

УДК 528.72

Обзор технологий, методов и алгоритмов фотограмметрии при отсутствии искусственных маркеров

Борисенков Егор Игоревич

ei.borisenkov@yandex.ru

Соколов Александр Павлович

alsokolo@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Фотограмметрия, как техническая наука, решает задачи определения формы, размеров и пространственного положения объектов по их фотоизображениям, полученным с помощью различных съемочных систем. В работе рассмотрены современные подходы к решению задач фотограмметрии в строительной отрасли с акцентом на безмаркерные методы измерения геометрических параметров сложных объектов. Представлена концептуальная постановка задачи, существующие алгоритмы решения, методы построения и методы оценки крупномасштабной безмаркерной фотограмметрии.

Ключевые слова: безмаркерная фотограмметрия, трехмерные модели, контроль геометрических параметров

Введение. Фотограмметрия представляет собой техническую науку, изучающую методы определения метрических характеристик объектов и их пространственного положения по фотоизображениям, полученным с помощью различных съемочных систем. В начале своего развития фотограмметрия применялась преимущественно в геодезии и картографии [1]. Однако за последние десятилетия ситуация значительно изменилась. Вследствие существенного роста производительности компьютерных систем и развития методов обработки фотоизображений, в том числе с применением технологий искусственного интеллекта, фотограмметрия нашла широкое применение в строительной отрасли [2].

Современные строительные технологии и материалы позволяют создавать здания со сложной, уникальной геометрией, что способствует формированию современной и функциональной городской среды. Однако, подобные архитектурные решения значительно усложняют строительные проекты, предъявляя повышенные требования к точности геометрических параметров возводимых строений. В результате возрастает потребность в высокоточном и эффективном контроле геометрических параметров на всех этапах строительства. Традиционные методы геодезического контроля (например, использование тахеометров, нивелиров, ручных измерений) зачастую оказываются трудоемкими, затратными по времени и не всегда позволяют оперативно и полноценно контролировать сложные объекты с большим количеством геометрических элементов. В работе предлагается исследование в области моделей, методов и алгоритмов безмаркерной фотограмметрии для решения указанных задач.

Проведение фотограмметрии объекта в строительной сфере неизбежно требует выполнения работ на потенциально опасной для человека высоте. В данном случае, в целях обеспечения безопасности и автоматизации процесса рекомендуется использовать беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Кроме того, БПЛА также обладает многочисленными преимуществами в области картографирования по сравнению с традиционными технологиями, такими как получение фотоизображений с высоким пространственным разрешением, низкая стоимость эксплуатации, большое количество предоставляемых решений: ортогональные фотоизображения, цифровая модель поверхности (ЦМП), цифровая модель рельефа (ЦМР) и 3D-модели. БПЛА характеризуются способностью достигать зон повышенного риска и недоступных зон для выполнения таких задач, как борьба со стихийными бедствиями и инспекция безопасности на строительных площадках [3]. Другим преимуществом БПЛА является его универсальность в различных областях крупномасштабной фотограмметрии: транспорт; геология; урбанистика; сельское и лесное хозяйство. Например, к области транспорта можно отнести прокладывание дорог в горной местности с ограничением на максимальный угол наклона [4].

В настоящее время активно распространяется фотограмметрия сверхмасштабных объектов или цифровых двойников инфраструктуры. Но для съемки подобных объектов необходимы наземные контрольные точки (НКТ) и цифровые широкоформатные фотограмметрические камеры (ADS40, DMC, UltraCam), требующие существенных экономических затрат [5]. Помимо специального оборудования требуются проприетарные программные пакеты для фотограмметрии (например, 123D Catch; Bundler; VisualSFM; PhotoScan; Vi3Dim), дополнительно повышающие затраты [6]. Для снижения экономических издержек целесообразна разработка собственного программного обеспечения для фотограмметрии, что позволит добиться высокой точности при использовании неспециализированных цифровых камер [7].

Таким образом, актуальность темы исследования определяется необходимостью повышения эффективности, точности и автоматизации контроля геометрических параметров сложных строительных объектов в условиях стремительного развития строительных технологий, цифровизации отрасли и ужесточения требований к качеству, безопасности и экономической эффективности строительства.

Современные подходы к решению задач фотограмметрии. Подход к обработке фотоизображений, основанный на интеграции фотограмметрических алгоритмов и алгоритмов компьютерного зрения, за последние годы активно совершенствовался. Значительный прогресс в обработке фотоизображений привел к появлению полностью автоматизированных методологий, способных обрабатывать большие наборы фотоизображений и создавать 3D-модели. На сегодняшний день к распространенным методологиям относятся: структура из движения (СиД) и многовидовое стерео (МС) [8].

В настоящее время широкое распространение получила методология СиД в связи с минимальными потребностями в начальных данных, к которым

относятся только фотоизображения. При этом методология МС требует дополнительную информацию о положении и направлении камер в моменты съемки. Были предложены различные стратегии СиД: итеративная, иерархическая и глобальная. В настоящее время итеративная СиД является наиболее популярной стратегией для восстановления неупорядоченных коллекций фотоизображений, начиная с небольшой начальной реконструкции, затем расширяясь за счет добавления дополнительных фотоизображений и 3D-точек [8]. Но, несмотря на стремительное развитие технологий, надежность, точность, полнота и масштабируемость остаются ключевыми проблемами итеративной СиД [9].

Стратегия СиД находит положение и направление камеры и геометрию объекта одновременно с помощью алгоритмов компьютерного зрения. Это позволяет создавать точные модели, используя сильно перекрывающиеся фотоизображения с цифровых камер потребительского класса. Кроме того, СиД не требует стабильного положения камеры. Напротив, множественные углы обзора, возникающие в результате перемещений, повышают надежность 3D-реконструкции [10].

Для повышения точности 3D-реконструкций при использовании стратегии СиД применяют два основных подхода: глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС) и глобальная навигационная спутниковая система — кинематика реального времени (ГНСС-КРВ). Оба этих подхода повышают точность реконструкции за счет использования НКТ, позиции которых определяются сигналом со спутника [11].

Концептуальная постановка задачи фотограмметрии. Концептуальная постановка задачи фотограмметрии в формате итеративной стратегии СиД может быть представлена в виде конвейера последовательной обработки с итеративным этапом реконструкции (рис. 1). Как правило, начальный этап конвейера включает выделение и сопоставление признаков, за которыми следует проверка геометрии. Далее полученные данные поступают на вход итеративному этапу реконструкции, где строится приближенная модель объекта, регистрируются новые фотоизображения, триангулируются точки объекта, фильтруются выбросы и уточняется реконструкция с помощью метода «уравнивания пучка» (УП) [9].

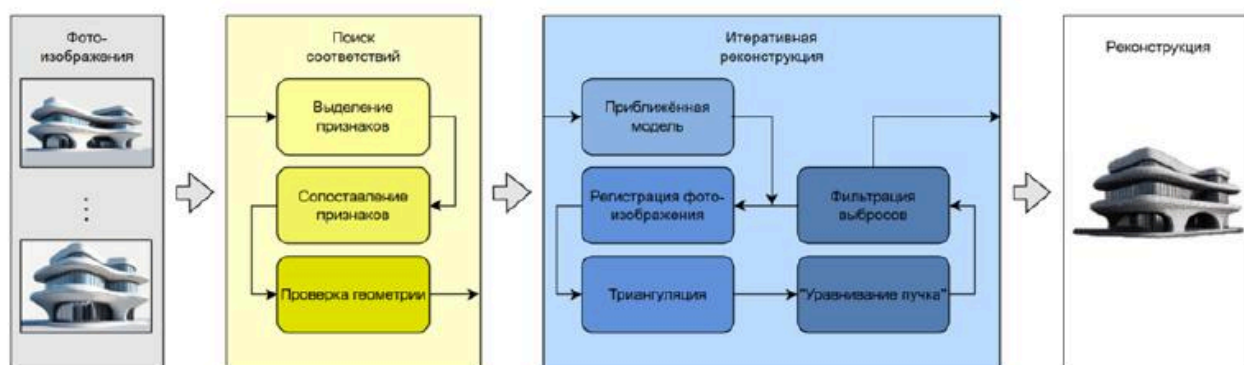


Рис. 1. Последовательность работы итеративной стратегии СиД

Отдельные задачи в концептуальной постановке итеративной стратегии СиД решаются распространенными методами: методы идентификации признаков на фотоизображениях при отсутствии искусственных маркеров; методы сопоставления идентифицированных признаков; методы определения неизвестных параметров УП для построения 3D-реконструкции; методы триангуляции 3D-реконструкций [8].

Идентификация признаков различных типов на фотоизображениях при отсутствии искусственных маркеров производится с использованием методов компьютерного зрения, совмещающих задачи детектора и дескриптора. Задачей детектора является поиск одних и тех же ключевых точек относительно набора изображений, в то время как задачей дескриптора является описание найденных ключевых точек через характеристики окружающих областей. Применение методов к начальному набору фотоизображений позволяет получить набор ключевых признаков в сочетании с описывающим их вектором, используемым для последовательного сопоставления и определения точек привязки [8].

Сопоставление точек привязки производится распространенным методом перебора, в основном использующим расстояние Хэмминга или традиционную стратегию сопоставления с L2-нормой [8].

Определение неизвестных параметров (положения и ракурсы камеры, внутренние параметры камеры и 3D-координаты точек привязки) производится с помощью метода УП и сопоставленных точек привязки на фотоизображениях. В фотограмметрическом сообществе наиболее распространенным решением УП является итеративный метод Неттона (т. е. метод Гаусса-Маркова), тогда как в сообществе компьютерного зрения используются методы Гаусса-Ньютона или Левенберга-Марквардта [12].

Триангуляция плотного облака точек объекта на фотоизображении производится после определения положений и направлений камера и восстановления 3D-координат точек привязки. При этом применяется алгоритм сопоставления на основе пикселей для получения текстурированных облаков точек [8].

Алгоритмы безмаркерной фотограмметрии. Ключевыми этапами конвейера безмаркерной фотограмметрии являются: обнаружение признаков; сопоставление признаков; восстановление геометрии объекта; триангуляция плотного облака точек.

Этап обнаружения признаков нацелен на работу алгоритмов по анализу каждого фотоизображения в поиске точек, которые можно надежно идентифицировать даже при изменении ракурса, освещения или масштаба. К классическим алгоритмам относятся: SIFT, SURF, FAST, BRIEF, ORB, LDAHаш, MSD. Среди наиболее популярных алгоритмов, возможно провести сравнение между SIFT и SURF. При сравнении алгоритмов можно выделить, что SIFT отличается большей относительной точностью обнаружения ключевых признаков, в то время как SURF отличается большим относительным быстроедействием [13, 14].

Этап сопоставления признаков направлен на работу алгоритмов по нахождению одних и тех же признаков на разных фотографиях. К распространенным методам данного этапа относятся Brute-Force Matcher и FLANN. Метод Brute-Force Matcher попарно сравнивает каждый признак на одном фотоизображении со всеми признаками на другом, в то время как FLANN использует древовидные структуры данных для быстрого приближенного поиска.

Этап восстановления геометрии объекта ориентирован на построение 3D-модели и восстановление позиций камеры на основе информации о совпадающих точках. В настоящее время широко применяется метод Гаусса-Ньютона для решения УП благодаря своей простоте реализации. При этом метод Левенберга-Марквардта для решения УП активно используется в связи с эффективной стратегией демпфирования, обеспечивающей быструю сходимость из широкого диапазона начальных приближений [8].

Методы оценки безмаркерной фотограмметрии. Методы оценки безмаркерной фотограмметрии можно разделить на две группы: внутренние методы оценки; внешние методы оценки.

Внутренние методы оценки используют только фотоизображения и реконструкцию объекта. Данные методы наиболее распространены в коммерческом ПО. К критериям оценки фотоизображений можно отнести: количество обнаруженных точек привязки; проекционная ошибка; неопределенность координат точек. К критериям оценки реконструкции объекта можно отнести: неопределенность облака точек; количество положений камеры, в которых видна точка; статистика по разреженному и плотному облаку.

Внешние методы оценки точности требуют наличия независимых данных с известной точностью, которые не использовались в процессе построения модели. Данные методы требуют установления нескольких НКТ с замеренными пространственными координатами. В подобных методах распространенным критерием оценки является среднеквадратичная ошибка в НКТ, рассчитываемая из точных значений пространственных координат и пространственных координат, полученных с помощью фотограмметрии [15]. Так же критериями оценки являются: ошибка смещения, показывающая систематическое отклонение модели; максимальная ошибка, показывающая наибольшее отклонение.

Заключение. В перспективе безмаркерная фотограмметрия станет неотъемлемой частью строительного контроля, обеспечивая высокую точность измерений, оперативность получения данных и экономическую эффективность процессов мониторинга геометрических параметров зданий. Автоматизация процессов станет ключевым направлением развития технологии и позволит ускорить обработку данных, повысить точность измерений, минимизировать человеческий фактор, автоматизировать анализ результатов. Расширение сферы применения позволит реконструировать исторических зданий, отслеживать деформации конструкций, контролировать соответствие проекту, документировать строительные работы, оценивать объемы выполненных работ.

Литература

- [1] Jacobsen K. Photogrammetry and geoinformation trends for large scale mapping. *Map Middle East*, 2005.
- [2] Li Q., Huang H., Yu W., Jiang S. Optimized Views Photogrammetry: Precision Analysis and a Large-Scale Case Study in Qingdao. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 2023, vol. 16, pp. 1144–1159.
- [3] Long N., Ha L., Tong S., Huong K. UAV photogrammetry-based for open pit coal mine large scale mapping, case studies in CAM PHA city. *Vietnam, sustainable development of mountain territories*, 2020, vol. 12, № 4 (46), pp. 501–509.
- [4] Sammartano G., Spanò A. DEM Generation based on UAV Photogrammetry Data in Critical Areas. *Proceedings of the 2nd International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*, 2016, pp. 92–98.
- [5] Shukina O., Muborakov Kh., Ruziev A., Yakubov G., Ergashev M. Using Digital Photogrammetry to Create Large-Scale Topographic Maps and Plans in Uzbekistan. *International Journal of Geoinformatics*, 2011, vol. 18, no. 1, pp. 37–42.
- [6] Douglass M., Chodoronek M., Lin S. The Application of 3D Photogrammetry for In Field Documentation of Archaeological Features Advances in Archaeological Practice. *A Journal of the Society for American Archaeology*, 2015, vol. 3 (2), pp. 136–152.
- [7] Mendikute A., Yagüe-Fabra J., Zatarain M., Bertelsen A., Leizea I. Self-Calibrated In-Process Photogrammetry for Large Raw Part Measurement and Alignment before Machining. *Sensors*, 2017, vol. 9, no. 17 (9). <https://doi.org/10.3390/s17092066>
- [8] Remondino F., Nocerino E., Toschi I., Menna F. A critical review of automated photogrammetric processing of large datasets. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017, XLII-2/W5.
- [9] Schonberger J., Frahm J. Structure-from-Motion Revisited. *CVPR*, 2016, pp. 4104–4113. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.445>
- [10] Latte N., Gaucher P., Bolyn C., Lejeune P., Michez A. Upscaling UAS Paradigm to UltraLight Aircrafts: A Low-Cost Multi-Sensors System for Large Scale Aerial Photogrammetry. *Remote Sensing*, 2020, pp. 1265–1281. <https://doi.org/10.3390/rs12081265>
- [11] Kim H., Hyun C., Park H., Cha J. Image Mapping Accuracy Evaluation Using UAV with Standalone, Differential (RTK), and PPP GNSS Positioning Techniques in an Abandoned Mine Site. *Sensors*, 2023, pp. 5858–5873. <https://doi.org/10.3390/s23135858>
- [12] Chen Y., Zhang G., Li J., Deng L. An improved Perspective-n-Point Algorithm for Bundle Adjustment. *World Scientific Research Journal*, 2021, vol. 7, no. 6, pp. 135–144.
- [13] Lingua A., Marenchino D., Nex F. Performance Analysis of the SIFT Operator for Automatic Feature Extraction and Matching in Photogrammetric Applications. *Sensors*, 2009, vol. 9, № 5, pp. 3745–3766.
- [14] Chen S.J., Zheng S.Z., Xu Z.G., Guo C.C., Ma X.L. An improved image matching method based on surf algorithm. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2018, vol. XLII-3, pp. 179–184, 2018.
- [15] Ahmad M., Ahmad A., Kanniah K. Large scale topographic mapping based on unmanned aerial vehicle and aerial photogrammetric technique. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 169. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/169/1/012077>

Overview of photogrammetry technologies, methods, and algorithms in the absence of artificial markers

Borisenkov Egor Igorevich

ei.borisenkov@yandex.ru

Sokolov Alexander Pavlovich

alsokolo@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Photogrammetry, as a technical science, solves the problems of determining the shape, size and spatial position of objects from their photographic images obtained using various shooting systems. The paper considers modern approaches to solving photogrammetry problems in the construction industry, with an emphasis on marker-free methods for measuring geometric parameters of complex objects. A conceptual formulation of the problem, existing algorithms for solving it, construction methods, and evaluation methods for large-scale marker-free photogrammetry are presented.

Keywords: *marker-free photogrammetry, three-dimensional models, control of geometric parameters*