості, косметичі, фармацевтиці, ритейлі та освіті: від візуалізації складу продуктів і симуляції ефекту використання до інтерактивних інструкцій і рекламних рішень, що підвищують залученість користувачів. Математичне моделювання точності SLAM-систем дозволяє описати залежність похибки позиціонування від кількості ключових точок сцени. Спрощена модель показує, що похибка зменшується зі збільшенням кількості виявлених ознак і може бути описана оберненою кореневою залежністю:

$$E = \frac{k}{\sqrt{N}}, \quad (1)$$

де E – похибка позиціонування;
 k – коефіцієнт складності середовища;
 N – кількість виявлених ключових точок.

Кількість N означає число виявлених ключових точок (характерних особливостей зображення кутів, контурів, текстурних ділянок). Коли їх більше, система SLAM має більше «орієнтирів» у просторі, за якими вона може відслідковувати рух камери. Це зменшує невизначеність і підвищує стабільність побудови карти, тому похибка позиціонування зменшується, а точність зростає.

Параметр k відображає складність середовища: погане освітлення, однотонні поверхні, відсутність текстур, віддзеркалення або рухомі об'єкти. У таких умовах алгоритму важче знаходити стабільні ключові точки і відслідковувати їх у часі. Через це система частіше помиляється у визначенні положення пристрою, і загальна

точність SLAM знижується. Основна задача розробників SLAM-алгоритмів навчитися знаходити якомога більше надійних ключових точок навіть у складних або «бідних на текстурі» сценах, не змінюючи саму фізичну складність середовища (k). Це досягається за рахунок покращення методів детекції features, використання нейромереж, фільтрації шумів та більш ефективного трекінгу. Таким чином система стає точнішою без необхідності змінювати реальні умови сцени [5].

Графічна інтерпретація (рис. 1) цієї залежності демонструє гіперболічний характер функції: на початкових етапах збільшення кількості ключових точок призводить до різкого зниження похибки, однак із подальшим зростанням N ефект стабілізується і крива наближається до асимптотичного значення. Це відображає практичне обмеження систем SLAM, пов'язане з фізичними характеристиками сенсорів та алгоритмічною складністю обробки даних.

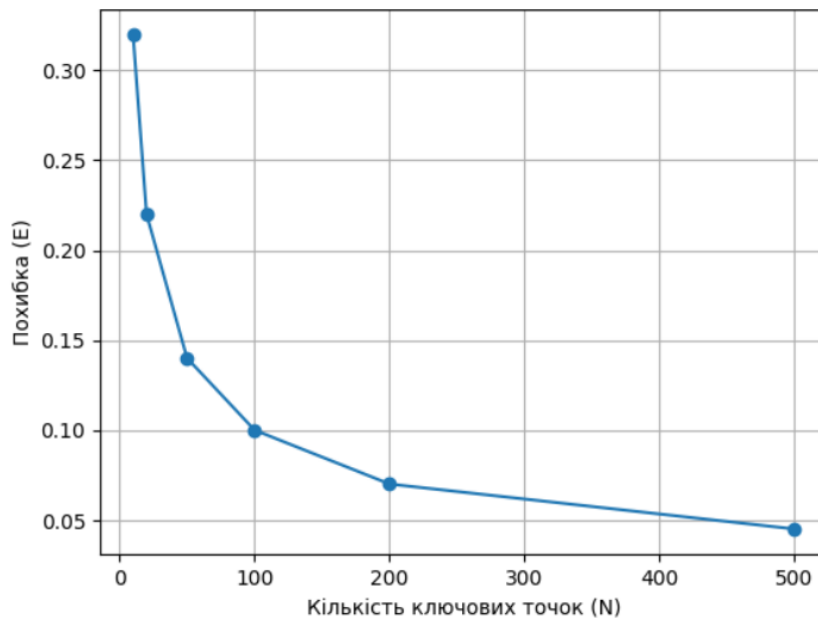


Рисунок 1 – Графік залежності точності SLAM від кількості ключових точок

Попри значні переваги, безмаркерні AR-системи мають низку обмежень: високе навантаження на мобільні пристрої, залежність від освітлення, складність роботи в динамічних сценах і необхідність балансу між точністю та швидкістю обробки. Стабільність SLAM також знижується за умов низької текстурованості або швидких рухів камери [6].

Перспективи розвитку пов'язані з інтеграцією штучного інтелекту та нейронних мереж для покращення трекінгу, персоналізації контенту й підвищення стабільності систем. Очікується поява «живих упаковок» і інтеграція AR із метавсесвітами брендів.

Отже, безмаркерні AR-технології на основі SLAM трансформують упаковку в інтерактивний мультимедійний інтерфейс, сприяючи поєднанню фізичного та цифрового середовищ і розвитку нових форм комунікації.

Література.

1. Кінь, Д.О., & Лазоренко, Н.Ю. (2025). Методика застосування SLAM-технології у топографічному картографуванні. Сучасні проблеми архітектури та містобудування, (15), 610-626. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.15.610-626>.
2. Szeliski, R. (2022). Computer Vision: Algorithms and Applications. 2nd ed. Cham, Switzerland: Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-34372-9>.
3. Williams, B., Klein, G., & Reid, I. (2007). Real-time SLAM relocalisation. In Proc. 11th IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'07). https://www.robots.ox.ac.uk/~lav/Papers/williams_etal_iccv2007/williams_etal_iccv2007.pdf.
4. Montemerlo, M., Thrun, S., Koller, D., & Wegbreit, B. (2003). FastSLAM 2.0: An improved particle filtering algorithm for simultaneous localization and mapping that provably converges. IJCAI. <https://robots.stanford.edu/papers/Montemerlo03a.pdf>.
5. Jiang, B., & Neumann, U. (2001). Extendible tracking by line autocalibration. IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality (ISAR'01). (p. 97-103).
6. Nistér, D., Naroditsky, O., & Bergen, J.R. (2005). Visual odometry. IEEE Intl. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '04). (p. 652-659).