УДК 004.946

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ВІДСТЕЖЕННЯ МАРКЕРІВ У СИСТЕМАХ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

[1]Олександр СУПРУН, [2]Раїса БЕДРАТА
[1]доцент, кафедра МСТ, ХНУРЕ
[2]студент, кафедра МСТ, ХНУРЕ

Abstract. *The paper addresses methods for improving the stability of fiducial marker tracking in augmented reality systems. Instability of tracking manifests itself as jitter, pose drift, and loss of registration under changing illumination, occlusion, motion blur, and small marker size in the image. Key approaches are considered: adaptive image binarization, robust marker dictionaries, subpixel corner refinement, temporal filtering with Kalman-type estimators, visual-inertial fusion, and multi-marker configurations. A generalized stability assessment model is proposed, and technological constraints are identified.*

Keywords: *augmented reality, fiducial markers, marker tracking, pose estimation, Kalman filter, visual-inertial odometry.*

Системи доповненої реальності (AR) накладають віртуальні об’єкти на зображення реального середовища, тому їхня якість безпосередньо залежить від точності та стабільності відстеження маркерів. Навіть незначні похибки в оцінюванні пози камери призводять до дрижання віртуального об’єкта (джитера), зсуву реєстрації або повної втрати трекінгу, що різко погіршує користувацький досвід. У той час як сучасні бібліотеки розпізнавання маркерів (ArUco, AprilTag) забезпечують високу швидкість роботи, їхня стійкість у складних умовах зйомки залишається обмеженою [1, 2].

Нестабільність відстеження має кілька джерел. До них належать зміни освітлення та контрасту, часткове перекриття маркера об’єктами сцени, розмиття через рух камери, малий кутовий розмір маркера, перспективні спотворення, а також похибки калібрування камери. Крім того, окремі помилки сегментації та ідентифікації кодової сітки маркера спричиняють різкі стрибки оцінюваної пози, які сприймаються користувачем особливо помітно. Отже, задача полягає не лише в підвищенні точності оцінювання пози, а й у згладжуванні часової поведінки трекера без додаткової затримки [3].

Перша група методів спрямована на підвищення якості попередньої обробки зображення: адаптивна бінаризація з локальним порогом стабілізує сегментацію при нерівномірному освітленні, а субпіксельне уточнення кутів квадратних маркерів зменшує квантування пози. Друга група, вибір стійких словників маркерів із великою міжмаркерною відстанню Геммінга та перевіркою контрольних бітів, що знижує ймовірність хибної ідентифікації. Третя група охоплює часові методи: фільтр Калмана або розширений фільтр Калмана для згладжування потоку поз, а також злиття з даними інерційних датчиків (visual-inertial odometry), що компенсує втрату маркера на окремих кадрах [4].

Ефективним практичним рішенням є також використання конфігурацій з кількох маркерів (маркерних дощок): наявність кількох опорних точок підвищує точність оцінювання пози камери та забезпечує безперервність трекінгу при частковому перекритті. Для обґрунтування вибору методів доцільно застосовувати

інтегральну оцінку стабільності, що враховує точність пози, рівень джитера та імовірність втрати трекінгу:

$$S = w_1A + w_2C - w_3J - w_4L, \quad \sum w_i = 1 \qquad (1)$$

де S — інтегральна оцінка стабільності відстеження; A — точність оцін ювання пози (зворотна середня похибка репроєкції); C — коректність ідентифікації маркерів; J — рівень джитера, що оцінюється як середнє квадратичне приросту пози між сусідніми кадрами; L — частота втрат трекінгу; w_1–w_4 — вагові коефіцієнти, які визначаються пріоритетами застосування. Модель є концептуальною основою для порівняння конфігурацій трекера, а не результатом експериментального вимірювання.

Водночас методи підвищення стабільності мають технологічні обмеження. Фільтрація додає затримку, що критично для інтерактивних застосувань; інерційне злиття потребує калібрування датчиків та синхронізації часу; адаптивна обробка збільшує обчислюване навантаження на мобільних пристроях. Додатково слід враховувати захист від підроблення маркерів та стійкість до навмисних перешкод у сценаріях з високими вимогами до безпеки.

Отже, стабільне відстеження маркерів досягається комплексним поєднанням стійких словників, якісної попередньої обробки зображення, часової фільтрації та багатомаркерних конфігурацій. Подальші дослідження доцільно спрямувати на глибинні методи детектування маркерів, адаптивне керування параметрами фільтра в реальному часі та стандартизовані метрики оцінювання стабільності для різних платформ.

Список літератури

1. Garrido-Jurado, S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J., & Marín-Jiménez, M. J. (2014). Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition, 47(6),* 2280-2292. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.01.005

2. Wang, J., & Olson, E. (2016). AprilTag 2: Efficient and robust fiducial detection. *In 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (pp. 4193-4198). IEEE.* https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759617

3. Супрун О., Білова А., Сиромятникова Д. Вплив технологій доповненої та віртуальної реальності на когнітивну й емоційну залученість користувачів *// Культурологія та соціальні комунікації: інноваційні стратегії розвитку. Харків: ХДАК, 2025*. Ч. 2. С. 273–274.

4. Suprun O. O., Taranenko S. B. Development of a Hybrid Visual-Inertial SLAM Algorithm for Dynamic Stage Environments // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2021. P. 167–170.