

УДК 528.721.221.6

DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-1-66-76

Реализация математического алгоритма определения объема объекта, не имеющего «нависания», по данным лазерного сканирования

Е. О. Палехова¹, Д. В. Долгополов², В. А. Мелкий^{3✉}

¹ ЗАО «Ай Ко», г. Москва, Российская Федерация

² Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта (ООО «НИИ Транснефть»), г. Москва, Российская Федерация

³ Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Южно-Сахалинск, Российская Федерация

e-mail: vamelkiy@mail.ru

Аннотация. Цель – разработка алгоритма вычисления объема 3D-объекта, не имеющего «нависания». В статье представлены результаты разработки алгоритма, который можно использовать при определении объема по облаку точек, полученному в процессе лазерного сканирования. В статье приводится краткое описание алгоритма, в завершении показан пример программной реализации алгоритма и его апробации. Основные источники информации – сведения из открытых литературных источников о методах и алгоритмах автоматизированной обработки данных лазерного сканирования. Апробирование работы алгоритма выполнялось с применением ГИС-технологий. Объектом для исследования послужили алгоритмы, реализованные в известных методиках обработки данных лазерного сканирования. Исследования позволили разработать алгоритм, который основан на применении численного двойного интегрирования, объем тела представлен как сумма объемов прямоугольных параллелепипедов, реконструкция поверхности производится методом Пуассона. Предложенный метод определения объема реализован в программном обеспечении мониторинга природно-технологической среды (МПТС). Определение объема выполняется с различным количеством итераций, которые дают возможность минимизировать влияние выбора шага сетки на результат расчета и увеличить точность полученного результата. Средняя погрешность определения при апробировании алгоритма составила 2 % от общего объема.

Ключевые слова: облако точек, лазерное сканирование, реконструкция поверхности, триангуляция Делоне, метод Пуассона, геоинформационные технологии, мониторинг земель

Для цитирования:

Палехова Е. О., Долгополов Д. В., Мелкий В. А. Реализация математического алгоритма определения объема объекта, не имеющего «нависания», по данным лазерного сканирования // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 1. – С. 66–76. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-1-66-76

Введение

Данные лазерного сканирования, получаемые в процессе мониторинга природно-технических систем, являются наиболее востребованными при анализе геометрических параметров объектов мониторинга и фиксации изменений на площадке. Возможность использования данных стала доступной вследствие развития технологий

лазерного сканирования, съемочных систем и программных средств обработки данных [1–6].

Развитие методов автоматизированной обработки данных дистанционного зондирования дает дополнительный импульс к использованию технологий лазерного сканирования, цифровой аэросъемки, беспилотной аэросъемки [7–13]. Данные дистанционного зондирования востребованы и используются для

решения широкого круга производственных задач, в том числе:

- анализа изменений на строительной площадке;
- контроля результатов строительства «план / факт»;
- определения объема складированных сыпучих масс;
- маркшейдерии разработки карьеров добычи полезных ископаемых;
- определения характеристик объектов мониторинга: наклона опор ЛЭП, стрелы провеса провода, габарита приближения провода к земле и т. д.;
- анализа изменений в коридоре трассы (трубопроводы, ЛЭП): зарастания, изменения рельефа, несанкционированных земляных работ и др.

В настоящее время проблемы автоматизации обработки данных лазерного сканирования связаны с необходимостью импортозамещения западного программного обеспечения (Leica Cyclone [14], Autodesk Civil 3D [15]), развитием уже существующих методов, реализованных в зарубежном и российском программном обеспечении, разработкой новых методов и алгоритмов, более подходящих для решения производственных задач, в том числе учитывающих неравномерность данных, получаемых в процессе лазерного сканирования [16, 17].

В процессе исследования научной литературы и апробации обработки данных на практике было определено, что метод Пуассона предпочтителен для сложно детализируемой поверхности [16, 18], в отличие от распространенного метода Делоне, который обычно используется для построения поверхности и последующего вычисления объемов в программных пакетах (Autodesk Civil 3D [15], ArcGIS [19]).

В настоящей статье приводятся результаты разработки математического алгоритма определения объема объекта, не имеющего «нависания», по данным лазерного сканирования и его программной реализации, предлагается реализация реконструкции поверхности Пуассона. В отличие от распространенного метода триангуляции Делоне данный метод учитывает вероятную неравномер-

ность данных, получаемых в процессе наземного лазерного сканирования. Также реализованный метод предусматривает несколько итераций по определению объема для получения более достоверного результата.

Существующие методы

В настоящее время рассматриваемая предметная область остается актуальной. Российские и зарубежные ученые разрабатывают новые алгоритмы, рассматриваются вопросы повышения точности реконструкции поверхности, улучшения сегментации и распознавания, а также повышения производительности уже созданных методов и алгоритмов:

- классификации рельефа и построения его цифровой модели [20–23];
- автоматической классификации точек лазерного отражения (разделение на классы: земля, растительность, крыши зданий, объекты ниже уровня отметок земли) [24];
- реконструкции поверхности: Ball-Pivoting (поворот шара), Poisson Surface Reconstruction (реконструкция поверхности Пуассона), Power Crust (силовая корка), Marching Cubes (шагающие кубы), методы на основе триангуляции Делоне (альфа-формы и фильтрация Вороного) [11, 17, 18, 25–29];
- извлечения объектов цилиндрической формы из облака лазерного сканирования [30];
- определения геометрических параметров объектов мониторинга, таких как определение параметров элементов опор ЛЭП [31] и др.

В процессе анализа существующих методов и алгоритмов обработки данных лазерного сканирования, реконструкции поверхности был сформирован и реализован в программном обеспечении [32] алгоритм вычисления объема объекта, не имеющего «нависания».

Метод вычисления объема 3D-объекта, не имеющего «нависания»

Предлагаемый алгоритм реализован на основе использования численного двойного интегрирования: объем тела можно представить как сумму объемов прямоугольных параллелепипедов. Погрешность вычисления объема определяется шагом дискретизации r и имеет

порядок r^3 . В дальнейшем при необходимости погрешность может быть снижена как за счет более точного определения формы тел на границе контура, так и за счет более точного учета формы поверхности, например, замены параллелепипеда усеченной призмой.

Следует иметь в виду, что чрезмерное уменьшение значения шага r приведет к потере параллелепипедов, попадающих между точками облака и возрастанию ошибки вычисления объема. Оптимальным является значение r , имеющее тот же порядок, что и плотность расстояния, представляющее собой среднее расстояние между каждой парой ближайших точек облака. Для оценки плотности расстояния можно воспользоваться соотношением

$$d = \sqrt{\frac{(x_{\max} - x_{\min}) \times (y_{\max} - y_{\min})}{N}}, \quad (1)$$

ГДЕ x_{\min} , x_{\max} , y_{\min} , И y_{\max} – МИНИМАЛЬНЫЕ И МАКСИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ СООТВЕТСТВУЮЩИХ КООРДИНАТ ТОЧЕК ОБЛАКА, А N – КОЛИЧЕСТВО ТОЧЕК ОБЛАКА. ЭТА ИНФОРМАЦИЯ ОБЫЧНО СОДЕРЖИТСЯ В МЕТАДААННЫХ ОБЛАКА. ТОГДА ЗНАЧЕНИЕ ШАГА ДИСКРЕТИЗАЦИИ r РЕКОМЕНДУЕТСЯ ЗАДАТЬ В ДИАПАЗОНЕ

$$1,5d \leq r \leq 2,5d. \quad (2)$$

Такой шаг обеспечит оптимальный размер основания параллелепипедов, не допустив их потери и обеспечив более точное вычисление объема.

Алгоритм принимает на вход точки замкнутой полилинии основания «холма» или «впадины»: контур, заданный координатами (x_i, y_i, z_i) его n узлов, $i = 1 \dots n$. Отметим, что при $n > 3$ узлы в общем случае не лежат в одной плоскости.

Алгоритм содержит следующие шаги.

1. Вырезание части облака, находящегося внутри контура. Все дальнейшие расчеты происходят на этом вырезанном облаке.

2. Построение поверхности, проходящей через узловые точки, методом триангуляции Делоне или построение аппроксимирующей плоскости, расстояние от которой до узловых точек минимально. В данном алгоритме предложен вариант с аппроксимирующей плоскостью, так как он проще, быстрее и обеспечи-

вает точность, достаточную для решения большинства практических задач.

Уравнение плоскости ищется в общем виде

$$Ax + By + Cz + D = 0. \quad (3)$$

Значения коэффициентов A, B, C, D , при которых сумма расстояний S от плоскости до узловых точек контура минимальна, находятся методом наименьших квадратов. Для этого решается система уравнений частных производных по каждому неизвестному:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial A} &= 2 \times \sum_{i=1}^n ((Ax_i + By_i + Cz_i + D) \times x_i) = 0; \\ \frac{\partial S}{\partial B} &= 2 \times \sum_{i=1}^n ((Ax_i + By_i + Cz_i + D) \times y_i) = 0; \\ \frac{\partial S}{\partial C} &= 2 \times \sum_{i=1}^n ((Ax_i + By_i + Cz_i + D) \times z_i) = 0; \\ \frac{\partial S}{\partial D} &= 2 \times \sum_{i=1}^n (Ax_i + By_i + Cz_i + D) = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Если в результате решения системы (4) получилось значение $C = 0$, то средняя плоскость основания перпендикулярна плоскости XOY , алгоритм возвращает $V = 0$ и прекращает работу.

3. Определение типа рассчитываемого объема (положительной формы рельефа – «холм» или отрицательной – «впадина»). Построение профиля между точками контура (x_{\min}, y_i, z_i) и (x_{\max}, y_j, z_j) и определение среднего значения координаты z_{av} профиля. При знак рассчитывается как

$$f = \begin{cases} -1, & \text{если } z_{av} < \frac{z_i + z_j}{2}; \\ 1, & \text{если } z_{av} \geq \frac{z_i + z_j}{2}. \end{cases} \quad (5)$$

При $f = -1$ мы имеем дело с «впадиной», при $f = 1$ – с «холмом».

4. Построение плоскости α , проходящей параллельно плоскости XOY через точку с координатами (x_i, y_i, z_m) , где $z_m = \min(z_i \cdot f)$, $i=1 \dots n$. Задание регулярной сетки на плоскости α . Шаг сетки r , одинаковый по осям OX и OY , задается с учетом соотношений (1) и (2). Интерес представляет сетка под / над облаком, ограниченная

прямоугольником с координатами вершин $(x_{\min}, y_{\min}), (x_{\min}, y_{\max}), (x_{\max}, y_{\min}), (x_{\max}, y_{\max})$.

5. Восстановление поверхности из облака точек с использованием одного из известных методов – альфа-формы, поворота шара, шагающих кубов, реконструкции Пуассона или других. Построение Q – полигональной поверхности облака точек (рис. 1).

6. Определение координат z_{ij}^Q полигональной поверхности относительно плоскости α (за вычетом z_m) в узловых точках сетки $(x_i, y_j), i = 0 \dots n, j = 0 \dots m$. Здесь

$$n = \left\lfloor \frac{x_{\max} - x_{\min}}{r} \right\rfloor, m = \left\lfloor \frac{y_{\max} - y_{\min}}{r} \right\rfloor. \quad (6)$$

Операция $\lfloor a \rfloor$ – наименьшее целое, большее либо равное a , ближайшее целое справа. Если в узле с координатами i и j нет точек поверхности, принимаем $z_{ij}^Q = 0$.

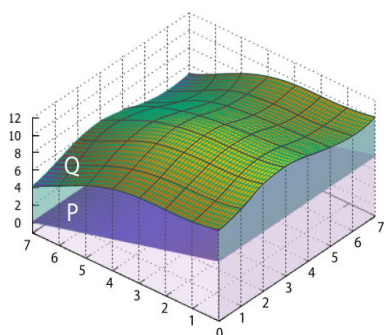


Рис. 1. Определение координат полигональной поверхности относительно средней плоскости

7. Определение относительных координат z_{ij}^P , плоскости $Ax + By + Cz + D = 0$ в узловых точках сетки $(x_i, y_j), i=0 \dots n, j=0 \dots m$:

$$z_{ij}^P = \begin{cases} \frac{D - Ax_i - By_j}{C} - z_m, z_{ij}^Q \neq 0 \\ 0, z_{ij}^Q = 0 \end{cases}. \quad (7)$$

8. Расчет объема производится суммированием объемов всех $n \times m$ прямоугольных параллелепипедов, основание которых соответствует ячейке сетки, а высота h рассчитывается как среднее арифметическое высот точек в углах ячейки:

$$V = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m (r^2 \times h_{ij}). \quad (8)$$

При необходимости при расчете h_{ij} вместо среднего арифметического можно взять более точную метрику, основанную не на значениях координаты z_{ij} в узлах решетки, а учитывающую значения координаты z внутри ячейки.

9. По формулам (6)–(8) рассчитываются объемы V^Q и V^P , ограниченные внутри заданного контура горизонтальной плоскостью α и, соответственно, поверхностью Q или плоскостью P .

10. Искомый объем вычисляется как разность объемов под пуассоновской поверхностью Q и под аппроксимирующей плоскостью P (в случае «впадины» – над ними):

$$V = V^Q - V^P. \quad (9)$$

Значение V получается отрицательным для «впадины» и положительным для «холма».

Обсуждение

Предложенный метод определения объема реализован в программном обеспечении МПТС [32].

Реализованный в нем инструмент определения объема позволяет управлять количеством итераций по определению объема (рис. 2). Чем больше количество измерений, тем ближе полученное значение к искомому. Итерации нам нужны для того, чтобы минимизировать влияние выбора шага сетки на результат расчета. Таким образом, увеличивая количество итераций, мы увеличивали точность полученного результата.

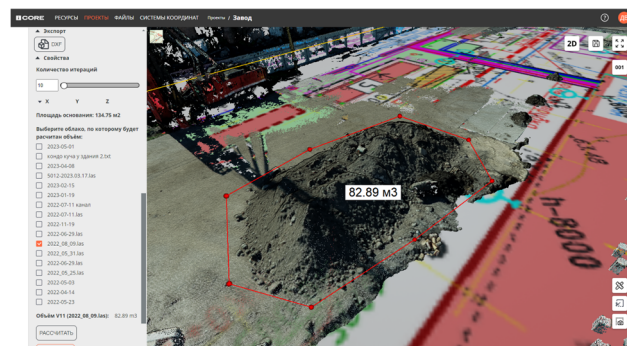


Рис. 2. Инструмент определения объема в МПТС

Для определения объема объекта, полученного в результате лазерного сканирования, можно использовать также вероятностный подход, в частности, метод Монте-Карло [33].

Суть метода состоит в следующем. Объект вырезается из облака и заключается внутрь призмы заданного размера. Затем генерируется множество мощностью N случайных точек, равномерно распределенных по всему объему призмы. Часть сгенерированных точек попадет внутрь объекта, часть останется за его пределами. Искомый объем при достаточно большом N будет близок к величине, равной объему призмы, умноженному на отношение количества сгенерированных точек, оказавшихся внутри целевого объекта, к общему количеству сгенерированных точек.

Достоинствами метода являются его простота, возможность определения объемов объектов сложной формы, метод не требует реконструкции поверхности. Среди недостатков отмечается то обстоятельство, что погрешность метода зависит от количества сгенерированных точек, при этом увеличение их количества увеличивает и время вычислений. Точность оценки также зависит от качества исходного облака точек. Определенную сложность представляет реализация критерия попадания точки внутри целевой области.

Заключение

В рамках исследования была выполнена программная реализация математического

алгоритма определения объема трехмерного объекта, не имеющего «нависания». Разработанное программное обеспечение было апробировано в процессе строительства объекта капитального строительства. Так, при апробировании алгоритма средняя погрешность определения составила 2 % от общего объема. Реализованный программный компонент позволяет контролировать объемы материалов на строительной площадке (кучи песка, щебня на строительных площадках, поддоны с кирпичом и т. д.) и может использоваться при создании программных решений для информационного обеспечения строительных работ.

Положительные результаты апробации алгоритма обработки облаков точек позволяют предположить, что аналогичным образом могут быть реализованы алгоритмы определения геометрических параметров объектов мониторинга, таких как определение параметров элементов опор ЛЭП, стрелы провеса провода, габарита приближения провода к земле и других параметров, информация о которых необходима для обеспечения безопасной эксплуатации объектов инфраструктуры.

Огромное поле деятельности с применением разработанного программного продукта существует при решении геологических задач: определение объема выработки карьеров по данным периодических съемок, вычисление объемов вулканических куполов, конусов, лавовых и пирокластических потоков, имеющих самые разнообразные формы и генезис [34–37].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Комиссаров А. В., Алтынцев М. А. Метод активного дистанционного зондирования: лазерное сканирование : монография. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – 254 с.
2. Медведев Е. М., Данилин И. М., Мельников С. Р. Лазерная локация земли и леса : учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Геолидар, Геоскосмос; Красноярск : Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2007. – 230 с.
3. Новаковский Б. А., Кудрявцев А. В., Энтин А. Л. Использование материалов воздушного лазерного сканирования при картографировании рельефа // Геоинформатика. – 2020. – № 2. – С. 27–34. – EDN FNRUOA.
4. Середович В. А., Алтынцев М. А., Попов Р. А. Особенности применения данных различных видов лазерного сканирования при мониторинге природных и промышленных объектов // Вычислительные технологии. – 2013. – Т. 18 – Спец. выпуск. – С. 141–144. – EDN ТААНPD.
5. Höfle B., Rutzinger M. Topographic airborne LiDAR in geomorphology: A technological perspective // Zeitschrift für Geomorphologie. – 2011. – V. 55. – Supp. Issue 2. – P. 1–29. – DOI 10.1127/0372-8854/2011/0055S2-0043.

6. Wulder M. A., Hall R. J., Coops N. C., Franklin S. E. High spatial resolution remotely sensed data for ecosystem characterization // *BioScience*. – 2004. – V. 54 (6). – P. 511–521. – DOI 10.1641/0006-3568(2004)054[0511:HSRRSD]2.0.CO;2.

7. Долгополов Д. В., Баборькин М. Ю., Мелкий В. А. Мониторинг опасных геологических процессов при строительстве и эксплуатации объектов трубопроводного транспорта по данным дистанционного зондирования Земли // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. науч. конгр.*, 19–21 мая 2021 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 4 : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. № 1. – С. 25–32. – DOI 10.33764/2618-981X-2021-4-1-25-32. – EDN CZDJRR.

8. Долгополов Д. В., Мелкий В. А., Верхотуров А. А. Геоинформационное обеспечение безопасной эксплуатации трубопроводного транспорта // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 12. – С. 52–63. – DOI 10.18799/24131830/2021/12/3028. – EDN ZAFHWP.

9. Жарников В. Б. Рациональное использование земель как задача геоинформационного пространственного анализа // *Вестник СГГА*. – 2013. – Вып. 3 (23). – С. 77–81. – EDN RDTMSF.

10. Карпик А. П., Мусихин И. А., Ветошкин Д. Н. Интеллектуальные информационные модели территорий как эффективный инструмент пространственного и экономического развития // *Вестник СГУГиТ*. – 2021. – Т. 26, № 2. – С. 155–163. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-155-163. – EDN FXIMIO.

11. Кирсанова Л. А., Пономарчук Ю. В. Сравнительный анализ алгоритмов построения трехмерной модели сцены // *Актуальные теоретико-методологические и прикладные проблемы виртуальной реальности и искусственного интеллекта : материалы Международной научной конференции, Хабаровск, 27–28 мая 2021 года*. – Хабаровск : Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2021. – С. 106–109. – EDN НКQMPR.

12. Маркелов Д. А., Мелкий В. А., Долгополов Д. В., Акользин А. П., Алешко-Ожевская О. С. Использование ГИС-технологий и материалов аэрокосмической съемки для анализа дефектов трубы магистральных нефтепроводов и источников их возникновения // *Практика противокоррозионной защиты*. – 2021. – Т. 26. – № 3. – С. 17–21. – DOI 10.31615/j.corros.prot.2021.101.3-2. – EDN XFGUFU.

13. GIS, Spatial Analysis, and Modeling / Eds. D. J. Maguire, M. Batty, M. F Goodchild. – Redlands, California: ESRI Press, 2005. – 480 p.

14. ПО Leica Cyclone для обработки 3D-облака точек [Электронный ресурс] // *Leica Geosystems AG – Part of Hexagon*. – URL: <https://leica-geosystems.com/ru/products/laser-scanners/software/leica-cyclone?redir=w148> (дата обращения 25.12.2023).

15. Autodesk Civil 3D: Comprehensive detailed design and documentation software for civil infrastructure [Электронный ресурс] // *Сайт Autodesk*. – URL: <https://www.autodesk.com/products/civil-3d/overview?term=1-YEAR&tab=subscription&plc=CIV3D> (дата обращения 25.12.2023).

16. Белозеров Н. И., Пономарчук Ю. В. Сравнительный анализ методов восстановления трехмерной модели объекта при выполнении трехмерной реконструкции // *Современные тенденции и проекты развития информационных систем и технологий : материалы Межрегиональной научно-исследовательской конференции, Хабаровск, 26 мая 2021 года*. – Хабаровск : РИЦ ХГУЭП, 2021. – С. 41–47. – DOI 10.38161/978-5-7823-0747-9-2021-41-47. – EDN PLEHGB.

17. Andrade-Loarca H., Hege J., Cremers D., Kutyniok G. (2023). Neural Poisson Surface Reconstruction: Resolution-Agnostic Shape Reconstruction from Point Clouds [Electronic resource] // *arXiv:2308.01766v3 [cs.CV]* 28 Nov 2023. – P. 1–9. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2308.01766v3.pdf> (дата обращения 25.12.2023).

18. Kazhdan M., Bolitho M., Hoppe H. Poisson Surface Reconstruction [Electronic resource] // *Eurographics Symposium on Geometry Processing, 2006*. – URL: <https://hhoppe.com/poisson-recon.pdf> (дата обращения 25.12.2023).

19. Fundamentals of Surfaces [Electronic resource] // ArcGIS Desktop. – URL: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/3d-analyst/fundamentals-of-3d-surfaces.htm> (дата обращения 25.12.2023).
20. Zhang W., Qi J., Peng W., Wang H., Xie D., Wang X., Yan G. An Easy-to-Use Airborne LIDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation // *Remote Sensing*. – 2016. – V. 8 (6). – P. 501. – DOI 10.3390/rs8060501.
21. Zhang K., Chen S. C., Whitman D., Shyu M. L., Yan J., Zhang C. A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data. *Geoscience and Remote Sensing // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2003. – V. 41(4). – P. 872–882. – DOI 10.1109/TGRS.2003.810682.
22. Bartels M., Wei H. Threshold-free object and ground point separation in LIDAR data // *Pattern Recognition Letters*. – 2010. – V. 31 (10). – P. 1089–1099. – DOI 10.1016/j.patrec.2010.03.007.
23. Pingel T. J., Clarke K. C., McBride W. A. An Improved Simple Morphological Filter for the Terrain Classification of Airborne LIDAR Data // *ISPRS International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2013. – V. 77. – P. 21–30. – DOI 10.1016/j.isprsjprs.2012.12.002.
24. Дьяченко Р. А., Гура Д. А., Беспячук Д. А., Самарин С. В., Андриющенко А. В. Разработка методики классификации точек лазерного отражения на основе программного обеспечения Bentley Microstation // *Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ»*. – 2023. – № 1. – С. 28–35. – EDN PMGCEU.
25. Amenta N. and Bern M. Surface reconstruction by Voronoi filtering // *Discrete and Computational Geometry*, (1999). – V. 22. – P. 481–504. – DOI 10.1007/PL00009475. – EDN AVQMWN.
26. Bernardini F., Mittleman J., Rushmeier H., Silva C., & Taubin G. The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction // *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. – 1999. – V. 5(4). – P. 349–359. – DOI 10.1109/2945.817351.
27. Edelsbrunner H., Kirkpatrick D. G. and Seidel R. On the Shape of a Set of Points in the Plane // *IEEE Transactions on Information Theory*, 1983. – Vol. 29 (4). – P. 551–559. – DOI 10.1109/TIT.1983.1056714.
28. López D., Espadero J. M., Rodriguez A., Pastor L. Delaunay surface reconstruction from scattered points // *Discrete Geometry for Computer Imagery. 9th International Conference, DGCI 2000, Sweden, Uppsala, December 13–15. – 2000. – P. 10.*
29. Lorensen W., Cline H. Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm // *ACM (Association for Computing Machinery's) Computer Graphics*. – 1987. – Vol. 21. – No 4. – P. 163–169. – DOI 10.1145/37401.37422.
30. Tran T.-T., Cao V.-T., Laurendeau D. Extraction of cylinders and estimation of their parameters from point clouds // *Computers & Graphics*. – 2015. – Vol. 46. – P. 345–357. – DOI 10.1016/j.cag.2014.09.027.
31. Середович А. В., Горохова Е. И., Ситуха О. А. Определение геометрических параметров элементов опор ЛЭП с использованием наземного лазерного сканирования // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.)*. – Новосибирск : СГГА, 2013. – Т. 1 (3). – С. 128–133. – EDN QITVKF.
32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022662888. Технологическая цифровая платформа мониторинга природно-технологической среды; дата регистрации 07.07.2022; опубликовано 07.07.2022 [Электронный ресурс] / Д. В. Долгополов, Р. А. Камашев, Д. С. Назаров, М. С. Удовиченко; правообладатель Закрытое акционерное общество «Ай Ко». – М. : Федеральная служба по интеллектуальной собственности, Российская Федерация. – Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_49198307_61108071.PDF (дата обращения 25.12.2023).
33. Covre N., Luchetti A., Lancini M., Pasinetti S., Bertolazzi E., De Cecco M. Monte Carlo-based 3D surface point cloud volume estimation by exploding local cubes faces. *ACTA IMEKO (International Measurement Confederation)*. – 2022. – Vol. 11 (2). – P. 1–9. – DOI 10.21014/acta_imeko.v11i2.1206.
34. Малеев Е. Ф. Вулканыты : справочник. – М. : Недра, 1980. – 240 с.

35. Жаринов Н. А., Демянчук Ю. В. Мониторинг образования экструзивного купола вулкана Шивелуч в 1980–2007 гг. по геодезическим наблюдениям и видеосъемке // Вулканология и сейсмология. – 2008. – № 4. – С. 3–13. – EDN JHMZUB.

36. Озеров А. Ю. Ключевской вулкан: вещество, динамика, модель. – М. : Геос, 2019. – 306 с.

37. Мелкий В. А., Черниговский Ю. М., Марчуков В. С., Долгополов Д. В. Прогнозирование взрывных вулканических извержений по данным дистанционного зондирования // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1998. – № 3. – С. 123–129. – EDN WGYCZF.

Об авторах

Евгения Олеговна Палехова – руководитель группы аналитики отдела управления проектами закрытого акционерного общества «Ай Ко».

Даниил Валентинович Долгополов – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории разработки и ведения геоинформационных систем и баз данных центра мониторинга и геоинформационных систем объектов трубопроводного транспорта.

Вячеслав Анатольевич Мелкий – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности.

Получено 19.02.2024

© Е. О. Палехова, Д. В. Долгополов, В. А. Мелкий, 2025

Implementation of mathematical algorithms for processing laser scanning data in geographic information system tools when monitoring relief changes

E. O. Palekhova¹, D. V. Dolgoplov², V. A. Melkiy³

¹ Closed joint-stock company "Ay Co", Moscow, Russian Federation

² Research Institute of Pipeline Transport

(Transneft Research Institute LLC), Moscow, Russian Federation

³ Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch RAS,
Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation

e-mail: vamelkiy@mail.ru

Abstract. The purpose of the work is to develop an algorithm for calculating the volume of a 3D object that does not have an overhang. The article presents the results of the development of an algorithm that can be used to determine volume from a point cloud obtained during laser scanning. The article provides a brief description of the algorithm, and concludes with an example of a software implementation of the algorithm and its testing. The main sources of information are information from open literature sources on methods and algorithms for automated processing of laser scanning data. The algorithm was tested using GIS technologies. The object of the study was algorithms implemented in well-known methods of processing laser scanning data. The research allowed us to develop an algorithm based on the use of numerical double integration, the volume of a body is represented as the sum of the volumes of rectangular parallelepipeds, and the surface is reconstructed using the Poisson method. The proposed volume determination method is implemented in the MPTS software. The volume determination is performed with a different number of volume determination iterations, which make it possible to minimize the impact of choosing the grid step on the calculation result and increase the accuracy of the result. The average error of the determination during testing of the algorithm was 2% of the total volume.

Keywords: point cloud, laser scanning, surface reconstruction, Delaunay triangulation, Poisson method, geoinformation technologies, land monitoring

REFERENCES

1. Komissarov, A. V., & Altyntsev, M. A. (2020). *Metod aktivnogo distancionnogo zondirovaniya: lazernoe skanirovanie* [Active remote sensing method: laser scanning]. Novosibirsk: SSUGT Publ., 254 p. [in Russian].
2. Medvedev, E. M., Danilin, I. M., & Mel'nikov, S. R. (2007). *Lazernaya lokatsiya zemli i lesa: Uchebnoe posobie* [Laser location of land and forests: Textbook.]. 2-nd ed., revised and additional. Moscow: Geolidar, Geoskosmos; Krasnoyarsk: Forest Institute named after V. N. Sukachev SB RAS, 230 p. [in Russian].
3. Novakovskiy, B. A., Kudryavtsev, A. V., & Entin, A. L. (2020). Ispol'zovanie materialov vozdushnogo lazernogo skanirovaniya pri kartografirovanii rel'efa [Using of Airborne Laser Scanning Data to Topography Mapping]. *Geoinformatika* [Geoinformatics], 2, 27–34, EDN FNRUOA. [in Russian].
4. Seredovich, V. A., Altyntsev, M. A., & Popov, R. A. (2013). Osobennosti primeneniya dannykh razlichnykh vidov lazernogo skanirovaniya pri monitoringe prirodnykh i promyshlennykh obektov [Features of the use of data from various types of laser scanning in monitoring natural and industrial objects]. *Vychislitel'nye tekhnologii* [Computational technologies], 18 (Spetsial'nyy vypusk), 141–144, EDN TAAHPD. [in Russian].
5. Höfle, B., & Rutzinger, M. (2011). Topographic airborne LiDAR in geomorphology: A technological perspective. *Zeitschrift für Geomorphologie* [Journal of Geomorphology], 55(Supp. Issue 2), 1–29. DOI 10.1127/0372-8854/2011/0055S2-0043. [in German].
6. Wulder, M. A., Hall, R. J., Coops, N. C., & Franklin, S. E. (2004). High spatial resolution remotely sensed data for ecosystem characterization. *BioScience*, 54 (6), 511–521. DOI 10.1641/0006-3568(2004)054[0511:HSRRSD]2.0.CO;2.
7. Dolgoplov, D. V., Baborykin, M. Yu., & Melkiy, V. A. (2021). Monitoring of hazardous geological processes during the construction and operation of pipeline transport facilities using Earth remote sensing data. *Interekspos Geo-Sibir'* [Interexpo Geo-Siberia], 4(1), 25–32. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1-25-32. EDN CZDJRR [in Russian].
8. Dolgoplov, D. V., Melkiy, V. A., & Verkhoturov, A. A. (2021) Geoinformation support for safe operation of pipeline transport. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 332, 12, 52–63, DOI 10.18799/24131830/2021/12/3028. EDN ZAFHWP [in Russian].
9. Zharnikov, V. B. (2013). Rational use of land as a task of geoinformation spatial analysis. *Bulletin of the Siberian State Geodetic Academy*, 23(3), 77–81. EDN RDTMSF [in Russian].
10. Karpik, A. P., Musikhin, I. A., & Vetoshkin, D. N. (2021). Smart information models as an effective tool of regional spatial and economic development. *Vestnik SGUGT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 26(2), 155–163, DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-155-163. EDN FXIMIO [in Russian].
11. Kirsanova, L. A., & Ponomarchuk, Yu. V. (2021). Comparative analysis of Algorithms for Constructing a Three-dimensional Model of the Scene. *Aktual'nye teoretiko-metodologicheskie i prikladnye problemy virtual'noy real'nosti i iskusstvennogo intellekta : materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Actual theoretical, methodological and applied problems of virtual reality and artificial intelligence : Proceedings of the Interuniversity scientific conference, Khabarovsk, May 27-28], 2021. Khabarovsk: Far Eastern State Transport University, 106–109. EDN HKQMPR [in Russian].
12. Markelov, D. A., Melkiy, V. A., Dolgoplov, D. V., Akolzin, A. P., & Aleshko-Ozhevskaya, O. S. (2021). The use of GIS technologies and aerospace survey materials for the analysis of pipe defects in main oil pipelines and the sources of their occurrence. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 26(3), 17–21. DOI 10.31615/j.corros.prot.2021.101.3-2. EDN XFGUFU [in Russian].
13. *GIS, Spatial Analysis, and Modeling*. (2005). Eds. D. J. Maguire, M. Batty, M. F Goodchild. Redlands, California: ESRI Press, 480 p.
14. *Leica Cyclone software for processing 3D point clouds*. Leica Geosystems AG – Part of Hexagon. Retrieved from <https://leica-geosystems.com/ru/products/laser-scanners/software/leica-cyclone?redir=w148> (accessed 25.12.2023).

15. Autodesk Civil 3D: Comprehensive detailed design and documentation software for civil infrastructure. Website Autodesk. Retrieved from <https://www.autodesk.com/products/civil-3d/overview?term=1-YEAR&tab=subscription&plc=CIV3D> (accessed 25.12.2023).
16. Belozеров, N. I. & Ponomarchuk, Yu. V. (2021). Comparative analysis of methods for restoring a three-dimensional model of an object when performing three-dimensional reconstruction. *Sovremennye tendentsii i proekty razvitiya informatsionnykh sistem i tekhnologii : materialy Mezhdregional'noy nauchno-issledovatel'skoy konferentsii, Khabarovsk, 26 Maya 2021 goda*. [Modern trends and projects for the development of information systems and technologies : Proceedings of the Inter-regional Scientific Research Conference, Khabarovsk, May 26, 2021]. Khabarovsk: RIC KHGUPEP, 41-47. – DOI 10.38161/978-5-7823-0747-9-2021-41-47. EDN PLEHGB. [in Russian].
17. Andrade-Loarca, H., Hege, J., Cremers, D., & Kutyniok, G. (2023). Neural Poisson Surface Reconstruction: Resolution-Agnostic Shape Reconstruction from Point Clouds. *ArXiv:2308.01766v3 [cs.CV] 28 Nov 2023*, 1–9. Retrieved from <https://arxiv.org/pdf/2308.01766v3.pdf> (accessed 25.12.2023).
18. Kazhdan, M. Bolitho, M., & Hoppe, H. (2006). Poisson Surface Reconstruction. *Eurographics Symposium on Geometry Processing*. Retrieved from <https://hhoppe.com/poisson-recon.pdf> (accessed 25.12.2023).
19. Fundamentals of Surfaces. *ArcGIS Desktop*. Retrieved from: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/3d-analyst/fundamentals-of-3d-surfaces.htm> (accessed 25.12.2023).
20. Zhang, W., Qi, J., Peng, W., Wang, H., Xie, D., Wang, X., & Yan, G. (2016). An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. *Remote Sensing*, 8 (6), 501. DOI 10.3390/rs8060501.
21. Zhang, K., Chen, S.C., Whitman, D., Shyu, M. L., Yan, J., Zhang, C. (2003). A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(4), 872–882. DOI 10.1109/TGRS.2003.810682.
22. Bartels, M., Wei, H. (2010) Threshold-free object and ground point separation in LIDAR data. *Pattern Recognition Letters*, 31(10), 1089–1099. DOI 10.1016/j.patrec.2010.03.007.
23. Pingel, T. J., Clarke K. C., McBride W. A. (2013). An Improved Simple Morphological Filter for the Terrain Classification of Airborne LIDAR Data. *ISPRS International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 77, 21–30. DOI 10.1016/j.isprsjprs.2012.12.002.
24. Dyachenko, R. A., Gura, D. A., Bespyatchuk, D. A., Samarin, S. V., & Andryushchenko, A. V. (2023). Development of a laser reflection point classification method based on Bentley Microstation software. *Scientific Works of the Kuban State Technological University*, 1, 28–35. EDN PMGCEU. [in Russian].
25. Amenta, N. and Bern, M. (1999). Surface reconstruction by Voronoi filtering. *Discrete and Computational Geometry*, 22, P. 481–504. DOI 10.1007/PL00009475. EDN AVQMWN.
26. Bernardini, F., Mittleman, J., Rushmeier, H., Silva, C., & Taubin, G. (1999). The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 5(4), 349-359. DOI 10.1109/2945.817351.
27. Edelsbrunner, H., Kirkpatrick, D. G. & Seidel, R. (1983). On the Shape of a Set of Points in the Plane. *IEEE Transactions on Information Theory*, 29 (4): 551–559. DOI 10.1109/TIT.1983.1056714.
28. López, D., Espadero, J. M., Rodriguez, A., & Pastor, L. (2000). Delaunay surface reconstruction from scattered points. *Discrete Geometry for Computer Imagery. 9th International Conference, DGCI 2000, Sweden, Uppsala, December 13–15*, P. 10.
29. Lorensen, W., Cline, H. (1987). Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm. *ACM (Association for Computing Machinery's) Computer Graphics*, 21(4), 163–169. DOI 10.1145/37401.37422.
30. Tran, T.-T., Cao, V.-T., & Laurendeau, D. (2015). Extraction of cylinders and estimation of their parameters from point clouds. *Computers & Graphics*, 46, 345–357. DOI 10.1016/j.cag.2014.09.027.
31. Seredovich, A.V., Gorokhova, E. I., Situkha, O. A. (2013). Determination of geometric parameters of transmission tower elements using terrestrial laser scanning. *Interespo Geo-Sibir' [Inter-expo Geo-Siberia]*, 1(3), 128–133. EDN QITVKF. [in Russian].

32. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2022662888. Tekhnologicheskaya tsifrovaya platforma monitoringa prirodno-tekhnologicheskoy sredy* [Certificate of state registration of computer program No 2022662888. Technological digital platform for monitoring the natural and technological environment]; registration date 07.07.2022; published 07.07.2022 / D. V. Dolgopolov, R. A. Kamashev, D. S. Nazarov, M. S. Udovichenko; Copyright holder Closed Joint Stock Company "I Co". M.: Federal Service for Intellectual Property, Russian Federation. Retrieved from: https://elibrary.ru/download/elibrary_49198307_61108071.PDF (accessed 25.12.2023) [in Russian].
33. Covre, N., Luchetti, A., Lancini, M., Pasinetti, S., Bertolazzi, E., De Cecco, M. (2022). Monte Carlo-based 3D surface point cloud volume estimation by exploding local cubes faces. *ACTA IMEKO (International Measurement Confederation)*, 11(2), 1–9. DOI 10.21014/acta_imeko.v11i2.1206.
34. Maleev E. F. (1980). *Vulkanity: spravochnik [Volcanic rocks: reference book]*. Moscow, Nedra, – 240 p. [in Russian].
35. Zharinov, N. A., Demyanchuk, Yu. V. (2008). The growth of an extrusive dome on Shiveluch volcano, Kamchatka in 1980–2007: Geodetic observations and Video surveys. *Journal of Volcanology and Seismology*, 2(4), 217–227. EDN JHMZUB [in Russian].
36. Ozerov, A. Yu. (2019). *Klyuchevskoy vulkan: veshchestvo, dinamika, model' [Klyuchevskoy volcano: substance, dynamics, model]*. – Moscow: Geos, – 306 p. [in Russian].
37. Melkiy, V. A., Chernigovskiy, Yu. M., Marchukov, V. S., Dolgopolov, D. V. (1998). Prognozirovanie vzryvnykh vulkanicheskikh izverzheniy po dannym distantsionnogo zondirovaniya [Forecasting explosive volcanic eruptions based on remote sensing data]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and aerophotosurveying*, 3, 123–129. EDN WGYCZF [in Russian].

Author details

Evgeniya O. Palekhova – Head of the analytics group.

Daniil V. Dolgopolov – D. Sc., Leading Researcher at the laboratory for the development and maintenance of geographic information systems and databases of the monitoring center and geographic information systems of pipeline transport facilities.

Vyacheslav A. Melkiy – D. Sc., Leading Researcher, Laboratory of Volcanology and Volcanic Hazard.

Received 19.02.2024

© E. O. Palekhova, D. V. Dolgopolov, V. A. Melkiy, 2025