

Н. Б. Хахулина^{1✉}, В. А. Костылев¹, А. И. Плукчи¹

Оценка эффективности гибридной технологии сбора геопространственных данных для получения трехмерных моделей помещений

¹ Воронежский государственный технический университет,
г. Воронеж, Российская Федерация
e-mail: hahulina@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена проблема создания точных и детальных трехмерных моделей внутренних помещений зданий в условиях отсутствия спутниковых навигационных сигналов. Показано, что традиционная тахеометрическая съёмка обеспечивает высокую точность опорных точек, но даёт разреженный каркас, тогда как мобильные SLAM-сканеры быстро формируют плотное облако точек, однако страдают от накопления ошибок дрейфа. Предложена гибридная технология, объединяющая электронный тахеометр Sokkia SET330RK и ручной SLAM-сканер SHARE SLAM S10 с привязкой по светоотражающим маркерам, координаты которых определены тахеометрически. Разработана методика полевых и камеральных работ, апробированная на примере коридора университета длиной 171 м. Выполнена количественная оценка эффективности по трём критериям: точность (снижение среднеквадратической погрешности с 10–20 см до 1–1,5 см), время полевых работ (20–30 мин против 4–6 ч при детальной тахеометрии) и детализация (миллионы точек против десятков). Обоснована пригодность полученной модели для цифровых двойников уровня и систем внутренней навигации

Ключевые слова: 3Д модель, гибридная технология, SLAM-сканер, электронный тахеометр, лазерное сканирование, привязка по маркерам, точность, детализация, внутренняя навигация

N. B. Khakhulina^{1✉}, V. A. Kostylev¹, A. I. Plukchi¹

Efficiency Assessment of a Hybrid Geospatial Data Acquisition Technology for Building Digital Twins

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: hahulina@mail.ru

Abstract. The problem of creating accurate and detailed digital twins of building interiors in the absence of satellite navigation signals is considered. It is shown that traditional tachymetric surveying provides high accuracy of reference points but yields a sparse framework, while mobile SLAM scanners quickly generate dense point clouds but suffer from drift error accumulation. A hybrid technology combining a Sokkia SET330RK electronic total station and a handheld SHARE SLAM S10 scanner with registration via reflective markers (coordinates measured tachymetrically) is proposed. A field and office workflow is developed and tested on a 171-m university corridor. Quantitative efficiency assessment is performed for three criteria: accuracy (RMS error reduction from 10–20 cm to 1–1.5 cm), field time (20–30 min vs. 4–6 h for detailed tachymetry), and detail (millions of points vs. dozens). The resulting model is proved suitable for LOD300–350 digital twins and indoor navigation systems.

Keywords: 3 D model, hybrid technology, SLAM scanner, electronic total station, laser scanning, marker-based registration, accuracy, detail, indoor navigation

Введение

Создание цифровых двойников (ЦД) зданий предъявляет высокие требования к точности и детализации геопространственных данных, особенно для внутренних помещений, где глобальные навигационные спутниковые системы не работают. Классическая геодезическая съёмка методом тахеометрии обеспечивает высокоточные опорные точки, но трудоёмка и даёт разреженный каркас, недостаточный для задач ЦД (фиксация инженерных коммуникаций, архитектурных деталей) [1]. В то же время мобильные системы лазерного сканирования на основе SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) позволяют быстро получать плотные облака точек, однако страдают от накопления ошибок дрейфа при длительном сканировании и требуют внешних опор для привязки [2-5].

Цель работы – оценить эффективность гибридной технологии сбора геопространственных данных (электронный тахеометр + ручной SLAM-сканер с заранее подготовленными маркерами) для построения 3Д модели, основы цифрового двойника здания на примере коридора университета.

Методы и материалы

Оборудование используемое в работе:

- Электронный тахеометр Sokkia SET330RK (точность измерения расстояний с призмой $\pm(2 \text{ мм} + 2 \text{ ppm})$, углов – 5");
- Ручной SLAM-сканер SHARE SLAM S10 (скорость 200 000 точек/с, дальность до 70 м, точность 1–3 см, поле обзора $360^\circ \times 59^\circ$);
- Светоотражающие маркеры алмазного класса 2×2 см с центральной мишенью.

Методика полевых работ.

Тахеометрическая съёмка проводилась с одновременным проложением хода по точкам, отмеченным на полу и координированием марок, закрепленных по стенам коридора, с двумя независимыми измерениями на каждый маркер. Координирование производилось в условной системе координат (ось X – вдоль коридора, Y – перпендикулярно стенам, H – высота). Съёмке подвергались все характерные точки помещения – углы, оконные и дверные проёмы, выступы, в результате была получена трехмерная модель – каркас помещения (рис.1). SLAM-сканирование проводилось методом прохода оператора со сканером по коридору со скоростью 0,5–1,0 м/с, с фиксацией опорных маркеров, с замыканием петли.

Обработка данных проводилась поэтапно. Первичная фильтрация и децимация облака точек проводилась в мобильном приложении, далее в nanoCAD Облака точек производилась идентификация маркеров в облаке и расчёт параметров 7-параметрического преобразования к координатам тахеометра методом наименьших квадратов. Далее был проведен контроль качества по остаточным расхождениям контрольных маркеров.

На последнем этапе была построена каркасная модель по данным электронного тахеометра (рис.1) и скорректированное облако точек по результатам лазерного сканирования (рис.2).

Результаты

Эксперимент выполнен в коридоре университета длиной 171 м.

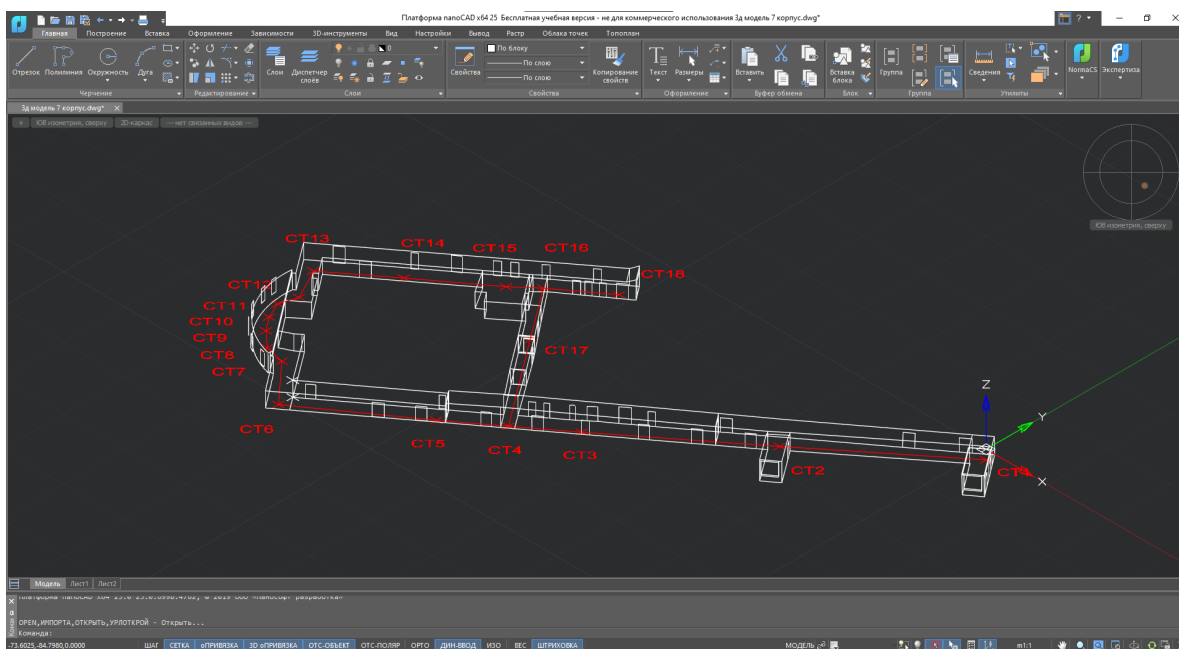


Рис. 1. Модель, построенная по результатам электронной тахеометрии

После привязки облака точек к опорным маркам среднеквадратическая погрешность координат контрольных точек снизилась с 0,2 м (автономный SLAM) до 0,012 м (гибридная технология).

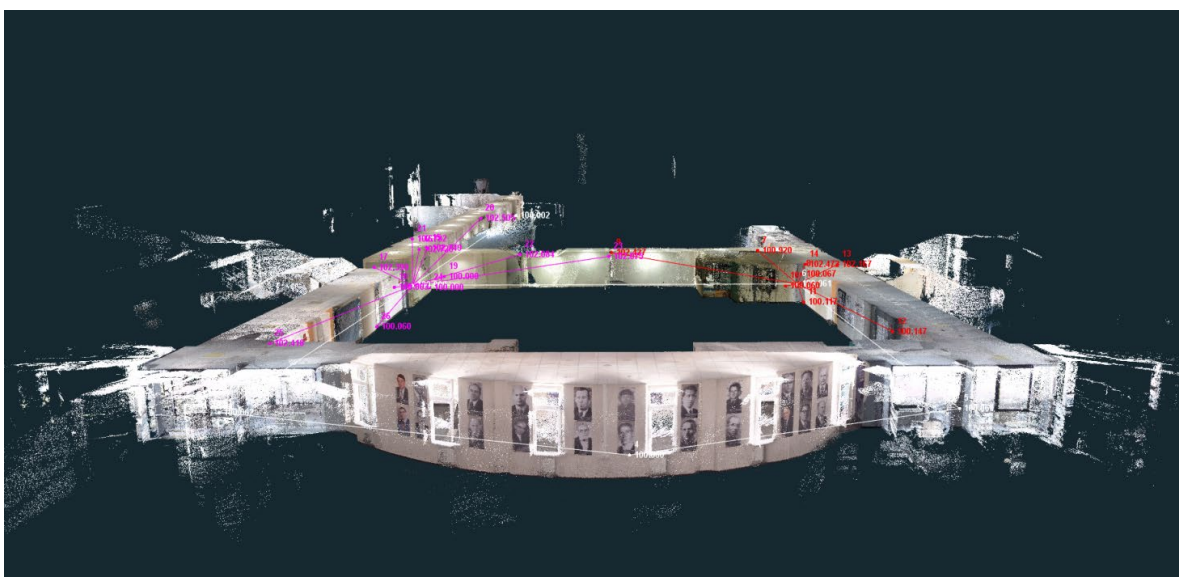


Рис. 2. Модель, построенная по результатам электронной тахеометрии

Расхождения между тахеометрическими и скорректированными SLAM-координатами не превысили 1,5 см.

Полевые работы для коридора 171 м заняли 5 часов 15 мин (тахеометрическая съёмка – 5 часов, SLAM-проход – 15 мин), камеральная обработка – 1 час.

Каркасная модель содержит 247 точек, после SLAM-сканирования получено облако из 12,6 млн точек (плотность ≈ 25000 точек/м²). Это позволяет распознавать объекты размером от 1 см и соответствует уровню LOD350.

Обсуждение

Недостатки тахеометрической съёмки заключаются в трудозатратности и сложности с детализацией – тахеометр фиксирует отдельные точки, а не сплошную поверхность, для получения плотного облака точек потребуется очень большое количество измерений. Также возникают ошибки оператора при выборе режима измерений – призма, марка, стена, что снижает общую точность результата.

Недостаток сканирования SLAM технологией заключается в накоплении ошибок по ходу удаления от начала съёмки.

Полученные результаты подтверждают гипотезу – гибридная технология сочетает высокую точность тахеометра и полноту SLAM-сканера. Применение маркеров, закоординированных с высокой точностью, эффективно устраняет дрейф – ключевую проблему мобильного сканирования.

По сравнению с одним тахеометром выигрыш в детализации и времени – более чем 10000-кратный.

По сравнению с автономным SLAM – повышение точности на порядок (с 0,20 м до 0,014 м).

По сравнению со статическим лазерным сканированием (наземным) – сокращение полевых работ с нескольких часов до 15 мин.

Экономическая эффективность гибридного подхода заключается в прямой экономии трудозатрат по сравнению с детальной тахеометрией и составляет ≈ 69 %. Полученная модель пригодна для создания систем внутренней навигации и эксплуатационных задач BIM.

Заключение

В работе разработана и экспериментально апробирована гибридная технология сбора геопространственных данных для цифровых двойников зданий.

Совместное использование электронного тахеометра и SLAM-сканера с привязкой по маркерам обеспечивает снижение СКП облака точек с 0,20 м до 0,014 м.

Время полевых работ сокращается в 10–20 раз по сравнению с детальной тахеометрической съёмкой.

Детализация модели по данным сканирования достаточна для создания ЦД уровня LOD300–350 и навигационных приложений.

Перспективы дальнейших исследований: автоматизация распознавания маркеров, масштабирование на многоэтажные здания, интеграция с методами машинного обучения для семантической сегментации облаков точек [6-13].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бредихин, К. Н. Тахеометрическая съемка как основа для формирования цифровой модели здания / К. Н. Бредихин, М. Е. Дмитриев, Н. Б. Хахулина // Студент и наука. – 2026. – № 1(36). – С. 137-142..
2. Гладков С. В., Середович А. В. Лазерное сканирование в строительстве и геодезии. – Новосибирск: СГГА, 2011. – 124 с.
3. Ушаков Д. А., Калинин А. А. Обоснование точности SLAM-систем для внутреннего позиционирования // Геодезия и картография. – 2021. – № 6. – С. 25–33.
4. Семешко Е. Ю., Середович А. В. Опыт создания цифровых двойников зданий по данным наземного лазерного сканирования // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – Т. 3. – С. 122–128.
5. Хахулина, Н. Б. Перспективы использования современных технологий для получения геопространственных данных / Н. Б. Хахулина, В. А. Костылев // Теория и практика инновационных технологий в АПК : Материалы национальной научно-практической конференции, Воронеж, 01 апреля – 31 2025 года. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет имени Императора Петра I, 2025. – С. 174-179.
6. Akinci B., Borrmann A. Building Information Modeling: Technology Foundations and Industry Practice. – Cham: Springer, 2018. – 485 p.
7. Leonard J., Durrant-Whyte H. Simultaneous map building and localization for an autonomous mobile robot // Proc. IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems. – 1991. – P. 1442–1447.
8. Bosse M., Zlot R., Flick P. Joint calibration of multiple sensors for 3D mapping // IEEE Trans. on Robotics. – 2012. – Vol. 28, No 3. – P. 635–649.
9. Zlot R., Bosse M. Efficient large-scale three-dimensional mobile mapping // J. of Field Robotics. – 2014. – Vol. 31, No 5. – P. 742–763.
10. GeoSLAM Hub User Manual, Version 3.5. – Nottingham, UK: GeoSLAM, 2022. – 87 p.
11. Sokkia SET330RK Instruction Manual. – Tokyo: Sokkia Co., 2015. – 112 p.
12. Czerniawski T., Nahangi M., Haas C. Automated 3D data collection for digital twin creation of existing buildings // Automation in Construction. – 2020. – Vol. 113. – P. 103115.
13. Совершенствование сбора геопространственных данных для трехмерного моделирования методами наземной фотограмметрии / Е. В. Тимков, Д. С. Лазарев, Д. Ф. Клевцова, Н. Б. Хахулина // Научная опора Воронежской области : Сборник трудов победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. – Воронеж : ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2025. – С. 305-308.

© Н. Б. Хахулина, В. А. Костылев, А. И. Плукчи, 2026