

УДК 004.946

Риск - ориентированная модель межсессионной релокализации пространственных якорей для XR - навигации в помещении

Алпатова Марианна Валерьевна^(*)

m.v.alpatova@yandex.ru

SPIN-код: 1458-7868

МИРЭА, Москва, Россия

Аннотация. Межсессионная релокализация пространственных якорей определяет, появятся ли навигационные подсказки в помещении своевременно и в нужном месте. Наибольшую опасность представляют редкие «уверенные» ошибки в точках выбора маршрута, когда система проявляет высокую уверенность, однако направляет пользователя неверно. Предлагается риск-ориентированный подход, совместимый с режимом «черного ящика» SLAM/VIO: используется лишь прикладная телеметрия и записи процессов восстановления. Описывается способ извлечения трех показателей для оптимизации приложений: доли правильных срабатываний, частоты опасных уверенных ошибок и риска больших потерь от неправильных действий.

Ключевые слова: навигация в помещениях, расширенная реальность, пространственные якоря, межсессионная релокализация, уверенная ошибка, хвостовой риск, телеметрия приложения

Risk - oriented model of inter - session relocalization of spatial anchors for XR indoor navigation

Alpatova Marianna Valeryevna^(*)

m.v.alpatova@yandex.ru

SPIN-code: 1458-7868

MIREA, Moscow, Russia

Abstract. Inter-session relocalization of spatial anchors determines whether indoor navigation cues appear in time and at the correct place. The most dangerous failures are rare confident misses at direction-choice nodes, when the system appears confident yet triggers a wrong action. We propose a risk-oriented formulation compatible with a SLAM/VIO black box, relying only on application-level telemetry and attempt logs. We show how logs yield three practical indicators: on-time acceptance, confident-hazardous rate, and tail risk based on an error cost.

Keywords: indoor navigation, extended reality, spatial anchors, inter-session relocalization, confident error, tail risk, application telemetry

Введение. На пользовательском уровне XR-навигация выглядит просто: подсказка должна появиться вовремя и вести туда, куда нужно. Типичный сбой легко распознается, например, подсказка появляется поздно, прыгает или указывает неверно. Обычно это наблюдается после перерыва или повторного посещения помещения, особенно если изменились условия освещения и визуальные элементы обстановки [1, 2].

Ошибка навигации выражается не как погрешность измерения («лишние сантиметры»), а как неправильное действие в определенной точке пространства. Поэтому навигационный процесс рассматривается через точки выбора пути — ситуации, требующие четкого решения (повернуть, выбрать дверь, определить ветвление коридора). Даже единичная ошибка в такой точке способна нанести большой ущерб доверию пользователей, нежели полный отказ системы. Особенно неприятны случаи «уверенной ошибки»: привязка осуществляется быстро и кажется надежной, но выданная рекомендация неверна.

Пространственный якорь служит инструментом закрепления виртуальных ориентиров за физическими объектами внутри помещения, а межсессионная релокализация означает восстановление этих связей в новом сеансе работы. Во многих приложениях внутреннее состояние алгоритмов SLAM/VIO скрыто от разработчиков [3], поэтому предложенный подход намеренно ограничен доступной информацией, которую реально наблюдать в приложении. Такое ограничение обеспечивает универсальность подхода: каждый разработчик способен собирать журнал событий и вычислять необходимые метрики. Затем собранные наблюдения преобразуются в численные характеристики, удобные для настройки пороговых значений и интервалов ожидания в критически важных точках маршрута.

Материалы и методы. Анализ основан на двух типах записей прикладного уровня. Первый журнал регистрирует события восстановления якоря i , то есть каждой отдельной привязки ориентира к физическому объекту. Здесь фиксируется момент начала попытки $t_{i,k}^{start}$ и момент завершения (принятия) $t_{i,k}^{acc}$, означающий, что приложение признало привязку успешной. Если попытка завершилась неудачей (неоднозначностью или сбоем), значение $t_{i,k}^{acc}$ остается пустым. Вместе с этим сохраняются индикаторы уверенности: наилучшая позиция привязки, ее преимущество перед ближайшим конкурентом и успешность прохождения геометрических проверок. Второй журнал отслеживает моменты принятия решений в ключевых точках маршрутов: запись включает момент самого решения, выбранное действие и предельное отклонение (допуск узла).

Оценка своевременности производится относительно заданного интервала ожидания $Time$ (в секундах). Введем событие $Succ_{i,s,j}(Time) \Leftrightarrow t_{i,s,j}^{acc} - t_{i,s,j}^{start} \leq Time$. Следом обозначим через $\mathcal{D}_i = (s, j)$ набор всех попыток восстановления для конкретного якоря i , где s — индекс сессии, $j \in J_{i,s}$ — индекс попытки. Доля успешных принятых привязок тогда определяется формулой (1)

$$\hat{P}_i^{succ}(Time) = \sum_{(s,j) \in \mathcal{D}_i} \mathbf{1}\{Succ_{i,s,j}(Time)\}. \quad (1)$$

Событие $ConfErr_{i,k}$ означает уверенно-опасный случай, когда привязка принята вовремя и выглядит надежной, но по допуску узла выбора приводит к неверному действию. Риск такого события задается как $P_i^{conf}(Time) =$

$= Pr\left(ConfErr_{i,s,j} \wedge Succ_{i,s,j}(Time)\right)$, а эмпирическая оценка по журналам имеет вид (2)

$$\hat{P}_i^{conf}(Time) = \frac{1}{|D|} \sum_{(s,j) \in D_i} \mathbf{1}\{ConfErr_{i,s,j} \wedge Succ_{i,s,j}(Time)\}. \quad (2)$$

Чтобы учитывать редкие крупные промахи, вводится стоимость ошибки C (единая шкала) как представлено в формуле (3):

$$C = e^{plan} + \lambda \cdot |e^{yaw}|, \quad (3)$$

где e^{plan} выражено в метрах, e^{yaw} — в радианах, а коэффициент λ позволяет перевести угловое отклонение в метрический эквивалент. Риск редких значительных промахов оценивается показателями Value at Risk (VaR) и Conditional Value at Risk (CVaR) [4]: значение VaR_α соответствует границе, выше которой лежат худшие $(1 - \alpha)$ успешных попыток, а показатель $CVaR_\alpha$ характеризует среднюю стоимость ошибки именно в этой группе крайних случаев. Отдельно учитывается риск пропуска момента восстановления, отражаемый величиной $P_i^{succ}(Time)$.

Результаты. Разработана воспроизводимая методика, определяющая последовательность шагов «что фиксировать $\rightarrow$ какие события отслеживать $\rightarrow$ какие показатели рассчитывать», не требующая доступа к внутренней структуре SLAM/VIO и не заменяющая саму процедуру проверки результатом анализа набора данных.

Пример для иллюстрации: если при заданном лимите времени $Time = 2$ с из десяти попыток семь завершились успехом, то $Pr^{succ}(2) = 0,7$; если одна попытка закончилась ошибочно-принятым решением, то $P^{conf}(2) = 0,1$ на одну попытку. Если хвостовая стоимость $CVaR$ приближается к величине допуска узла выбора, правила обработки сигнала требуют изменения даже при благоприятной средней ошибке.

Практическое применение заключается в том, что предлагаемые критерии делают настройки контролируемыми: можно увеличить задержку ради повышения доступности, ужесточить требования к восстановлению для уменьшения вероятности уверенно-ошибочных рекомендаций и сравнить разные стратегии управления по уровню хвостового риска. Удобнее всего отображать это в виде трех графиков зависимости от параметра $Time$: уровень доступности, доля уверенно-опасных случаев и величина хвостового риска. По таким графикам ясно видно, какой баланс становится оптимальным для конкретных условий маршрута.

Обсуждение полученных результатов. Предлагаемый подход формирует компромисс между частотой отказа и вероятностью ошибки: увеличение требований к однозначности принимаемых решений увеличивает частоту пропадания подсказок, но уменьшает вероятность уверенно-ошибочного результата. В условиях тестирования ошибки могут оцениваться сравнением с эталонными результатами; в реальных условиях эксплуатации вероятность P^{conf} формируется исходя из фактического поведения системы и признаков

уверенности. Это дает возможность настраивать критерии принятия решений по собранным журналам и управлять риском без идеальной тестовой среды и дополнительного усложнения архитектуры платформы. Практическим следствием является возможность регулярного мониторинга качества привязки якорей и критериев принятия решений на основе свежих данных телеметрии после обновления программного обеспечения или изменений окружающей обстановки [5].

Заключение. Межсессионная релокализация представлена как управляемый риск в точках выбора направления, рассчитываемый на основе прикладных журналов регистрации событий. Предложенные три показателя — своевременность принятия, частота уверенно-ошибочных решений и риск высоких затрат вследствие ошибки — формируют объективную базу для тонкой настройки временных задержек и порогов принятия решений.

Список источников

- [1] Lowry S., Sünderhauf N., Newman P. et al. Visual Place Recognition: A Survey. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, vol. 32 (1), pp. 1–19. <https://doi.org/10.1109/TRO.2015.2496823>
- [2] Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF. *Proc. IEEE ICCV*, 2011, pp. 2564–2571. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126544>
- [3] Cadena C., Carlone L., Carrillo H. et al. Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, vol. 32 (6), pp. 1309–1332. <https://doi.org/10.1109/TRO.2016.2624754>
- [4] Rockafellar R.T., Uryasev S. Optimization of Conditional Value-at-Risk. *Journal of Risk*, 2000, vol. 2 (3), pp. 21–41. <https://doi.org/10.21314/JOR.2000.038>
- [5] Biber P., Duckett T. Dynamic Maps for Long-Term Operation of Mobile Service Robots. *Robotics: Science and Systems*, 2005. <https://doi.org/10.15607/RSS.2005.I.003>