

Исследование алгоритмов фильтрации облака точек для помехоустойчивой реконструкции поверхности

Е.С. Глумова¹, М.А. Серова¹

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, 603024, Россия

Аннотация

В данной статье рассматриваются методы обработки облака точек для помехоустойчивой трехмерной реконструкции в контексте восстановления поверхности при ограниченных вычислительных мощностях. Приведены основные причины возникновения ошибок в облаке точек, а также методы их устранения. К ошибкам в облаке точек относят шумы, полученные во время сканирования объекта, избыточность облака точек, а также визуальную неполноту. В области обработки облаков точек алгоритмы фильтрации облака точек являются ключевыми инструментами для улучшения точности и снижения шума в получаемых данных. Рассмотрен итеративный алгоритм фильтрации ошибочных точек, использующий среднее значение координат соседних точек, а также алгоритм сегментации облака точек на основе обнаружения связных областей. Было установлено, что комбинирование этих алгоритмов фильтрации может привести к лучшим результатам по сравнению с их использованием по отдельности.

Ключевые слова

Трехмерная реконструкция, облако точек, фильтрация, полигональная модель, SOR, Structure from Motion, Screened Poisson Surface Reconstruction.

Investigation of Point Cloud Filtering Algorithms for Robust Surface Reconstruction

E.S. Glumova¹, M.A. Serova¹

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, 603024, Russia

Abstract

This paper considers methods of point cloud processing for noise-resistant 3D reconstruction in the context of surface reconstruction under limited computational power. The main causes of point cloud errors and methods of their elimination are presented. The errors in point cloud include noise obtained during object scanning, point cloud redundancy, and visual incompleteness. In the area of point cloud processing, point cloud filtering algorithms are key tools for improving accuracy and reducing noise in the resulting data. An iterative algorithm for filtering out erroneous points using the mean value of neighbouring points' coordinates, as well as a point cloud segmentation algorithm based on the detection of connected regions are considered.

It was found that combining several filtering algorithms can lead to better results compared to using separate algorithms.

Keywords

Three-dimensional reconstruction, point cloud, filtering, polygonal model, SOR, Structure from Motion, Screened Poisson Surface Reconstruction.

ГрафиКон 2023: 33-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-21 сентября 2023 г., Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Россия

EMAIL: glumova.ek@yandex.ru (Е.С. Глумова), graumay@nntu.ru (М.А. Серова)
ORCID: 0000-0001-9094-7668 (Е.С. Глумова); 0000-0002-9612-5865 (М.А. Серова)



© 2023 Copyright for this paper by its authors.

Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

1. Введение

Трехмерная реконструкция с помощью метода Structure from Motion (SfM) [1] позволяет из двухмерных изображений восстанавливать поверхность с высокой степенью детализации. Такой подход лежит в основе построения трехмерных моделей, которые используются в промышленном дизайне [2-3], системах мониторинга промышленных объектов [4-5], в геоинформационных системах [6-7], в игровой индустрии [8] и кино [9], а также для сохранения объектов культурного наследия [10].

Современные исследования [11-12] показывают, что с техническим развитием аппаратных средств съемки открывается возможность освоить технологию трехмерной реконструкции без привлечения квалифицированных специалистов и дорогостоящего оборудования. Интерес к фотограмметрии, как к бюджетному методу получения трехмерной модели физического объекта, также связан с развитием технологий 3D-печати и способами обмена 3D-моделями между различными устройствами (например, с помощью WebGL).

Однако большинство решений по-прежнему требуют значительных вычислительных и временных затрат для получения качественной модели. Эти методы генерируют облако точек или трехмерный цветовой объем, что обычно считается недостаточным для конечного продукта [11, 13].

Также результаты трехмерной реконструкции могут содержать ряд ошибок, например, шум и визуальную неполноту [14]. На возникновение ошибок влияет несколько факторов:

- неточная калибровка камер или датчиков, используемых в процессе реконструкции;
- различные алгоритмы сопоставления особых точек (в разных источниках — features/characteristic points/local feature points/interest point/локальные особенности);
- шум в исходных данных или наличие выбросов;
- недостаточное количество данных или неполный охват сцены;
- различные алгоритмы, используемые для 3D-реконструкции.

Таким образом, в области фотограмметрии задача помехоустойчивой реконструкции поверхности остается актуальной, особенно в контексте возможности детального восстановления на компьютерах с ограниченными вычислительными мощностями.

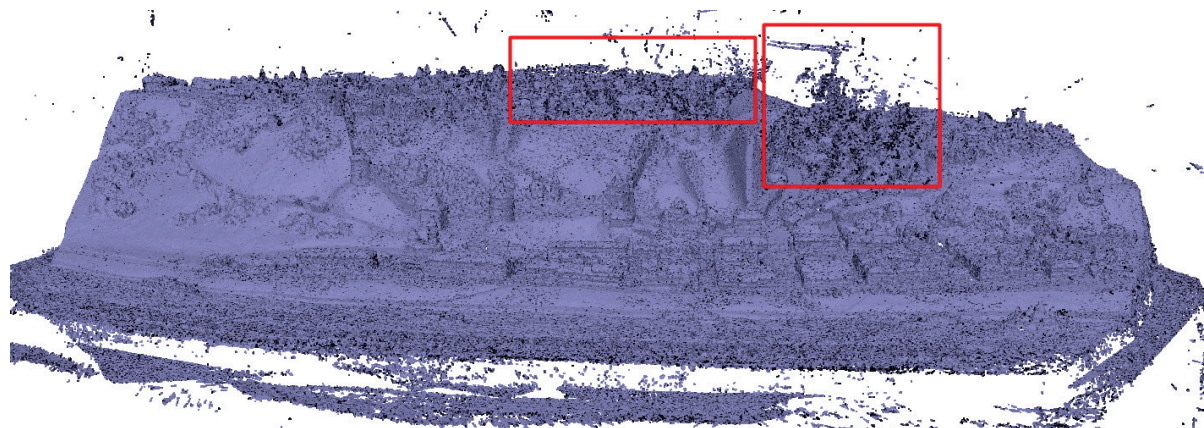
2. Ошибки в построении облака точек

Облако точек является источником входных данных для таких методов реконструкции, как триангуляция Делоне [15], Poisson Surface Reconstruction [16] и его модификация Screened Poisson Surface Reconstruction [17] и др. Но без предварительной обработки облака точек эти методы не дают качественного результата, поскольку координаты полученных точек соответствуют исходному объекту с некоторой погрешностью, а также в облаке неминуемо присутствуют ложные точки и выбросы [18].

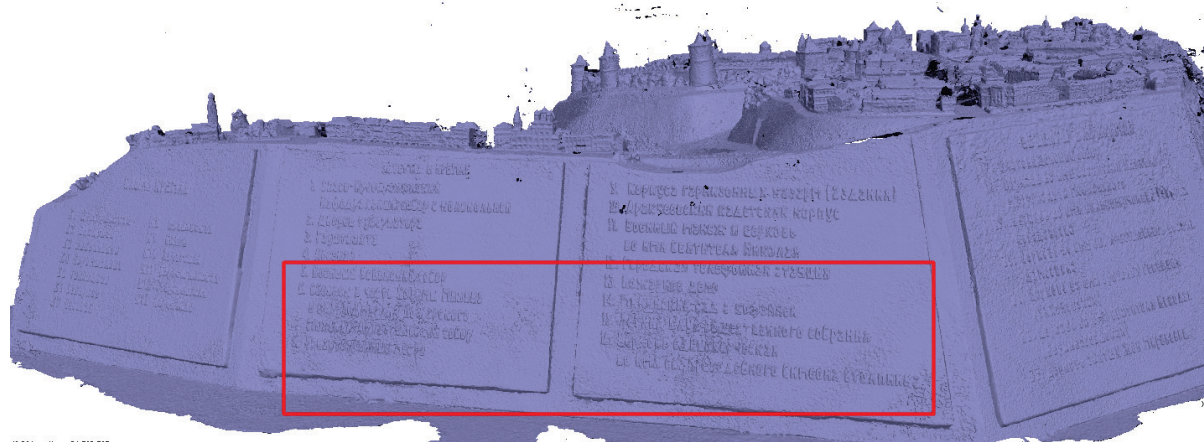
Основные причины появления шумов в облаке точек [19]:

- физические ограничения камеры приводят к появлению шума. Шум возникает, в основном, из-за ограничений дискретизации и артефактов движения камеры либо объекта;
- множественные отражения объекта создают ложные точки в облаке;
- недостаточное количество точек может быть получено из-за освещения, отражений, перекрытий объектов или ограниченного разрешения камеры.

На рисунке 1 приведен результат построения полигональной модели на основе шумного облака точек. Наблюдается потеря деталей («дыры» в полигональной сетке), искажение формы объектов (геометрия зданий), а также неоднородность плотного облака точек, что затрудняет процесс восстановления поверхности.



Облако точек на основе 210 снимков (построено с помощью Agisoft Metashape Professional)



49,301 vertices: 31,763,505

Полигональная модель на основе шумного облака точек (построено с помощью Agisoft Metashape Professional)

Рисунок 1 – Шумное облако точек и результат реконструкции поверхности

Для снижения влияния выбросов используются различные алгоритмы фильтрации выбросов, такие как фильтры удаления шума или статистические методы анализа данных. Эти методы помогают идентифицировать и удалить выбросы, улучшая качество восстановленной трехмерной модели.

3. Методы обработки облака точек

Существует множество методов обработки облака точек, которые позволяют исключить ошибочные точки в облаке и, таким образом, повысить качество восстанавливаемой модели.

К таким методам относятся [20]:

- 1) фильтрация облака точек: методы фильтрации используются для удаления шума из облака точек, что может улучшить качество данных и уменьшить объем информации для дальнейшей обработки. Некоторые методы фильтрации включают в себя статистическую фильтрацию, фильтрацию на основе геометрических ограничений и фильтрацию на основе сегментации;
- 2) регистрация облака точек: методы регистрации используются для сопоставления двух или более облаков точек и нахождения правильного соответствия между ними;
- 3) сегментация облака точек: методы сегментации используются для разбиения облака точек на более мелкие фрагменты, которые можно анализировать независимо друг от друга;
- 4) извлечение признаков из облака точек: методы извлечения признаков используются для выделения характеристик облака точек, которые могут быть использованы для обработки данных и принятия решений. Некоторые методы извлечения признаков включают в себя вычисление нормалей поверхности, извлечение гистограмм ориентированных градиентов;
- 5) классификация облака точек: методы классификации используются для определения типов объектов, которые представлены в облаке точек.

Для задачи помехоустойчивой реконструкции на компьютере с ограниченными вычислительными мощностями было принято решение использовать *метод фильтрации облака точек с элементами сегментации*.

4. Обработка облака точек

Алгоритм обработки облака точек выглядит следующим образом (рисунок 2).

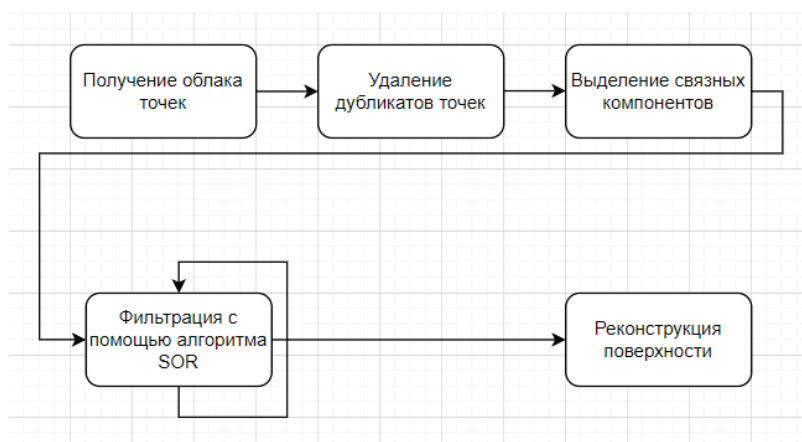


Рисунок 2 – Алгоритм обработки облака точек

Получение облака точек производится с помощью систем лазерного сканирования или фотограмметрической съемки. Важно отметить, что облака точек, полученные с помощью лазерного сканирования, обладают высокой точностью и плотностью (до 3 мм на 1 км), что накладывает отпечаток на избыточность и объем данных. Облака точек, полученные с помощью технологии фотограмметрии, менее плотные (до 1 см на 1 км) и более шумные. Выбор источника зависит от задачи применения облака точек.

В контексте возможности детального восстановления поверхности на компьютерах с ограниченными вычислительными мощностями получение облака точек может производиться в открытых программных продуктах фотограмметрической обработки, с избытком представленных на рынке (например, Regard 3D, COLMAP и др.). Для задач дальнейшей обработки облаков точек подойдут такие программные решения, как CloudCompare и MeshLab.

Удаление дубликатов точек производится относительно минимального расстояния между точками облака. Для анализа оптимального значения необходимо сначала построить тепловую карту плотности облака точек (рисунок 3).

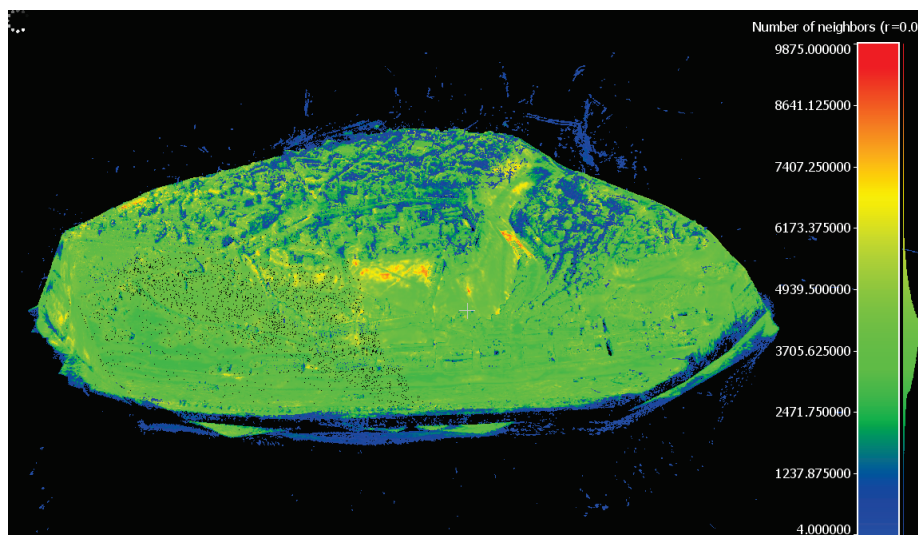


Рисунок 3 –Тепловая карта плотности облака точек

На рисунке 3 приведена тепловая карта поверхностной плотности облака точек. Поверхностная плотность определяется как

$$\rho = \frac{N}{\pi \cdot R^2}, \quad (1)$$

где N — количество соседей (точек), R — радиус окрестности, используемой для поиска соседей.

Выделение связных компонентов разделяет облако на более мелкие фрагменты, разделенные минимальным расстоянием. Каждая часть является связным компонентом (т. е. набором «соединенных» точек). Сегментация производится на основе классического алгоритма обработки изображений Connected-component labeling (CCL) [21]. Пользователь определяет минимальное количество точек, составляющих кластер, и максимальное (предельное) расстояние между точками внутри кластера. Этот метод позволяет значительно упростить ручную классификацию точек. На заключительном этапе ручной классификации оператор решает является ли кластер точек шумом или должен оставаться в наборе данных.

Пример сегментации облака точек приведен на рисунке 4.

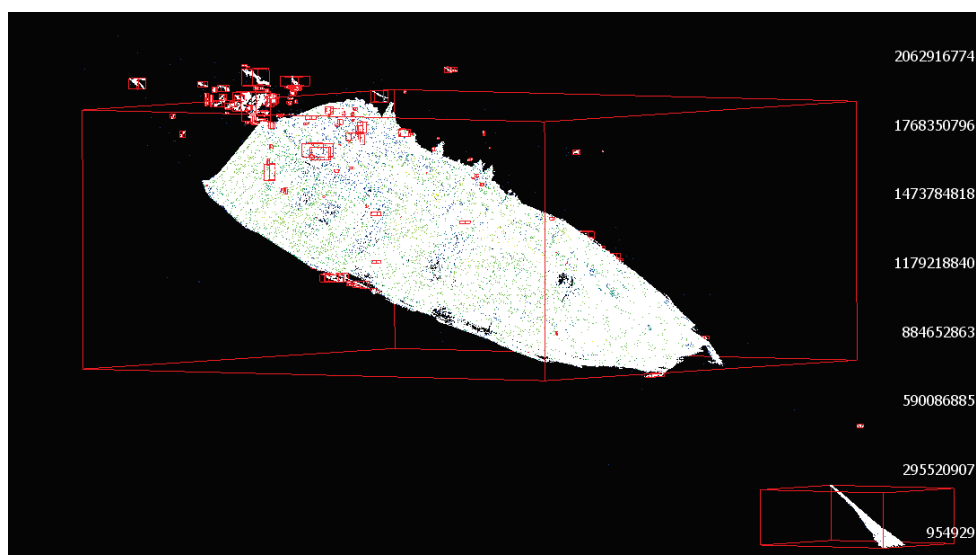


Рисунок 4 – Извлеченные компоненты из облака точек

По результатам сегментирования были отфильтрованы группы удаленных точек. Результирующее облако точек представлено на рисунке 5. Ошибочные точки и выбросы всё еще

присутствуют в облаке. Для их удаления применен алгоритм удаления статистических выбросов Statistical Outlier Removal ²(SOR).

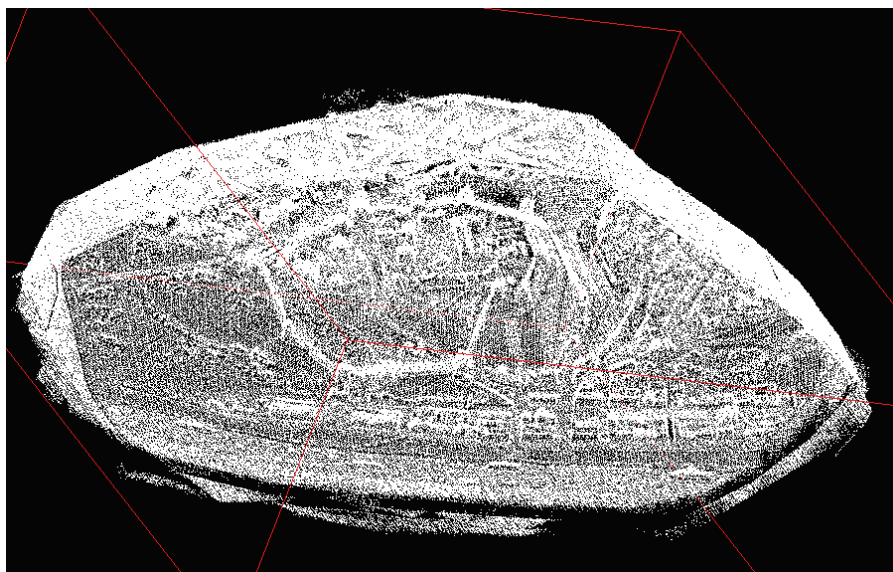


Рисунок 5 – Результирующее облако точек после фильтрации методом сегментации

Фильтрация с помощью алгоритма SOR позволяет избавиться от остаточных выбросов после сегментации (рисунок 6). Алгоритм статистической фильтрации основан на понимании, что расстояние между точками-выбросами и соседними точками велико, а расстояние между основными точками и соседними точками мало. И для удаления выбросов используется статистический анализ окрестностей каждой точки.

Фильтр основывается на решении уравнения Лапласа, которое описывает распределение потенциала в пространстве. В случае облака точек, каждая точка обладает потенциалом, который определяется ее расположением относительно других точек в облаке. Фильтр рассчитывает потенциал каждой точки на основе среднего значения потенциалов ее соседних точек, и это позволяет учитывать контекст точки при фильтрации. В итоге, SOR-фильтр позволяет улучшить качество облака точек, уменьшив шум и улучшив точность.

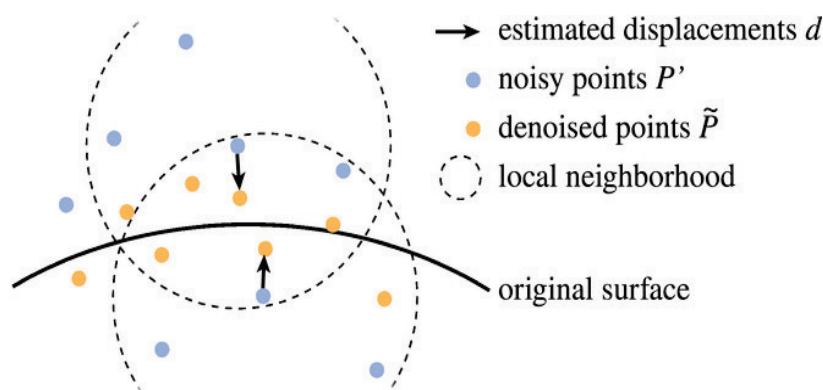
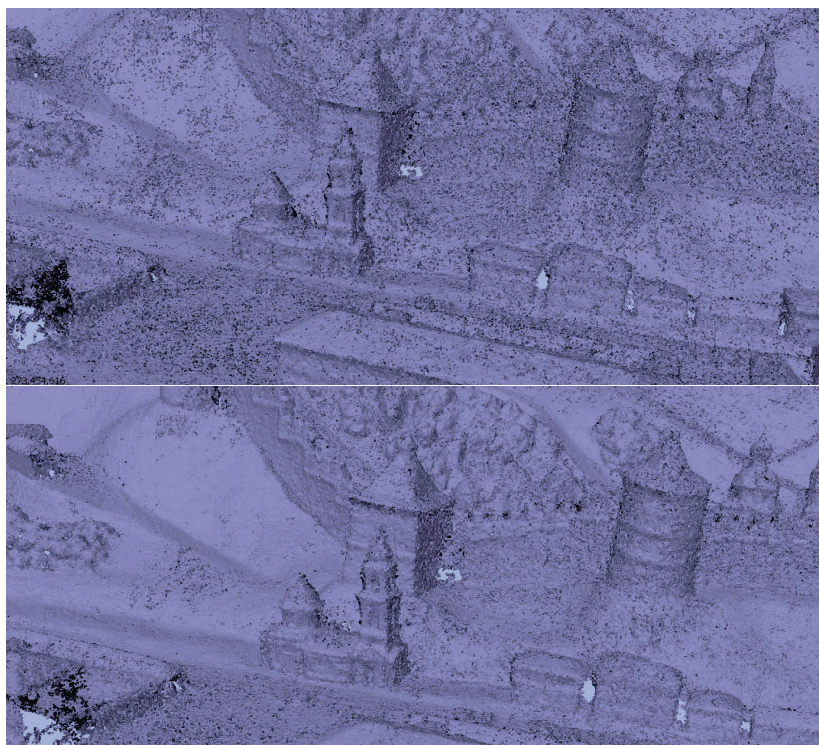


Рисунок 6 – Удаление остаточного шума [22]

Путем повторения итераций удаления выбросов можно добиться улучшения результата (рисунок 7). В процессе повторения итераций необходимо обеспечить сохранение плотности облака точек, чтобы избежать существенного уменьшения плотности в местах недостаточных данных для восстановления.

² https://pcl.readthedocs.io/projects/tutorials/en/latest/statistical_outlier.html



Облако точек до применения SOR-фильтра

Облако точек после применения SOR-фильтра (5 итераций)

Рисунок 7 – Результат применения SOR-фильтра

Опираясь на исследование [23] для реконструкции поверхности на основе обработанного облака точек был выбран алгоритм Screened Poisson Surface Reconstruction. Результат реконструкции представлен на рисунке 8.

Временные характеристики обработки облака точек приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Количественные и временные характеристики обработки облака точек

	Время, с	Пиковое потребление памяти
Удаление дубликатов точек	960 (16 мин)	184, 58 Мб
Выделение связанных компонентов	73	222, 99 Мб
Фильтрация с помощью SOR (для одной итерации)	69 300 (19 ч 15 мин)	138, 74 Мб

Количественные и временные характеристики построения полигональной модели приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Количественные и временные характеристики построения полигональной модели

	Исходное облако точек	Обработанное облако точек
Кол-во точек	273 454 616	19 795 816
Кол-во полигонов	63 449 301	51 939 270
Время построения	2 ч 47 мин 38 с	6 мин 9 с
Пиковое потребление памяти	12,4 Гб	852 Мб

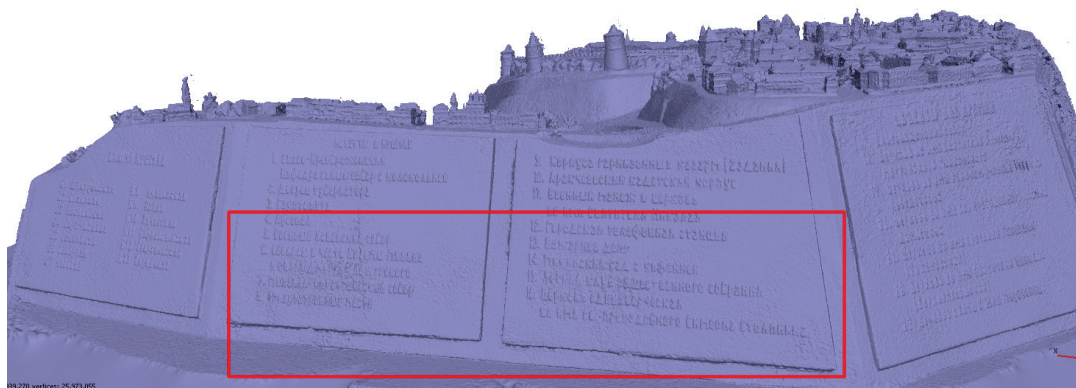
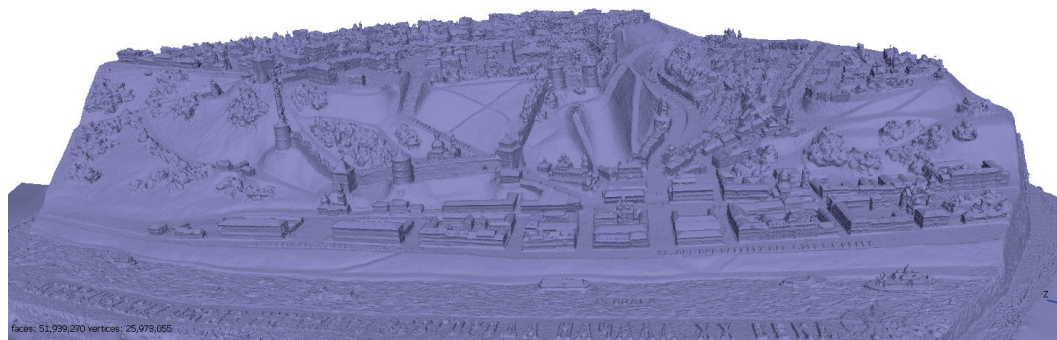


Рисунок 8 – Полигональная модель на основе измененного облака точек

Все вычисления производились на Intel(R) Core(TM) i7-10870H CPU @ 2.20GHz 2.21 GHz, ОЗУ 32,0 ГБ, NVIDIA GeForce RTX 3060 Laptop GPU. В ходе исследования использовались такие решения, как Agisoft Metashape, CloudCompare, MeshLab.

На рисунке 9 приведена карта отклонений облаков до и после процесса шумоподавления. Исходное облако выделено светло-бирюзовым цветом, удаленные выбросы – контрастными цветами.

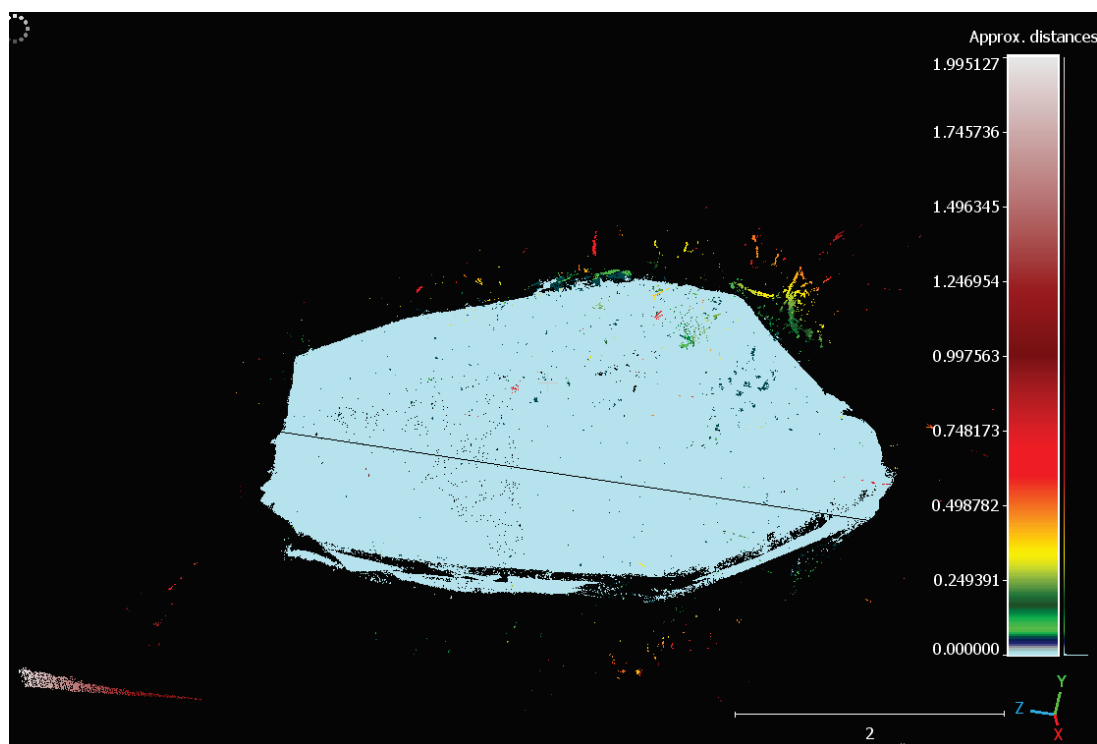


Рисунок 9 – Карта отклонений облаков

Для оценки влияния алгоритма на удаление выбросов используется точность шумоподавления P_d и полнота шумоподавления R_d [24].

Точность шумоподавления может быть рассчитана следующим образом:

$$P_d = \frac{N_q}{N_s}, \quad (2)$$

где N_q — количество удаленных точек шума, N_s — общее количество точек шума.

Полнота шумоподавления рассчитывается по формуле:

$$R_d = \frac{N_q}{N_y}, \quad (3)$$

где N_y — общее количество удаленных точек.

В таблице 3 приведены результаты шумоподавления трех методов данного облака точек.

Таблица 3 – Результаты шумоподавления трех методов в облаке точек

	P_d	R_d
Метод статической фильтрации	0,37	0,22
Метод сегментации	0,12	0,2
Последовательное применение двух методов	0,42	0,29

Такие результаты обусловлены малым количеством итераций прохождения фильтрации удаления статистических выбросов. По данным исследования [25] фильтр SOR удаляет до половины выбросов от общего количества. Тем не менее, комбинирование методов позволяет без значительного увеличения временных затрат на обработку облака точек удалить выбросы и предотвратить возникновение «дыр» в полигональной сетке модели.

5. Заключение

В области обработки облаков точек алгоритмы фильтрации облака точек являются ключевыми инструментами для улучшения точности и снижения шума в получаемых данных. В данной статье были рассмотрены алгоритмы фильтрации облака точек для помехоустойчивой реконструкции поверхности. Анализ показал, что данные методы позволяют устранить шумы и артефакты, а также значительно сократить количество точек для дальнейшей фотограмметрической обработки. Фильтр SOR позволяет достичь высокой точности реконструкции, но требует больших вычислительных ресурсов.

Выбор оптимального алгоритма фильтрации облака точек должен основываться на конкретных задачах и требованиях к точности реконструкции.

6. Список источников

- [1] Westoby M.J. et al. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications // *Geomorphology*. – 2012. – Т. 179. – С. 300-314.
- [2] Миненко М.В. Способы восстановления 3D сцены по двумерным изображениям / М. В. Миненко // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова. – 2019. – Т. 1. – С. 47-50. – EDN RVASFD.
- [3] Зобов П.Г. Современные методы 3D-сканирования при размерном анализе судовых моделей с учетом их аддитивного изготовления / П. Г. Зобов, А. В. Дектярев, В. Н. Морозов // *Известия КГТУ*. – 2019. – № 53. – С. 151-161. – EDN QWZXJZ.
- [4] Mukupa W., Roberts G. W., Hancock C. M. & Al-Manasir K. (2017) A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures, *Survey Review*, 49:353, 99-116, DOI: 10.1080/00396265.2015.1133039.
- [5] Scaioni, M.; Marsella, M.; Crosetto, M.; Tornatore, V.; Wang, J. Geodetic and Remote-Sensing Sensors for Dam Deformation Monitoring. *Sensors* 2018,18, 3682.
- [6] Бегляров Н.С. Применение универсальной технологии сбора геопространственных данных при изысканиях // *ББК 38.2 с23*. – 2020. – с. 30.
- [7] Пиримов Ж.Ж. Использование ортофотопланов для работы кадастра с помощью фотограмметрических методов и геоинформационных систем // *Поколение будущего: Взгляд молодых ученых-2021*. – 2021. – С. 295-299.
- [8] Statham, N. (2020). Use of Photogrammetry in Video Games: A Historical Overview. *Games and Culture*, 15(3), 289–307. <https://doi.org/10.1177/1555412018786415>.
- [9] Тихонов С.Г., Хрущев А.С. Создание 3D моделей декораций космической станции по результатам трёхмерного сканирования и фотограмметрической съёмки для фильма «Салют-7» // *Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения. Сборник материалов II международной научно-практической конференции. 8-10 ноября 2017 г., Санкт-Петербург*. – СПб., 2017. –С. 166-167;
- [10] Dhanda A. et al. Recreating cultural heritage environments for VR using photogrammetry // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2019. – Т. 42. – С. 305-310.
- [11] Muratov O. et al. 3DCapture: 3D Reconstruction for a Smartphone // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. – 2016. – С. 75-82.
- [12] Maalek R., Lichti D. D. Automated calibration of smartphone cameras for 3D reconstruction of mechanical pipes // *The Photogrammetric Record*. – 2021. – Т. 36. – №. 174. – С. 124-146.
- [13] Poliarnyi N. Out-of-core surface reconstruction via global TGV minimization // *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. – 2021. – С. 5641-5650.
- [14] Маньяков Ю.А., Архипов П.О., Ставцев П.Л. Метод интеграции трехмерных моделей в сцену в процессе трехмерной реконструкции // *Системы высокой доступности. 2022. Т. 18. № 4. С. 16–27. DOI: <https://doi.org/10.18127/j20729472-202204-02>*.
- [15] Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и ее применение / А.В. Скворцов. - Томск: Изд-во Томского ун-та, 2002. - 128 с.
- [16] Kazhdan M., Bolitho M., Hoppe H. Poisson surface reconstruction // *Proceedings of the fourth*

- Eurographics symposium on Geometry processing. – 2006. – Т. 7. – С. 0.
- [17] Kazhdan M., Hoppe H. Screened poisson surface reconstruction //ACM Transactions on Graphics (ToG). – 2013. – Т. 32. – №. 3. – С. 1-13.
- [18] Wolf K., Kim C., Zimmer H., et. al. Point Cloud Noise and Outlier Removal for Image-Based 3D Reconstruction // Proceedings of International Conference on 3D Vision (3DV). 2016. P. 118-127.
- [19] Редько А.В., Глебов С.А. Применение методов фильтрации в задаче построения поверхности по облаку точек //Электронный журнал: наука, техника и образование. – 2017. – №. CB2. – С. 92-97.
- [20] Chmelar P. et al. Advanced methods for point cloud processing and simplification //Applied Sciences. – 2020. – Т. 10. – №. 10. – С. 3340.
- [21] Št O. et al. Connected component labeling in CUDA //GPU computing gems emerald edition. – Morgan Kaufmann, 2011. – С. 569-581.
- [22] Rakotosaona M. J. et al. Pointcleannet: Learning to denoise and remove outliers from dense point clouds //Computer graphics forum. – 2020. – Т. 39. – №. 1. – С. 185-203.
- [23] Glumova E.S. Investigation of algorithms for generating surfaces of 3D models based on an unstructured point cloud / E. S. Glumova, A. D. Filinskikh // Physics and Technology Proceedings (CPT2020) : Conference Proceedings The 8th International Scientific Conference on Computing, 09–13 ноября 2020 года. – Nizhny Novgorod: Автономная некоммерческая организация в области информационных технологий "Научно-исследовательский центр физико-технической информатики", 2020. – P. 243-249. – DOI 10.30987/conferencearticle_5fce2773873ba5.03310980. – EDN EYIGQY.
- [24] Zhou S. et al. Non-iterative denoising algorithm based on a dual threshold for a 3D point cloud //Optics and Lasers in Engineering. – 2020. – Т. 126. – С. 105921.
- [25] Pirotti F. et al. Implementation and assessment of two density-based outlier detection methods over large spatial point clouds //Open Geospatial Data, Software and Standards. – 2018. – Т. 3. – №. 1. – С. 1-12.