

УДК 004.946

Особенности реализации трекинга плоских маркеров на HoloLens 2

Зеленов Роман Евгеньевич

romazelenov@yandex.ru

Шишова Мария Владимировна

mshishova@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены подходы к реализации трекинга плоских AR-маркеров на устройстве HoloLens 2 применительно к задачам хирургической навигации. Проведен анализ существующих решений и выявлены ограничения, связанные с использованием QR-кодов и устаревших библиотек. Обоснован выбор подхода на основе OpenCV для Unity, обеспечивающего совместимость с современным программным стеком. Экспериментально исследовано влияние параметров видеопотока на дальность и стабильность трекинга, определены оптимальные режимы работы. Полученные результаты подтверждают возможность применения предложенного подхода в системах хирургической навигации.

Ключевые слова: дополненная реальность, HoloLens 2, AR-маркеры, трекинг, OpenCV, хирургическая навигация, компьютерное зрение, ArUco, производительность, точность позиционирования

Features of Flat Marker Tracking Implementation on HoloLens 2

Zelenov Roman Evgenievich

romazelenov@yandex.ru

Shishova Maria Vladimirovna

mshishova@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. Approaches to implementing flat AR marker tracking on the HoloLens 2 device for surgical navigation applications are considered. Existing solutions are analyzed, and limitations associated with QR code tracking and outdated libraries are identified. The use of an approach based on OpenCV for Unity is justified, ensuring compatibility with a modern software stack. The influence of video stream parameters on tracking range and stability is experimentally investigated, and optimal operating modes are determined. Practical recommendations for system configuration, video stream selection, and 3D model optimization are formulated. The results confirm the applicability of the proposed approach in surgical navigation systems.

Keywords: augmented reality, HoloLens 2, AR markers, tracking, OpenCV, surgical navigation, computer vision, ArUco, performance, positioning accuracy

Введение. В последние годы технология дополненной реальности (AR — augmented reality) находят применение в различных областях, а именно: обучение, промышленность, строительство, медицина, авиация и так далее. В медицине AR позволяет накладывать виртуальные модели, построенные по данным МРТ (магнитно-резонансная томография) или КТ [1] (компьютерная

томография) пациента, через кожные покровы для визуализации объектов интереса. Но требования точной и удобной привязки накладывают ограничения на тип применяемых маркеров, а также на аппаратную и программную части носимого устройства (AR-гарнитуры). Так, потенциально удовлетворительную точность привязки наряду с простотой изготовления и удобством размещения на инструменте имеют плоские маркеры. В качестве AR-гарнитуры выбрано устройство HoloLens 2, т. к. на данный момент оно имеет наиболее предпочтительные вычислительные ресурсы для работы с объемными трехмерными моделями, а также обеспечивает различные варианты трекинга и управления.

Целью работы является определение необходимых программных компонент и оптимальных параметров видеопотока для стабильного трекинга плоских маркеров на HoloLens 2, оценка производительности и точности позиционирования, а также выработка практических рекомендаций для разработчиков систем хирургической навигации.

Устройство HoloLens 2 поддерживает отслеживание плоских маркеров, к которым относятся AR-маркеры (ArUco, AprilTags), а также QR-коды. Данная возможность представляет особый интерес для задач хирургической навигации, где требуется точное и стабильное позиционирование инструментов в пространстве [2]. Однако выбор подходящего метода трекинга и его реализация сопряжены с рядом ограничений, связанных как с аппаратными особенностями устройства, так и с доступными программными решениями.

Материалы и методы. Для реализации трекинга плоских маркеров были рассмотрены существующие решения. Для QR-кодов существует готовое решение, доступное на GitHub и основанное на нативной библиотеке [3]. Однако его использование ограничено рядом существенных недостатков. В частности, система способна корректно распознавать только маркеры размером не менее 50×50 мм. Диапазон углов распознавания мал. Кроме того, исследования показывают, что трекинг AR-маркеров значительно эффективнее по сравнению с QR-кодами [4].

Приложение может быть запущено с использованием различных AR-провайдеров, таких как OpenXR и Windows Mixed Reality (WMR). При этом наблюдается существенная разница в производительности: WMR обеспечивает частоту около 60 FPS, тогда как OpenXR-порядка 15–20 FPS.

Среди open-source решений для трекинга AR-маркеров можно выделить ARToolKit [5] и ARTag. Однако их применение в настоящее время затруднено. Для корректной работы требуется использование устаревших версий программного обеспечения (например, Unity 2019, Visual Studio 2019 и более ранних версий Windows Holographic). При этом многие зависимости этих библиотек уже обновлены и не поддерживаются современными инструментами разработки. Дополнительным недостатком является низкая частота обновления трекинга, что негативно сказывается на стабильности отображения 3D-моделей.

Наиболее актуальным подходом является использование портированной для Unity библиотеки компьютерного зрения OpenCV [6]. Данное решение

совместимо с современным стеком технологий, включая MRTK3, Unity 2022, Visual Studio 2022 и Windows Holographic версии 22621. Это позволяет избежать проблем совместимости и существенно упрощает разработку.

OpenCV for Unity использует камеру видимого диапазона, при этом разработчик может выбрать подходящий видеопоток в зависимости от требований к дальности и производительности трекинга.

Для оценки эффективности подхода был проведен эксперимент с использованием маркера ArUco размером 40×40 мм. Выбор данного размера обусловлен компромиссом между удобством размещения и надежностью трекинга: такой маркер достаточно компактен для установки на инструмент и одновременно обеспечивает стабильное распознавание. В качестве тестового визуализируемого объекта использовался куб размером 18×18×18 мм, позволяющий оценить стабильность отображения виртуальной геометрии при трекинге.

В рамках эксперимента анализировались видеопотоки с разным разрешением и частотой кадров (см. таблицу).

Результаты. Ниже приведена таблица параметров видеопотоков в соответствии с экспериментом.

Доступные видеопотоки HoloLens 2

Спектр	Разрешение, (W×H×FPS)	Render, FPS	Video, FPS	Track, FPS	ArUco 40×40 мм (6×6): макс. расстояние трекинга
GRAY	424×240×30	50–60	30	30	до 40 см
GRAY	500×282×30	55–60	28–30	29–30	до 50 см
GRAY	640×360×30	45	30	30	до 62 см
GRAY	760×428×30	45	30	30	до 70 см
GRAY	960×540×30	43–45	25	25	до 90 см
GRAY	1128×636×30	45	15	15	до 109 см
GRAY	1280×720×30	38	15	15	до 120 см
GRAY	1504×846×30	38	12	12	до 135 см
GRAY	1920×1080×30	40	8	8	до 209 см
GRAY	1952×1100×30	37	7	7	до 228 см
GRAY	1952×1100×60	30–35	6	6	Не измерялось
GRAY	1952×1100×30	48–55	8	8	Не измерялось

Полученные результаты отражают влияние параметров видеопотока на характеристики трекинга и служат основой для дальнейшего анализа.

Обсуждение. Проведенный эксперимент показал, что наиболее оптимальными для задач хирургической навигации являются видеопотоки 640×360×30, 760×428×30 и 960×540×30. Эти режимы обеспечивают баланс между дальностью трекинга и производительностью системы. При необходимости увеличения дальности могут использоваться более высокие разрешения: 1128×636×30, 1280×720×30, 1504×846×30, однако это сопровождается снижением частоты

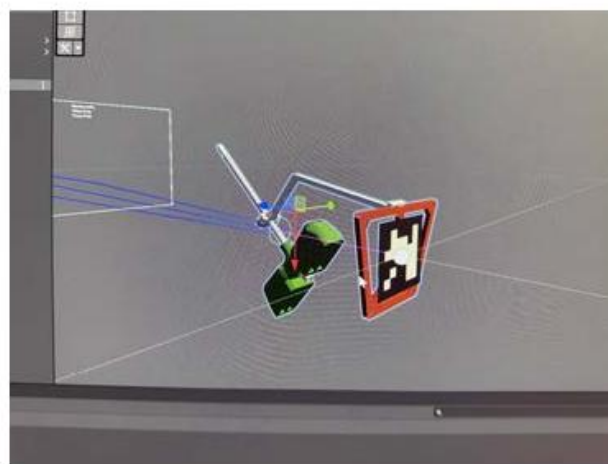
кадров. Оставшиеся видеопотоки неприменимы для задач хирургической навигации, так как либо чрезвычайно нагружают процессор, либо имеют слишком низкое качество и как следствие — дальность трекинга.

Увеличение разрешения видеопотока позволяет распознавать маркеры меньшего размера на коротких дистанциях, однако систематическое исследование минимально различимого размера маркера не проводилось.

Для оценки точности трекинга маркера ArUco разработана 3D-модель биопсийной иглы. Затем выполнялась ее привязка к маркеру, закрепленному на реальной игле. Точность оценивалась визуально по миллиметровой бумаге (рис. 1).



а



б

Инструмент в виде биопсийной иглы

а — оценка погрешности привязки, б — оптимизация модели

Отклонение виртуальной иглы от реальной не превышало 3 мм. В дальнейшем необходима оптимизация привязки виртуальной модели и изменение способа закрепления маркера для уменьшения отклонения.

Дополнительно было установлено, что для обеспечения стабильной работы системы важно учитывать оптимизацию визуализируемых объектов. В частности, модель инструмента была упрощена с использованием модификатора Decimate в Blender до размера 91 КБ в формат glb. Это позволило при замене тестового куба на детализированную модель снизить производительность всего на 1–2 FPS, что свидетельствует о возможности использования более сложной геометрии без значительного ухудшения характеристик системы.

Также важным фактором является корректный выбор и изготовление маркеров. При уровне освещенности не менее 400 лк рекомендуется соблюдать следующие требования [7]:

- толщина черной рамки должна составлять 17...34 % от стороны маркера;
- необходимо обеспечивать максимально высокий контраст изображения;
- рисунок маркера должен быть уникальным и содержать достаточное количество высокочастотных элементов;
- предпочтительно использование матовой бумаги для исключения бликов;

- сократить количество полигонов для ускорения отрисовки;
- загружать 3D-модели в формате glb.

Заключение. Несмотря на то, что плоские AR-маркеры могут уступать ИК-маркерам [8] по диапазону углов и дальности при трекинге подвижных инструментов, они существенно менее требовательны по аппаратным ресурсам — достаточно обычной камеры вместо стереокамеры со светодиодной подсветкой. Этот фактор позволяет разрабатывать AR-гарнитуры меньших массогабаритных размеров для применений в хирургической навигации. Предложенный подход демонстрирует достаточную стабильность и производительность для практического применения. При этом он может быть расширен за счет модификации маркерной конфигурации или использования комбинированных решений.

Особый интерес представляет применение плоских маркеров для отслеживания статичных объектов, например для задания системы мировых координат в операционной. В этом случае маркер может быть размещен на фиксированной поверхности (например, операционном столе), а дальнейший трекинг выполняется относительно него.

В результате проведенного исследования установлено, что использование библиотеки OpenCV for Unity позволяет реализовать стабильный трекинг AR-маркеров на HoloLens 2 с частотой 25–30 FPS, разрешением 960×540 пикселей и дальностью до 2,28 м для маркера размером 40×40 мм. Предложенный подход обеспечивает совместимость с современными инструментами разработки и допускает использование оптимизированных 3D-моделей без существенной потери производительности. Это позволяет рассматривать данный подход как перспективный для применения в системах хирургической навигации на базе HoloLens2. Так, дальнейшие исследования будут посвящены оптимизации размера плоского маркера на реальном рабочем расстоянии.

Список источников

- [1] Zhou Z. et al. Design and validation of a surgical navigation system for brachytherapy based on mixed reality. *Medical Physics*, 2019, no. 8(46), pp. 3709–3718.
- [2] Morley C.T. et al. Mixed Reality Surgical Navigation System; Positional Accuracy Based on Food and Drug Administration Standard. *Surgical Innovation*, 2024, no. 1(31), pp. 48–57.
- [3] MixedReality-QRCode-Sample. URL: <https://github.com/microsoft/MixedReality-QRCode-Sample/tree/OpenXR> (accessed 10.04.2026).
- [4] Florkowska A. et al. Metrological Analysis of HoloLens 2 for Visual Marker-Based Surgical Navigation. 2023 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST), Copenhagen, Denmark, 2023, pp. 1–6.
- [5] HoloLensARToolKit. URL: <https://github.com/qian256/HoloLensARToolKit> (accessed 10.04.2026).
- [6] OpenCV for Unity. URL: <https://enoxsoftware.com/opencvforunity/> (accessed 10.04.2026).
- [7] Cao A. et al. Image-based marker tracking and registration for intraoperative 3D image-guided interventions using augmented reality. *Arxiv:1908.03237*, 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.03237>
- [8] Maurer P. et al. Infrared marker tracking with the HoloLens for neurosurgical interventions. *Current Directions in Biomedical Engineering*, 2020, no. 1(6). <https://doi.org/10.1515/CDBME-2020-0027>