

УДК 004.932.72`1:512.547

DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-5-15-23

Методика фильтрации облака точек методом скользящего конуса

А. А. Токин¹✉, А. А. Шоломицкий², В. В. Щербаков³

¹Центр маркшейдерско-геодезических инноваций Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация

²Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация

³Сибирский государственный университет путей сообщения,
г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: alexandrtokin@gmail.com

Аннотация. Облако точек в фотограмметрии представляет собой трехмерное распределение точечных данных, извлеченных из фотограмметрических изображений объекта посредством методов автоматического распознавания изображений. Облако точек позволяет анализировать геометрические характеристики объекта, проводить его визуализацию и моделирование. В статье рассмотрен инновационный метод фильтрации облака точек определяемой поверхности для удаления шумов и ошибочно распознанных точек методом скользящего конуса, который состоит в перемещении на каждую точку облака конуса с направленным вверх основанием. Образующая конуса наклонена под определенным углом, соответствующим углу естественного откоса сыпучего материала. Точки, попадающие внутрь этих конусов, считаются шумом или не относящимися к исследуемой поверхности и удаляются. Таким образом, в облаке точек съемки объекта остаются только точки его поверхности, в данном случае поверхности определяемых объемов сыпучих материалов. Предложенный метод фильтрации облака точек позволяет повысить точность вычисления таких объемов, что подтверждается сравнением с результатами лазерного сканирования эталонных поверхностей.

Ключевые слова: фотограмметрия, съемка, автоматическое распознавание, фильтрация, подсчет объемов, точность

Для цитирования:

Токин А. А., Шоломицкий А. А., Щербаков В. В. Методика фильтрации облака точек методом скользящего конуса // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 5. – С. 15–23. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-5-15-23

Введение

Использование технологии автоматизированной съемки и подсчета объемов является эффективным способом контроля за объемом вынутого и перемещенного грунта и запасов сырья на складах [1, 2]. Такая технология способствует повышению безопасности складских операций, снижает риск возникновения ошибок и улучшает общую эффективность управления складами [3, 4].

Однако при применении данного метода невозможно полностью контролировать по-

лученное облако точек, на основе которого рассчитывается объем сыпучих материалов [5–7]. В условиях недостаточной освещенности или высокой запыленности облако точек может содержать ошибочные данные, что затрудняет подсчет объемов. После удаления шумовых данных и выделения точек земли могут утрачиваться важные данные возле стенок и элементов склада. Кроме того, при выделении точек земли традиционными методами классификации отраженные блики от запыленности могут ошибочно классифицироваться как точки земли [8].

В статье предложен инновационный метод фильтрации точек, который способен качественно выделить точки, относящиеся к поверхности сыпучих материалов без потери данных, что повышает точность подсчета объемов. Разработанный метод основывается на использовании геометрических характеристик сыпучих материалов для фильтрации нерелевантных данных.

Актуальность исследования обусловлена возрастающими требованиями к автоматизации и точности управления складскими запасами в условиях увеличивающихся объемов хранения и разнообразия сыпучих материалов.

Методы и материалы исследований

Результатом автоматизированного метода съемки с применением IP-камер, установленных на грузоподъемных устройствах, является облако точек (рис. 1).

При автоматизированной фотограмметрической съемке складов сыпучих материалов облаков точек содержат данные не только поверхности сыпучих материалов, но и данные, относящиеся к элементам конструкции склада. К таким данным относятся стенки склада, ограждения, перегородки, которые имеют точки, нависающие над сырьем, а также неправильно распознанные и идентифицированные точки.

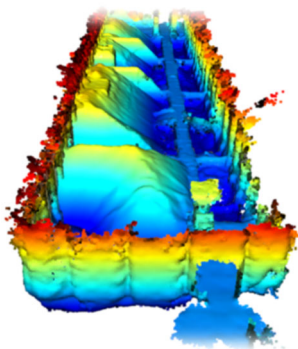


Рис. 1. Облако точек, полученное в результате автоматизированной обработки фотограмметрической съемки

Для выполнения подсчета объемов по облаку точек необходимо отфильтровать данные, не относящиеся к поверхности сыпучих материалов.

Существует несколько методов фильтрации, которые можно классифицировать по различным подходам [9, 10]. Ниже приведены основные подходы с описанием их преимуществ и недостатков:

1) геометрические методы основываются на анализе геометрических характеристик точек облака, таких как высота, плотность, расстояния между точками и углы наклона. Основная идея заключается в использовании простых геометрических критериев для классификации точек как земных или нежелательных (например, объектов на поверхности, растительности). Геометрические методы легко реализуемы, но плохо справляются со сложным и неоднородным рельефом;

2) морфологические методы используют принципы математической морфологии, такие как дилатация и эрозия, для обработки облаков точек. Эти методы позволяют выделять основную структуру поверхности путем последовательного применения морфологических операций, что помогает отделить земную поверхность от объектов на ней. Методы эффективны для переменного рельефа и плотной растительности, но для достижения оптимальных результатов необходимо тщательно настроить параметры морфологических операций;

3) методы машинного обучения включают использование алгоритмов, которые обучаются на размеченных данных для классификации точек облака [11, 12]. Эти методы могут использовать различные признаки точек, такие как высота, плотность, контекстные характеристики, для обучения моделей, способных автоматически выделять земную поверхность. Методы способны адаптироваться к различным условиям местности и сложным ландшафтам, но для обучения модели необходим большой объем данных. При появлении условий, не встречающихся ранее, модели требуется дополнительное обучение;

4) методы аппроксимации поверхности предполагают построение математической модели поверхностной структуры на основе облака точек. Это может включать использование триангуляционных сеток, полиномиальных поверхностей или других моделей для приближения реальной земной поверхности, что позволяет выделять основные компоненты рельефа. Методы позволяют точно выделять сложные формы рельефа. Однако для эффек-

тивности методов необходимо подбирать параметры добавления точек, которые могут меняться в зависимости от условий съемки.

В методике автоматизированной съемки [1] и подсчета объемов сыпучих материалов на складах для выделения точек земли по данным аэрофотосъемки применяются стандартные методы программного обеспечения Agisoft Metashape – классификация рельефа [13].

Этот метод относится к классу методов аппроксимации поверхности. При использовании стандартных параметров классификации в условиях недостаточной освещенности и высокой запыленности (рис. 2) облако точек может содержать ошибочные данные, затрудняющие точный подсчет объемов. Кроме того, могут теряться важные данные вблизи стенок и элементов склада, как показано на рис. 2, 3.



Рис. 2. Изображение поверхности склада, полученное ИР-камерой

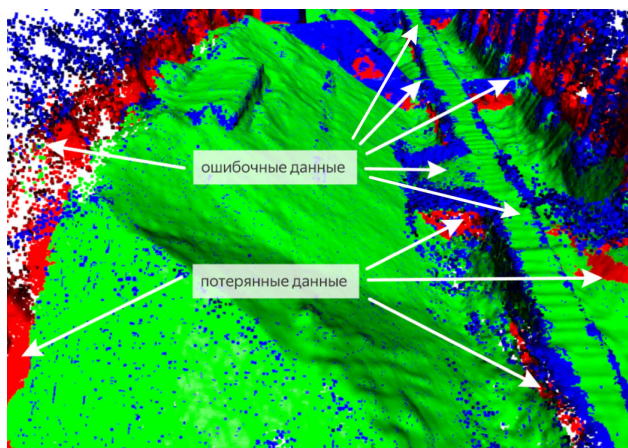


Рис. 3. Классифицированное облако точек: синий цвет – класс не назначен (1 759 715); красный – шум (1 329 794); зеленый – поверхность (3 805 163)

Таким образом, существующие методы либо недостаточно точны, либо требуют значительных вычислительных ресурсов и ручной настройки, что делает их неприменимыми для автоматизированного подсчета объемов сыпучих материалов.

Для повышения точности автоматизированного подсчета объемов целесообразно применять фильтрационные методы, способные эффективно удалять нерелевантные точки без необходимости предварительной настройки параметров. Авторы предлагают использовать для этого метод скользящего конуса, который относится к группе геометрических методов и не требует сложной подготовки и обучения.

Несмотря на то что традиционные геометрические методы обладают ограниченной точностью при работе со сложным рельефом, данный подход принципиально отличается за счет адаптации к специфике сыпучих материалов. Ключевое преимущество метода скользящего конуса заключается в использовании угла естественного откоса – физического параметра, характерного для конкретного материала (например, песка, угля или гравия). Это позволяет алгоритму автоматически учитывать геометрию поверхности без сложных вычислений или обучения на больших данных.

Альтернативные методы (морфологические, машинное обучение, аппроксимация) требуют либо ручной настройки параметров под каждый случай, либо эталонных данных, что затрудняет их применение в условиях изменчивой среды складов (запыленность, динамическое освещение). Данный метод, напротив, работает детерминированно: конус «отсекает» только точки, физически невозможные для заданного угла откоса, сохраняя при этом данные у стенок и других критичных зон.

Таким образом, авторы выбрали геометрический подход, но модифицировали его, устранив главный недостаток – низкую адаптивность. Это обеспечило точность при сохранении простоты и скорости обработки, что критично для автоматизированных систем учета.

Метод фильтрации скользящим конусом

Метод скользящего конуса основан на использовании пространственных ограничений для изоляции значимых точек облака, соот-

ветствующих определенным геометрическим критериям. В каждой точке облака строится вертикальный конус с вершиной в данной точке и основанием, направленным вверх. Угол вершины конуса определяется геометрическими характеристиками исследуемого материала, такими как угол естественного откоса, который варьируется от 20 до 36° для различных материалов. Точки, попадающие внутрь конусов, считаются не относящимися к сыпучим материалам, шумом или выбросами и удаляются из облака. На рис. 4 показано положение конуса на нескольких точках вертикального сечения облака точек съемки.

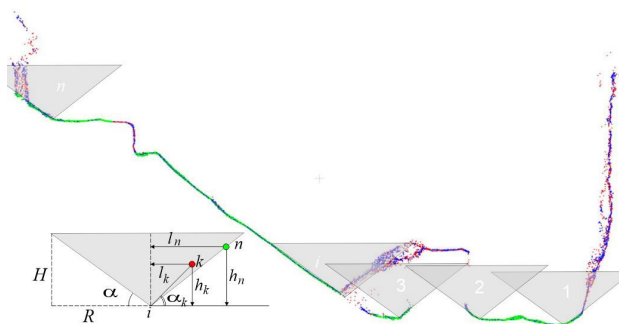


Рис. 4. Фильтрация облака точек методом скользящего конуса

Множество точек облака, полученного в результате автоматизированной обработки

съемки склада, представим в виде неупорядоченного множества

$$M_p = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}. \quad (1)$$

В общем случае точка описывается совокупностью трехмерных координат

$$p_i = \{x_i, y_i, z_i\}, \quad (2)$$

где p_i – точка облака съемки склада, которая является элементом множества M_p ; индекс i служит для идентификации элемента в множестве.

Фигура «скользящий конус» (см. рис. 4) может быть описана следующими элементами:

$$Con = \{\alpha, H, R\}, \quad (3)$$

где α – угол естественного откоса сыпучего материала склада, который является основным параметром конуса; H – высота конуса; R – радиус основания. Эти параметры служат для ограничения выборки при анализе множества M_p и подбираются программно.

Конус перемещается по множеству точек M_p . Принадлежность некоторой точки k внутреннему объему конуса, построенному на точке i , определяется выражением (см. рис. 4)

$$\left(\arctg \frac{h_k}{l_k} > \alpha \right) \wedge (z_i < z_k < (z_i + H)) \wedge (l_k < R), \quad (4)$$

$$\arctg \frac{z_k - z_i}{\sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2}} > \alpha. \quad (5)$$

В таком случае операцию фильтрации облака точек «скользящим конусом» можно формализовать в виде

$$\forall p_k \in Con_i \rightarrow M_p'' = M_p - p_k, \quad (6)$$

где $M_p'' \subset M_p$ – множество точек поверхности склада, которое является подмножеством множества M_p , очищенным от ошибочных

точек и шумов, и используется в дальнейшем для вычисления объема склада.

Метод вертикальных конусов учитывает геометрические характеристики объекта, позволяя эффективно отделить релевантные точки от точек, не относящихся к сыпучим материалам, от шумов и выбросов.

Ограничение поиска точек внутри заданного радиуса R и по высоте H уменьшает объем вычислений и делает метод масштабируемым для больших облаков точек.

Построение конусов на каждой точке обеспечивает сохранение важных элемен-

тов облака точек, относящихся к сыпучим материалам.

Использование угла естественного откоса α позволяет адаптировать метод к различным видам сыпучих материалов, обеспечивая гибкость и точность фильтрации.

Испытания метода

Метод вертикальных конусов особенно полезен при автоматизации подсчета объемов сыпучих материалов, где требуется очистка облака точек от нерелевантных данных без потери информации о поверхности материала [14, 15]. При использовании данного метода необходимо предварительно выполнить статистическую фильтрацию шумов и выбросов (рис. 5).

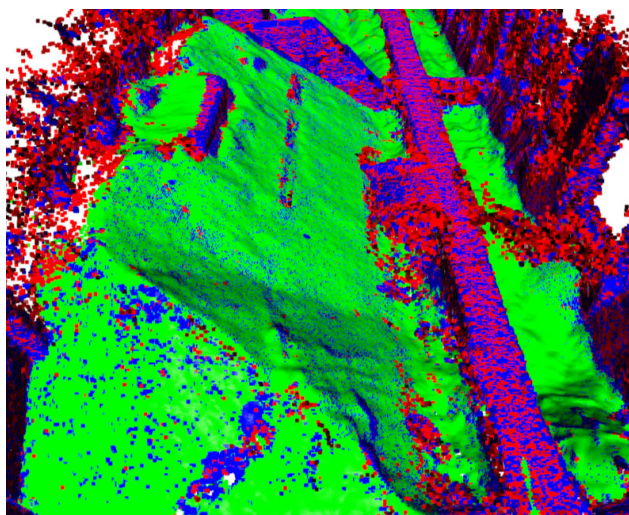


Рис. 5. Фильтрация точек сыпучих материалов методом скользящего конуса: синий цвет – исходное облако точек (1 620 845); красный – шумы, выбросы (2 608 311); зеленый – отфильтрованные точки поверхности (1 085 516)

Для большей наглядности анализа рассмотрим облака точек в разрезе на рис. 4 и 6 а, б, где синим цветом показано полное облако точек; красным – точки шума и выбросов; зеленым – точки поверхности, выделенные методом скользящего конуса.

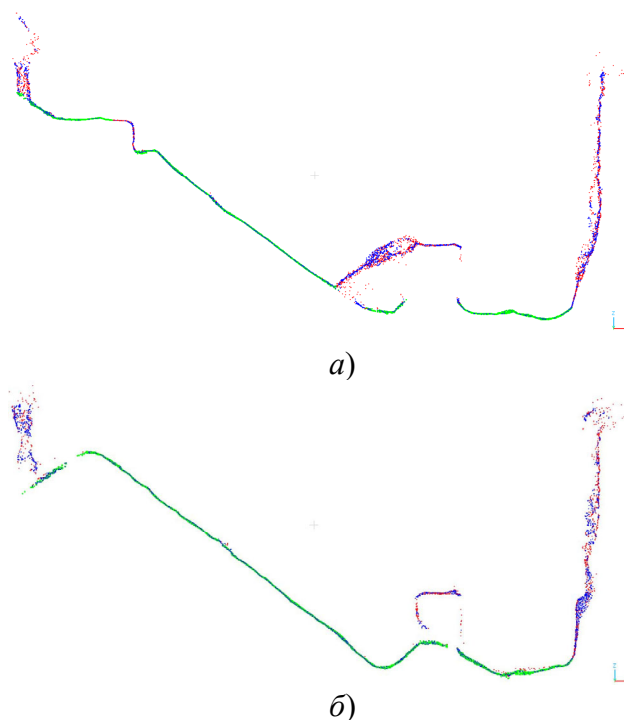


Рис. 6. Сечения по облаку точек: а) сечение по секции 2; б) сечение по секции 3

С использованием предложенного метода после фильтрации остаются необходимые данные для экстраполяции данных у стенок склада, а также удаляется все, что не относится к сыпучим материалам.

Анализ результатов

Для анализа сравним результаты подсчета объемов по данным двух способов фильтрации с результатом подсчета объемов по данным лазерного сканирования (рис. 7.). Ввиду более высокой плотности точек и точности [16] подсчет объемов по облаку точек наземного лазерного сканирования будем считать эталоном.

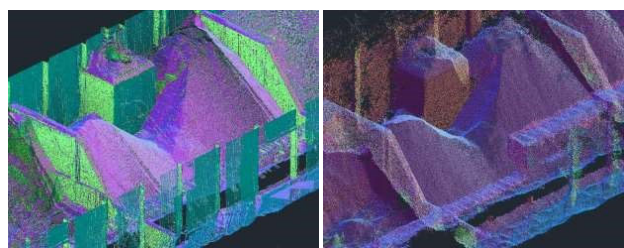


Рис. 7. Облака точек (лазерное сканирование слева, автоматическая система справа)

Для удаления шумов и переотражений облака точек лазерного сканирования может быть отфильтровано вручную [17, 18].

Подсчет объемов произведен в программном обеспечении Autodesk Civil 3D

композитным методом по призмам.

Отдельно для каждой секции склада объем рассчитывается между двумя поверхностями (таблица).

Анализ результатов подсчета объемов

№	V_0	V_1	V_2	$(V_0 + V_1)/2$	$(V_0 + V_2)/2$	$V_0 - V_1$	$V_0 - V_2$	$\Delta V_1, \%$	$\Delta V_2, \%$
1	2 972	2 905	2 934	2 938,5	2 953	67	38	2,3	1,3
2	1 826	1 745	1 796	1 785,5	1 811	81	30	4,5	1,7
3	1 151	1 132	1 138	1 141,5	1 144,5	19	13	1,7	1,1
4	226	228	226	227	226	-2	0	-0,9	0,0

V_0 – объем, полученный по данным лазерного сканирования; V_1 – объем, полученный при фильтрации данных стандартным методом выделения поверхности земли [13]; V_2 – объем, полученный при фильтрации данных методом скользящего конуса.

Заключение

В результате фильтрации облака точек методом скользящего конуса остаются необходимые для дальнейшей экстраполяции данные у стенок склада, а также удаляются точки, не относящиеся к сыпучим материалам, благодаря чему значительно повысилась точность подсчета объемов. Если по съемке со стандартными методами выделения поверхности земли точность определения объемов (см. таблицу) $\Delta V_1, \%$ соответствовала только инструкции (РД 07-604-03 «Инструкция по маркшейдерскому учету объемов горных работ при добыче полезных ископаемых открытым способом». Серия 07. Выпуск 13. – М. : Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2004. – 32 с.), которая была отменена в 2020 г. Предложенный метод фильтрации скользящим конусом облаков то-

чек автоматизированной съемки складов позволяет эффективно удалять ошибочно распознанные точки, что повышает точность вычисления объемов $\Delta V_2, \%$ (см. таблицу), которая теперь соответствует требованиям (Правила осуществления маркшейдерской деятельности. Приказ Ростехнадзора от 19.05.2023 № 186 «Об утверждении Правил осуществления маркшейдерской деятельности». Зарегистрировано в Минюсте России 31.05.2023 N 73638). Таким образом, чтобы добиться требуемой в настоящее время точности вычисления объемов, необходимо применять современные методы съемки складов и фильтрации полученных облаков точек.

Метод скользящих конусов особенно полезен при автоматизации подсчета объемов сыпучих материалов, где требуется очистка облака точек от нерелевантных данных без потери информации о поверхности материала.

Использование геометрических ограничений, таких как угол конуса и его высота, обеспечивает высокую производительность фильтрации. Этот подход особенно полезен при анализе и обработке данных сыпучих материалов, где структурные особенности и плотность распределения точек играют ключевую роль.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Токин А. А. Фотограмметрический метод съемки сыпучих материалов на складах с размещением IP камер на грузоподъемных механизмах // Маркшейдерский вестник. – 2024. – № 2 (152). – С. 31–38.
2. Рогова Н. С. Применение неметрических цифровых камер для контроля объемов перемещенного грунта при выполнении земляных работ на строительных площадках // Инновации и инвестиции. – 2018. – № 4. – С. 356–359.

3. Смольянинова Е. Н., Полищук Е. В. Проблемы современной складской логистики // Азимут научных исследований: экономика и управление. – 2019. – Т. 8. № 2 (27). – С. 292–294.
4. Пат. RU2788655C1 Система автоматического расчета объемов сыпучего материала на складах закрытого типа [Текст] / Пастухова Г. В., Зотин Д. А., Торопов И.; заявл. 2021.08.02; опубл. 2023.01.24.
5. Сальников В. Г., Басаргин А. А., Астапов А. М. Анализ способов подсчета объемов штабеля сыпучих материалов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск : сб. материалов в 9 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. № 1. – С. 203–211. – DOI 10.22764/2618-981X-2019-1-1-203-211.
6. Комиссаров А. В., Аврунев Е. И., Ямбаев Х. К., Хлебникова Е. П. Сравнение точности определения объемов сыпучих материалов по данным съемки с беспилотных летательных аппаратов и геодезическими измерениями // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 4. – С. 70–77. – DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-4-70-77.
7. Tucci G., Gebbia A., Conti A., Fiorini L., Lubello C. Monitoring and computation of the volumes of stockpiles of bulk material by means of UAV photogrammetric surveying // Remote Sens. – 2019. – 11 (12). – P. 1471.
8. Данилова Л. А., Рашевский Н. М., Рекунов С. С., Трудов Я. А., Гуртяков А. С. Классификация плотного облака точек при моделировании рельефа // Academia. Архитектура и строительство. – 2024. – № 3. – С. 76–81. – DOI 10.22337/2077-9038-2024-3-76-81.
9. Zhiyang Zhi, Bingtao Chang, Yuan Li, Zhigang Du, Yipeng Zhao, Xiaodong Cui, Jiahuan Ran, Aiguang Li, Wuming Zhang. P-CSF: Polar coordinate cloth simulation filtering algorithm for multi-type tunnel point clouds // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2025. – Volume 155, Part 1. – DOI 10.1016/j.tust.2024.106144.
10. Xingsheng Deng, Guo Tang, Qingyang Wang. A novel fast classification filtering algorithm for LiDAR point clouds based on small grid density clustering // Geodesy and Geodynamics. – 2022. – Vol. 13, Is. 1. – Pp. 38–49.
11. Mariya Velikova, Juan Fernandez-Diaz, Craig Glennie. "ICESat-2 noise filtering using a point cloud neural network // ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2024. – Vol. 11. – DOI 10.1016/j.ophoto.2023.100053.
12. Дубенко Ю. В., Дышкант Е. Е., Тимченко Н. Н., Рудешко Н. А. Метод реконструкции трехмерных сцен, основанный на применении сверточных нейронных сетей, фильтрации по дистанции и с помощью «октодерев» // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2021. – № 4. – С. 43–54. – DOI 10.21685/2072-3059-2021-4-4.
13. Руководство пользователя Agisoft Metashape: Professional Edition, версия 2.1. 2024 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_1_ru.pdf (дата обращения: 29.02.24).
14. Giampiero Mineo, Marco Rosone, Chiara Cappadonia. Semi-Automated rock block volume extraction from high-resolution 3D point clouds for enhanced rockfall hazard analysis // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2025. – Vol. 185. – P. 11. – DOI 10.1016/j.ijrmms.2024.105982.
15. Тубольцев В. П., Авдеенок В. Л. Автоматизация процессов обработки данных дистанционного зондирования земли // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2022. – Т. 2. – С. 182–184.
16. Chao Hu, Yi-hong Zhou, Chun-ju Zhao, Zhi-guo Pan. Slope excavation quality assessment and excavated volume calculation in hydraulic projects based on laser scanning technology // Water Science and Engineering. – 2015. – Volume 8, Issue 2, pp. 164-173 // <https://doi.org/10.1016/j.wse.2015.03.001>.
17. Алванян А. К., Овсянников М. В. Использование 3d модели для подсчета объемов вскрышных пород и полезного ископаемого // Вестник Пермского университета. Геология. – 2021. – Т. 20, № 4. – С. 355–361. – DOI 10.17072/psu.geol.20.4.355.
18. Kiriak N. Development and implementation of technical decision for digital support of construction using photogrammetry methods // Nuclear Engineering and Design. – 2021. – Pp. 2–3. – DOI 10.1016/j.nucengdes.2021.111366.

Об авторах

Александр Алексеевич Токин – научный сотрудник.

Андрей Аркадьевич Шоломицкий – доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Владимир Васильевич Щербаков – доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой инженерной геодезии.

Получено: 04.06.2025

© А. А. Токин, А. А. Шоломицкий, В. В. Щербаков, 2025

Adaptive point cloud filtering using the "sliding cone" method

A. A. Tokin^{1✉}, A. A. Sholomitskii², V. V. Shcherbakov³

¹Center for Surveying and Geodetic Innovations,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

²Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

³Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: alexandrtokin@gmail.com

Abstract. The authors introduce an innovative filtering technique for point clouds aimed at enhancing the accuracy of surface representation and volume calculations. Point clouds, which consist of 3D spatial data extracted through automated image recognition, are essential for analyzing an object's geometry as well as visualization, and modeling. The proposed "sliding cone" method involves positioning an upward-oriented cone over each point in the cloud, with its generatrix angled to match the natural angle of repose for loose materials. Points located within these cones are identified as noise or irrelevant data and removed, ensuring that the filtered point cloud accurately reflects only the target surface - in this case, the surfaces of bulk material volumes. Validation through comparisons with laser-scanned reference surfaces confirms that the proposed method significantly improves the precision of volume estimations.

Keywords: photogrammetry, survey, automatic recognition, filtering, automation, volume estimation, accuracy

REFERENCES

1. Tokin, A. A. (2024). Photogrammetric method for surveying bulk materials in warehouses with the placement of IP cameras on lifting mechanisms *Mine Surveying Bulletin [Marksheyderskiy vestnik]*., No. 2 (152), pp. 31–38 [in Russian].
2. Rogova, N. S. (2018) The use of non-metric digital cameras for monitoring the volume of moved soil during earthworks at construction sites *Innovations and Investments [Innovatsii i investitsii]*., No. 4, pp. 356–359 [in Russian].
3. Smolyaninova E. N., Polishchuk E. V. (2019). Problems of modern warehouse logistics [Problemy sovremennoy skladsКОЙ logistiki] // Tolyatti: Azimuth of Scientific Research: Economics and Management [Azimut nauchnykh issledovaniy: ekonomika i upravlenie]., Vol. 8, No. 2 (27), pp. 292–294 [in Russian].
4. Pastukhova, G. V., Zotin, D. A., Toropov, I. (2023). Patent "System for automatic calculation of bulk material volumes in closed-type warehouses" [Sistema avtomaticheskogo rascheta ob'yemov sypuchego materiala na skladakh zakrytogo tipa] RU2788655C1 [in Russian].
5. Salnikov, V. G., Basargin, A. A., Astapov, A. M. (2019) Analysis of methods for calculating the volume of bulk material stockpiles *Interexpo Geo-Siberia [Intereksपो Geo-Sibir']*, pp. 203–211. DOI 10.22764/2618-981X-2019-1-1-203-211 [in Russian].

6. Komissarov, A. V., Avrunev, E. I., Yambaev, Kh. K., Khlebnikova, E. P. (2019). Comparison of the accuracy of determining the volumes of bulk materials based on UAV surveys and geodetic measurements *Vestnik SSUGT [Vestnik SGUGiT]*, Vol. 24, No. 4, pp. 70–77. DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-4-70-77 [in Russian].
7. Tucci G., Gebbia A., Conti A., Fiorini L., Lubello C. (2019). Monitoring and computation of the volumes of stockpiles of bulk material by means of UAV photogrammetric surveying *Remote Sensing*, 11 (12), p. 1471.
8. Danilova L. A., Rashevskiy N. M., Rekunov S. S., Trudov Ya. A., Guryakov A. S. (2024). Classification of dense point clouds in terrain modeling *Academia. Architecture and Construction [Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo]*, No. 3, pp. 76–81. DOI 10.22337/2077-9038-2024-3-76-81 [in Russian].
9. Zhiyang Zhi, Bingtao Chang, Yuan Li, Zhigang Du, Yipeng Zhao, Xiaodong Cui, Jiahuan Ran, Aiguang Li, Wuming Zhang. (2025). P-CSF: Polar coordinate cloth simulation filtering algorithm for multi-type tunnel point clouds *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 155, Part1. DOI 10.1016/j.tust.2024.106144.
10. Xingsheng Deng, Guo Tang, Qingyang Wang. (2022). A novel fast classification filtering algorithm for LiDAR point clouds based on small grid density clustering *Geodesy and Geodynamics*, Vol. 13, Issue 1, pp. 38–49. DOI 10.1016/j.geog.2021.10.002.
11. Mariya Velikova, Juan Fernandez-Diaz, Craig Glennie. (2024). ICESat-2 noise filtering using a point cloud neural network *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.11. DOI 10.1016/j.ophoto.2023.100053.
12. Dubenko Yu. V., Dyshkant E. E., Timchenko N. N., Rudesko N. A. (2021). A method for reconstructing 3D scenes based on the use of convolutional neural networks, distance filtering, and octree [Metod rekonstruktsii trekhmernykh stsen, osnovanny na primenenii svertochnykh neyronnykh setey, fil'tratsii po distantsii i s pomoshch'yu "oktodereva"] // Penza: University News. Volga Region. Technical Sciences [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki], DOI: 10.21685/2072-3059-2021-4-4 [in Russian].
13. Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 2.1. 2024 Retrieved from https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_1_ru.pdf. Accessed: 29.02.24 [in Russian].
14. Giampiero Mineo, Marco Rosone, Chiara Cappadonia. (2025). Semi-Automated rock block volume extraction from high-resolution 3D point clouds for enhanced rockfall hazard analysis *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 185. DOI 10.1016/j.ijrmms.2024.105982.
15. Tuboltsev V. P., Avdeenok V. L. (2022). Automation of remote sensing data processing *Topical Problems of Aviation and Cosmonautics [Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavtiki]*, Vol. 2, pp. 182–184 [in Russian].
16. Chao Hu, Yi-hong Zhou, Chun-ju Zhao, Zhi-guo Pan. (2015). Slope excavation quality assessment and excavated volume calculation in hydraulic projects based on laser scanning technology *Water Science and Engineering*, Vol. 8, Issue 2, pp. 164–173. DOI 10.1016/j.wse.2015.03.001.
17. Alvanyan A. K., Ovsyannikov M. V. (2021). The use of 3D modeling for calculating volumes of overburden and minerals *Bulletin of Perm University. Geology [Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya]*, Vol. 20, No. 4, pp. 355–361 [in Russian].
18. Kiriak N. (2021). Development and implementation of technical decision for digital support of construction using photogrammetry methods *Nuclear Engineering and Design*, pp. 2–3. DOI 10.1016/j.nucengdes.2021.111366.

Authors details

Alexander A. Tokin – Researcher.

Andrei A. Sholomitskii – D. Sc., Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

Vladimir V. Shcherbakov – D. Sc., Associate Professor, Head of the Department of Engineering geodesy

Received 04.06.2025

© A. A. Tokin, A. A. Sholomitskii, V. V. Shcherbakov, 2025