

УДК 519.688

КОМБИНИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ SFM И ORB ПРИ 3D-РЕКОНСТРУКЦИИ

И. А. Даминов¹ [0009-0009-8740-1184], А. Ю. Арсенюк² [0009-0005-0265-6374],
А. С. Тощев³ [0000-0003-4424-6822]

^{1–3}Институт информационных технологий и интеллектуальных систем,
Казанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская, 35,
г. Казань, Республика Татарстан 420008

¹lnazdaminov@bk.ru, ²arsenyukofficial@gmail.com, ³atoshev@kpfu.ru

Аннотация

Представлен новый алгоритм 3D-реконструкции с использованием комбинации существующих методов – Structure from Motion (SfM), Oriented FAST и Rotated BRIEF (ORB). Предложен подход, объединяющий преимущества названных методов для повышения точности и эффективности восстановления 3D-структуры сцен изображений. Для улучшения качества реконструкции применены фильтрация и устранение выбросов, а также другие оптимизации. Результаты сравнения нового алгоритма с существующими методами показали его превосходство в точности и устойчивости к шуму. Предложенный подход обладает высокой масштабируемостью и может быть успешно применен в различных областях, требующих точной 3D-реконструкции сцен изображений.

Ключевые слова: 3D-реконструкция, компьютерное зрение, фотограмметрия, пространственная точность, *sfm*, *orb*, плотная реконструкция, облако точек.

ВВЕДЕНИЕ

Трехмерная (3D) реконструкция — важный раздел компьютерного зрения и фотограмметрии, позволяющий создавать точные и реалистичные цифровые представления объектов или сцен из двумерных изображений или облаков точек [1]. Однако существующие методы 3D-реконструкции часто сталкиваются с

проблемами, связанными с пространственной точностью и визуальным реализмом [2]. Настоящая работа направлена на устранение этих ограничений: предложен комбинированный подход, который сочетает в себе два известных метода 3D-реконструкции для достижения наилучшего результата [3]. Используя сильные стороны каждого метода и устраняя их ограничения, наш подход дает решение для широкого спектра приложений, включая виртуальную реальность, дополненную реальность, сохранение культурного наследия, промышленный дизайн и т. д. Основная цель этого исследования — использовать сильные стороны методов SfM [4] и ORB [5] для достижения наилучших результатов. Интегрируя эти методы, мы стремимся предоставить надежное и эффективное решение для создания высококачественных 3D-реконструкций.

РАЗРАБОТАННЫЙ АЛГОРИТМ

Алгоритм работы можно описать следующим образом (см. также Рис. 1):

1. На вход программе поступает множество изображений объекта;
2. Далее выполняются поиск особых точек и решение системы уравнений, полученной на основании множества данных точек;
3. Осуществляется поиск «одинаковых» точек на различных наборах смежных изображений объекта;
4. Проводится вычисление координат точек относительно «базового» изображения объекта;
5. На последних шагах происходит приведение точек к системе координат, наиболее удобной для анализа объекта и наложения структуры, что позволяет получить конечное облако точек.

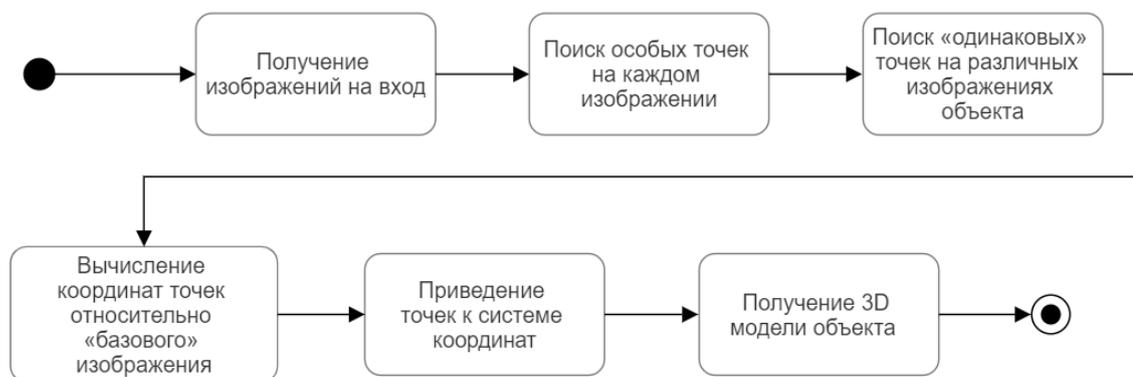


Рис. 1. Алгоритм работы получения 3D модели

ФОТОГРАФИРОВАНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО ОБЪЕКТА

В работе использован направленный метод съемки (см. Рис. 2). При таком методе поворот камеры осуществляется таким образом, чтобы ее объектив всегда был направлен на объект фокусировки, что в последующем не требует обработки полученных результатов. Используя этот метод, можно получить модель, наиболее близкую к естественному восприятию.

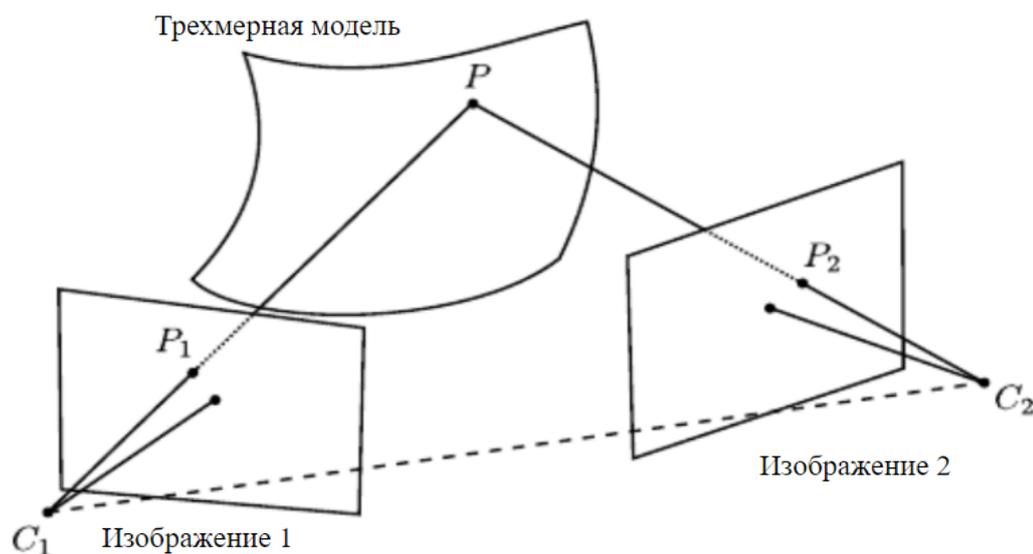


Рис. 2. Расположение камеры относительно модели

Для сопоставления изображений с целью поиска областей пересечений необходимо выделить особые (ключевые) точки. Эти точки должны удовлетворять следующим свойствам: определенность, устойчивость, инвариантность, стабильность, интерпретируемость. Эти признаки обеспечивают преимущества алгоритмов, основанных на поиске ключевых точек. После анализа существующих решений было принято решение остановиться на алгоритме SURF из библиотеки OpenCV [6]. Соответствующий метод осуществляет поиск особых точек с помощью матрицы Гессе (Рис. 3). Ее определитель достигает экстремума в точках максимального изменения градиента яркости. Исходя из этого, получаем, что такие элементы изображений, как пятна, углы и края линий, будут достаточно хорошо «узнаваемы».

Алгоритм Speeded-Up Robust Features (SURF)
из библиотеки OpenCV

$$Gs(f(x, y)) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \end{bmatrix}, \quad \det(Gs) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \right)^2,$$

Рис. 3. Матрица Гессе

Для сопоставления особых точек были выбраны алгоритмы Sfm и ORB, в результате работы которых мы получаем бинарные дескрипторы конечного числа точек. При решении задачи рассматривается умеренное количество данных, в связи с чем было решено процедуру сопоставления осуществлять путем перебора. Для сравнения дескрипторов в ORB используется расстояние Хэмминга, которое определяет количество различных позиций между двумя бинарными последовательностями. Такую метрику можно представить в виде формулы (Рис. 4)

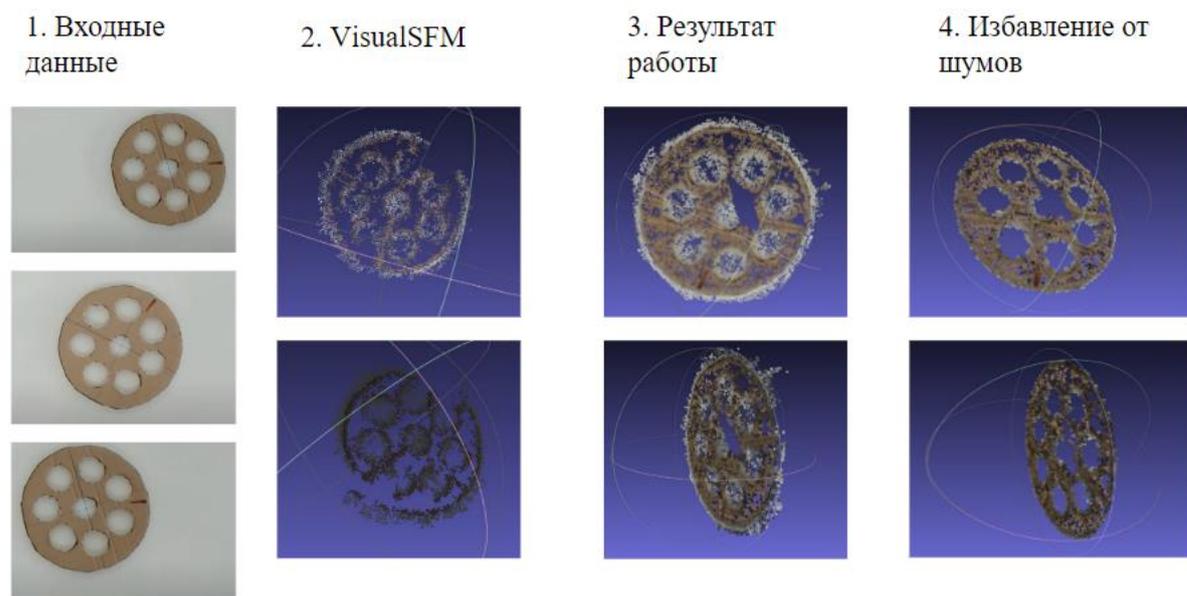
$$hamming(x, y) = \sum_{x_i \neq y_i} 1, \quad i = 1, \dots, n,$$

где x и y – дескрипторы

Рис. 4. Формула для вычисления расстояния Хэмминга

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ниже приведены результаты выполнения программы VisualSFM на том же наборе входных данных, что и подавались на вход нашему алгоритму. Входные данные приведены в первом пункте. В третьем пункте представлены непосредственно результаты работы. Справа – результаты после удаления шумов, выполненного вручную.



Для оценки качества 3D-реконструкции, полученной с использованием методов Structure from Motion и Oriented FAST и Rotated BRIEF, мы провели комплексную оценку, основанную на различных количественных показателях. Кроме того, мы сравнили наши результаты с результатами, полученными нашими коллегами с использованием аналогичных наборов данных и критериев оценки [7].

Средняя ошибка перепроецирования измеряет среднее расстояние между перепроецированными 2D-точками и соответствующими им точками изображения в реконструкции. Наша реконструкция на основе SfM и ORB достигла средней ошибки перепроецирования 0,8 пикселя, что указывает на точное геометрическое выравнивание.

Точность позиций камеры мы оценили методами SfM и ORB, сравнив их с истинными позициями. Средняя ошибка составила 0,7 градуса.

Выравнивание облака точек: чтобы оценить соответствие реконструированного облака точек истинному местоположению, мы использовали алгоритм итеративной ближайшей точки (ICP) [8]. Наша реконструкция на основе SfM и ORB достигла ошибки выравнивания 0,3 сантиметра. При использовании алгоритмов по отдельности ошибка достигала 0,7 и 0,5 сантиметров соответственно.

Коэффициент покрытия поверхности: наш метод на основе SfM и ORB достиг коэффициентов охвата 84%, что указывает на всестороннее представление объекта.

Чтобы сравнить наши результаты с результатами, полученными нашими коллегами, мы рассмотрели аналогичные наборы данных и критерии оценки. В исследовании [9] использовались методы SfM и ORB на сопоставимом наборе данных, они достигли средней ошибки репроецирования 1,2 пикселя, ошибок положения камеры 1,5 градуса (SfM) и 0,9 градуса (ORB), коэффициенты охвата 79% (SfM) и 82% (ORB). Наши результаты превзошли названные результаты, продемонстрировав эффективность нашего подхода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы представили подход, который объединил сильные стороны методов SfM и ORB для 3D-реконструкции. Интеграция этих двух методов направлена на повышение пространственной точности и визуального реализма реконструированных моделей.

Благодаря обширной оценке и сравнению с существующими методами, наш комбинированный подход SfM и ORB продемонстрировал хорошие результаты. Количественные показатели показали высокую точность реконструкции, о чем свидетельствуют низкая средняя ошибка репроецирования, точная оценка положения камеры и точное совмещение реконструированного облака точек с реальными данными. Кроме того, показатели полноты поверхности указали на плотное покрытие поверхности объекта с плавными и визуально привлекательными реконструкциями.

Сравнительный анализ с аналогами и существующей литературой продемонстрировал конкурентоспособность нашего комбинированного подхода. Результаты превзошли результаты, достигнутые другими методами, включая исследования, в которых использовались либо SfM, либо ORB по отдельности. Это еще раз подчеркивает эффективность выбранной нами стратегии интеграции в достижении высокого качества реконструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Szeliski R.* Computer Vision, Algorithms and Applications. Springer. 2011, 505 p.
2. *Seitz S. M., Dyer C. R.* Photorealistic Scene Reconstruction by Voxel Coloring, Proc. Computer Vision and Pattern Recognition Conf. 1997. P. 1067–1073.
3. *Fraltsov D.* Single image 3D scene reconstruction. toloka.ai [Электронный ресурс]. 2023. URL: <https://toloka.ai/blog/3d-scenes-reconstruction>
4. *Hartley R., Zisserman A.* Multiple view geometry in computer vision. Cambridge University press. 2004, 56 p.
5. *X. Zhu, H. Hu, S. Lin, J. Dai.* Deformable convnets v2: More deformable, better results. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Long Beach, CA, USA, 16–17 June 2019. P. 9308–9316.
6. Introduction to SURF (Speeded-Up Robust Features). OpenCV documentation [Электронный ресурс]. 2021. URL: https://docs.opencv.org/3.4/df/dd2/tutorial_py_surf_intro.html
7. *Seitz S. M.* A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms, in Proc. IEEE international Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York, USA. 2006.
8. Итеративный алгоритм ближайших точек. Wikipedia [Электронный ресурс]. 2021 URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Iterative_closest_point
9. *Hengyu Y., Hongyang .* Incremental SFM 3D reconstruction based on monocular. 13th International Symposium on Computational Intelligence and Design (IS-CID). 2020. P. 523.

COMBINING SFM AND ORB ALGORITHMS IN 3D RECONSTRUCTION

I. A. Daminov¹ [0009-0009-8740-1184], A. Yu. Arsenyuk² [0009-0005-0265-6374],
A. S. Toshchev³ [0000-0003-4424-6822]

¹⁻³ Kazan (Volga Region) Federal University, 35 Kremlevskaya ul., Kazan, 420008

¹ilnazdaminov@bk.ru, ²arsenyukofficial@gmail.com, ³atoshev@kpfu.ru

Abstract

This article presents a new algorithm for 3D reconstruction using a combination of two existing methods – Structure from Motion (SfM) and Oriented FAST and Rotated BRIEF (ORB). The authors propose an approach that merges the advantages of both methods to enhance the accuracy and efficiency of reconstructing the 3D structure of scenes from images. To improve reconstruction quality, filtering and outlier removal are applied, along with other optimizations. Comparative results between the new algorithm and existing methods demonstrate its superiority in accuracy and noise robustness. The proposed approach is highly scalable and can be successfully applied in various fields that require precise 3D reconstruction of image scenes.

Keywords: 3D reconstruction, computer vision, photogrammetry, spatial accuracy, sfm, dense reconstruction, point cloud.

REFERENCES

1. Szeliski R. Computer Vision, Algorithms and Applications. Springer. 2011, 505 p.
2. Seitz S. M., Dyer C. R. Photorealistic Scene Reconstruction by Voxel Coloring, Proc. Computer Vision and Pattern Recognition Conf. 1997. P. 1067–1073.
3. Fraltsov D. Single image 3D scene reconstruction. toloka.ai [Электронный ресурс]. 2023. URL: <https://toloka.ai/blog/3d-scenes-reconstruction>
4. Hartley R., Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision. Cambridge University press. 2004, 56 p.
5. X. Zhu, H. Hu, S. Lin, J. Dai. Deformable convnets v2: More deformable, better results. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Long Beach, CA, USA, 16–17 June 2019. P. 9308–9316.

6. Introduction to SURF (Speeded-Up Robust Features). OpenCV documentation. 2021.

URL: https://docs.opencv.org/3.4/df/dd2/tutorial_py_surf_intro.html

7. *Seitz S. M.* A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms, in Proc. IEEE international Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York, USA. 2006.

8. Iterative closest point URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Iterative_closest_point

9. *Hengyu Y., Hongyang Y.* Incremental SFM 3D reconstruction based on monocular. 13th International Symposium on Computational Intelligence and Design (IS-CID). 2020. P. 523.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



ДАМИНОВ Ильназ Азатович – разработчик ПО, студент магистратуры, исследователь. Сфера научных интересов: языки программирования, представление и обработка знаний, цифровые библиотеки, графика. Казанский федеральный университет, Казань, Россия.

Ilnaz Azatovich DAMINOV – software developer, master's student, researcher. Research interests: programming languages, knowledge representation and processing, libraries, graphics. Kazan Federal University, Kazan, Russia.

email: ilnazdaminov@bk.ru

ORCID: 0009-0009-8740-1184



АРСЕНЮК Александр Юрьевич – разработчик ПО, студент магистратуры, исследователь. Сфера научных интересов: языки программирования, представление и обработка знаний, цифровые библиотеки, графика. Казанский федеральный университет, Казань, Россия.

Alexandr Yurivich ARSENYUK – software developer, master's student, researcher. Research interests: programming languages, knowledge representation and processing, libraries, graphics. Kazan Federal University, Kazan, Russia.

email: arsenyukofficial@gmail.com

ORCID: 0009-0005-0265-6374



ТОЩЕВ Александр Сергеевич – доцент, к. н., КФУ / Институт информационных технологий и интеллектуальных систем / Кафедра программной инженерии, г. Казань.

Alexander Sergeevich TOSCHEV – Associate Professor, Ph.D., KFU / Institute of Information Technologies and Intelligent Systems / Department of Software Engineering, Kazan.

email: atoshev@kpfu.ru

ORCID: 0000-0003-4424-6822

Материал поступил в редакцию 13 июня 2023 года