

УДК 004.946

Метод определения оптимальных конфигураций пространственных якорей для приложений смешанной реальности

Алпатова Марианна Валерьевна^{1, 2(*)}

m.v.alpatova@yandex.ru

SPIN-код: 1458-7868

Рудяк Юрий Владимирович¹

rudyak@mail.ru

SPIN-код: 4283-0952

¹ Московский политехнический университет, Москва, Россия² РТУ МИРЭА, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена задача оптимального размещения пространственных якорей в приложениях смешанной реальности. Представлена теоретическая модель, направленная на определение минимально необходимого количества якорей и их оптимального расположения для минимизации пространственного дрейфа. Разработаны критерии для количественной оценки стабильности трекинга и предложена методика формирования рекомендательных таблиц, которые могут быть использованы разработчиками AR/MR-приложений для выбора оптимальной конфигурации якорей. Полученные результаты имеют практическое значение для улучшения устойчивости трекинга и разработки систем, адаптированных к различным условиям эксплуатации.

Ключевые слова: смешанная реальность, пространственные якоря, пространственный дрейф, оптимизация, математическая модель

Method for determining optimal spatial anchor configurations for mixed reality applications

Alpatova Marianna Valeryevna^{1, 2(*)}

m.v.alpatova@yandex.ru

SPIN-code: 1458-7868

Rudyak Yuri Vladimirovich¹

rudyak@mail.ru

SPIN-code: 4283-0952

¹ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia² MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Abstract. The problem of optimal spatial anchor placement in mixed reality applications is considered. A theoretical model is presented to determine the minimum required number of anchors and their optimal placement to minimize spatial drift. Criteria for quantitative assessment of tracking stability are developed, along with a methodology for generating recommendation tables that can be used by AR/MR application developers to select optimal anchor configurations. The obtained results have practical significance for enhancing tracking stability and developing systems adapted to various operational conditions.

Keywords: mixed reality, spatial anchors, spatial drift, optimization, mathematical model

Введение. Стабильность пространственного трекинга — ключевой аспект MR-приложений, обеспечивающий точность привязки виртуальных объектов к реальному миру. Смещение виртуальных объектов и нестабильность позиционирования часто снижают качество пользовательского опыта, особенно в мобильных устройствах [1, 2].

Методы трекинга, такие как SLAM и World Locking Tools, обеспечивают базовую привязку виртуального контента, но в условиях динамической среды их точность снижается, иногда превышая 10 см даже на лучших устройствах. Вопросы пространственной привязки также активно изучаются в контексте взаимодействия устройств виртуальной реальности, например в оценках привязки смартфонов в XR-средах [1, 3]. Проблемы совместимости устройств и сложности в синхронизации якорей остаются актуальными [2, 4].

Идея использования нескольких якорей для улучшения стабильности трекинга активно обсуждается, но отсутствует математическая модель для количественной оценки и оптимизации их размещения [5].

Цель исследования — разработка модели, позволяющей оптимально размещать якорные точки для минимизации дрейфа. Новизна работы заключается в формализации задачи оптимизации и выработке критериев для количественной оценки эффективности.

Материалы и методы. Пусть имеется физическое пространство $\Omega \subseteq \mathbb{R}^3$, представленное в виде меша, состоящего из множества треугольников, сходящихся в центре распознанной поверхности. Данная плоскость является результатом работы системы компьютерного зрения, которая выделяет плоские поверхности в физическом пространстве (1):

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}, a_i \in \mathbb{R}^3, i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где n — количество пространственных якорей; a_i — пространственные координаты i -го якоря. В центре конфигурации якорей располагается виртуальный контрольный объект, исходная позиция которого фиксируется и обозначается как $o_0 \in \mathbb{R}^3$. Во время работы системы измеряется текущая позиция контрольного объекта $o(t) \in \mathbb{R}^3$, которая может изменяться во времени в силу погрешностей трекинга и других внешних факторов.

Таким образом, задачей является нахождение оптимальной конфигурации якорей (2), описываемой двумя параметрами — количеством якорей $n \in \mathbb{N}$ и расстоянием $d \in \mathbb{R}_+$ между соседними якорями, обеспечивающей максимально возможную стабильность позиционирования виртуального объекта:

$$X^* = (n^*, d^*). \quad (2)$$

Для количественной оценки стабильности и точности трекинга вводятся три показателя: мгновенный, средний и максимальный дрейф виртуального объекта.

Мгновенный дрейф $\Delta(t, X)$ является базовой мерой, которая измеряется в каждый момент времени и отражает текущее отклонение виртуального объекта от исходного положения (3):

$$\Delta(t, X) = \|o(t) - o_0\|, \quad (3)$$

где применяется Евклидова норма (L2-норма) в пространстве $\mathbb{R}^3$, вычисляемая следующим образом (4):

$$\|o(t) - o_0\| = \sqrt{(x(t) - x_0)^2 + (y(t) - y_0)^2 + (z(t) - z_0)^2}, \quad (4)$$

где $x(t), y(t), z(t)$ — координаты текущего положения виртуального объекта; x_0, y_0, z_0 — координаты исходной позиции объекта. Выбор именно Евклидовой нормы объясняется ее естественным физическим смыслом, наиболее точно отражающим понятие «расстояние» в трехмерном пространстве.

Средний дрейф $\bar{\Delta}(X)$ — это дополнительный показатель, который фиксируем для оценки общего качества трекинга. Он рассчитывается путем интегрального усреднения мгновенного дрейфа за весь период наблюдений T (5):

$$\bar{\Delta}(X) = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta(t, X) dt. \quad (5)$$

Использование интеграла обусловлено необходимостью вычисления объективного среднего значения отклонений, учитывающего непрерывный характер процесса измерений и возможные вариации интервалов между отдельными замерами, возникающими при работе AR/MR-приложений.

Максимальный дрейф $\Delta_{\max}(X)$ определяется как наибольшее из значений мгновенного дрейфа, зарегистрированное в течение всего периода наблюдения (6):

$$\Delta_{\max}(X) = \max_{t \in [0, T]} \Delta(t, X). \quad (6)$$

Максимальный дрейф имеет наибольшую практическую значимость, так как именно он определяет предельную погрешность, с которой будет сталкиваться пользователь при взаимодействии с виртуальным контентом.

На основании введенных показателей стабильности формулируется следующая гипотеза.

Нулевая гипотеза (H_0): использование нескольких пространственных якорей не оказывает значимого влияния на снижение среднего и максимального дрейфа трекинга (7):

$$H_0: \Delta_{\max}(n, d) = \Delta_{\max}^{\text{one}}, \bar{\Delta}(n, d) = \bar{\Delta}^{\text{one}}, \quad (7)$$

где $\Delta_{\max}^{\text{one}}$ и $\bar{\Delta}^{\text{one}}$ — значения максимального и среднего дрейфа при использовании единственного якоря.

Альтернативная гипотеза (H_1): использование нескольких пространственных якорей позволяет значительно снизить значения максимального и среднего дрейфа (8):

$$H_1: \Delta_{\max}(n, d) < \Delta_{\max}^{\text{one}}, \bar{\Delta}(n, d) = \bar{\Delta}^{\text{one}}, \quad (8)$$

Предложенная математическая модель предназначена для количественной проверки этой гипотезы и выявления условий, при которых использова-

ние нескольких якорных точек позволяет достичь значимого улучшения трекинга.

Результаты. Для оценки допустимости конкретной конфигурации якорей вводится экспертное ограничение, связанное с максимально допустимым значением максимального дрейфа (9):

$$\Delta_{\max}(X) \leq \Delta_{\text{threshold}}, \quad (9)$$

где $\Delta_{\text{threshold}}$ — пороговое значение максимального дрейфа, устанавливаемое экспертным путем, исходя из требований комфортного взаимодействия пользователя с системой. В рамках данной работы принято значение $\Delta_{\text{threshold}} = 0,03 \text{ м} = 3 \text{ см}$, отражающее практически допустимый предел погрешности в типовых AR/MR-приложениях.

Задача оптимизации заключается в нахождении минимально необходимого количества якорей n^* и соответствующего оптимального расстояния между ними d^* (10), которые удовлетворяют условию (9):

$$d^*(n^*) = \arg \min_{d \leq D} \Delta_{\max}(n^*, d),$$

где D — максимально допустимое расстояние между якорями, при котором система компьютерного зрения способна надежно отслеживать их положение. Таким образом, задача оптимизации направлена на поиск таких конфигураций якорей, которые обеспечивают минимально возможный дрейф при соблюдении всех ограничений.

В результате применения предложенной математической модели были получены четкие теоретические рекомендации по оптимальной конфигурации пространственных якорей для обеспечения стабильности пространственного трекинга в приложениях смешанной реальности (AR/MR).

Предложенный подход обеспечивает количественно выраженные зависимости между числом якорей, расстоянием между ними и показателями точности трекинга. Это позволяет разработчикам создавать оптимальные конфигурации якорей для конкретных приложений и условий использования. Основным результатом исследования является создание рекомендательных таблиц, позволяющих оценить, какие конфигурации обеспечивают требуемую точность трекинга (см. таблицу).

Пример выходных данных математической модели

Количество якорей (n) на м^2	Оптимальное расстояние (d^*), м	Средний дрейф, см	Максимальный дрейф, см	Соответствие критерию допустимости
2	15	1,9	3,2	Нет
4	20	1,2	2,5	Да
6	25	0,9	1,5	Да
8	30	0,7	1,1	Да

Обсуждение полученных результатов. Полученные данные подтверждают, что использование нескольких пространственных якорей значительно улучшает стабильность трекинга в смешанной реальности. Оптимизационная модель продемонстрировала снижение среднего и максимального дрейфа благодаря увеличению числа якорей и оптимальному выбору их расстояний. Исследование показало, что стабильный трекинг возможен даже при ограниченном количестве якорей, при правильном их расположении.

Результаты согласуются с другими исследованиями, но уникальность данной методики в ее ориентации на количественную оптимизацию размещения якорей для MR-приложений. Ограничения модели включают отсутствие учета динамических изменений среды и особенностей различных устройств. Для дальнейшего развития метода необходимы численные эксперименты и адаптация модели к реальным условиям эксплуатации.

Заключение. Настоящее исследование предложило теоретическую модель для улучшения трекинга в MR-приложениях через оптимальное размещение пространственных якорей. Методика позволяет находить конфигурации якорей, снижающие средний и максимальный дрейф до приемлемых значений. Результаты подтверждают гипотезу о том, что использование нескольких якорей значительно улучшает точность трекинга по сравнению с одним якорем. Несмотря на теоретический характер, модель обладает практической значимостью для разработки MR-приложений с устойчивой привязкой виртуального контента. Будущее применение модели включает адаптивные системы трекинга, улучшение SLAM-методов и создание инструментов для кроссплатформенной синхронизации. Однако необходима экспериментальная проверка и адаптация для различных устройств и условий эксплуатации.

Список источников

- [1] Scargill T., Premsankar G., Chen J., Gorlatova M. Here to Stay: A Quantitative Comparison of Virtual Object Stability in Markerless Mobile AR. 2nd International Workshop on Cyber-Physical-Human System Design and Implementation (CPHS), 2022, pp. 24–29. <https://doi.org/10.1109/CPHS56133.2022.9804545>
- [2] McGill M., Gugenheimer J., Freeman E. A Quest for Co-Located Mixed Reality: Aligning and Assessing SLAM Tracking for Same-Space Multi-User Experiences. VRST '20: 26th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, 2020, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1145/3385956>
- [3] Zhu F., Sousa M., Sidenmark L., Grossman T. PhoneInVR: An Evaluation of Spatial Anchoring and Interaction Techniques for Smartphone Usage in Virtual Reality. CHI '24: CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2024, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1145/3613904>
- [4] Simonen J., Björk T., Nikula T., Ryyänänen K. Measuring world-locking accuracy in AR/MR head-mounted displays. Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR) II, 2021, 30 p. <https://doi.org/10.1117/12.2584208>
- [5] Zhu H., Luo J., Luo M., Minane J. A Recursive Robust Set-Membership Estimator for WSN-Assisted Moving Targets Tracking with UBB Anchor Location Uncertainty. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, vol. 72, no. 5, pp. 6547–6557. <https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3231598>