

Совершенствование измерений объемных объектов по данным лазерного сканирования*

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-12-37-43>

Цель исследования – разработать и апробировать методику измерения объемов трехмерных объектов, позволяющую повысить точность результатов и скорость их получения. По сравнению с существующими подходами к обработке данных лазерного сканирования предложено использовать одну и только одну плоскость для создания полигона-основания объекта, помещать полигон-основание и плотное облако точек в мировую систему координат. Тестирование методики, реализованной в веб-приложении, на геометрических примитивах, показало высокую точность и повышение быстродействия. Далее выполнены съемки насыпных складов разного размера различными способами – наземная съемка с использованием тахеометров, аэрофотосъемка, воздушное лазерное сканирование. Показаны высокая сходимости результатов этой методики со стандартными подходами, а также достаточно высокая степень точности. Методика дает возможность быстро и достаточно точно определять объем насыпных объектов, в том числе складов угля, породных отвалов; ее применение перспективно для контроля состояния эрозии отвалов, потенциально возможных наклонов и обрушений массы угля, находящейся на складах и др.

Ключевые слова: емкость склада, измерение объема, лазерное сканирование, плотное облако точек, маркшейдерская съемка, цифровые технологии.

Для цитирования: Совершенствование измерений объемных объектов по данным лазерного сканирования / А.О. Рада, А.Д. Кузнецов, И.Л. Непомнищев и др. // Уголь. 2023. № 12. С. 37–43. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-12-37-43.

РАДА А.О.

Канд. экон. наук, директор Института цифры ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: rada.ao@kemsu.ru

КУЗНЕЦОВ А.Д.

Директор Центра геодезии, аэросъемки и кадастровых работ Института цифры ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: adkuz@inbox.ru

НЕПОМНИЩЕВ И.Л.

Начальник сектора геодезии Центра геодезии, аэросъемки и кадастровых работ Института цифры ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: i.nepomnischev@i-digit.ru

КОНЬКОВ Н.Ю.

Ведущий программист отдела разработок Института цифры ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: n.konkov@i-digit.ru

* Исследование выполнено в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 № 1144-р, номер соглашения 075-15-2022-1195 от 30.09.2022.



ВВЕДЕНИЕ

При проведении земельных работ, в угольной промышленности актуальна задача точного измерения объемов выемки и насыпи, а также контроля геометрических параметров таких объектов, включая степень наклона, эрозию под влиянием осадков и т.д. [1]. Для этого используются результаты маркшейдерской или геодезической съемки, позволяющие получить габаритные параметры, геометрические измерения складов и отвалов, по которым затем рассчитываются итоговые результаты [2].

В настоящее время существует ряд технологий и методов для проведения таких измерений, включая лазерное сканирование [3], фотограмметрию [4, 5], аэрофотосъемку с беспилотных воздушных судов (БВС) [6, 7] и др. Выбор конкретного метода должен обуславливаться в первую очередь критерием достаточной точности измерений, важны также скорость и стоимость выполнения работ [8]. Перспективным считается метод лазерного сканирования, в ходе которого из плотного облака точек формируется трехмерная модель объекта с последующим расчетом его геометрических параметров.

Использование лазерного сканирования для измерения объемов трехмерных объектов обсуждается в ряде отечественных и зарубежных научных публикаций. Например, исследование Р.М. Гаго (R.M. Gago) демонстрирует преимущества программно-аппаратного комплекса, включающего БВС с лазерными сканерами, для автоматизации учета запасов сыпучих материалов [9]. А.Ю. Кротенок и др. показали, что при использовании в горной промышленности точность геопозиционирования на основе трехмерных облаков точек близка к точности на основе точек GCP из GPS-съемки [10].

Тем не менее существующие подходы и технологии трехмерного лазерного сканирования для измерения складов и отвалов обладают определенными ограничениями, что требует их дальнейшего развития. Как известно, задача нахождения объема трехмерного объекта по результатам лазерного сканирования является стандартной задачей компьютерной графики. Существующие алгоритмы предполагают, что на замкнутой плоскостной фигуре – полигоне-основании строится трехмерный объект по полученным в ходе сканирования точкам, для определения принадлежности точки объекту применяется метод трассировки лучей по координатам x и y , формируется полигональная сетка (меш) путем триангуляции Делоне, после чего рассчитывается непосредственно объем изучаемой модели [11]. Данный подход обладает следующими недостатками:

- искажение результатов в случае, когда плоскость основания изучаемого объекта имеет неправильную геометрическую форму (впадины, прогибы, наклон и т.п.). Это обусловлено сложностью (а часто физической невозможностью) корректной установки опорных точек для лазерного сканирования полигона, что, в свою очередь, приводит к неверному определению основания измеряемого объекта на плоскости;

- триангуляция полигона каждый раз дает разные результаты, поскольку они зависят от расположения точек в координатах $(x; y)$ по отношению друг к другу, пользова-

тель не может вмешиваться в данный процесс и корректировать его. Это также приводит к недостаточной точности измерений;

- при обработке облаков, содержащих 100 тыс. точек и более (а в ряде случаев их количество будет намного выше), существенно замедляется скорость расчетов и (или) растет потребность в вычислительных мощностях.

Фундаментальная причина появления данных недостатков – существующий подход к построению плоскости основания, по которому далее проводится расчет объемных характеристик. Во-первых, плоскость основания задается несколькими треугольниками, которые не всегда находятся в одной плоскости. Поэтому могут быть получены разные результаты расчета объема одного и того же объекта в зависимости от расстановки точек полигона-основания. Во-вторых, при расчетах для каждой призмы (соответствующей определенному треугольнику) как элемента объемного объекта каждый раз необходимо определять сегмент основания, рассчитывать проекцию призмы на него, что увеличивает сложность и длительность расчетов.

Исходя из сказанного, цель данного исследования – разработать и апробировать методику измерения объемов трехмерных объектов, позволяющую повысить точность результатов и скорость их получения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для разработки методики авторами принята гипотеза о том, что основание измеряемых объектов представляет собой плоскость, следовательно, все ее точки имеют единую координату $z = 0$. Принятие гипотезы дает возможность сократить объем расчетов, поскольку высота ребер призмы будет находиться только с использованием текущей координаты z по сравнению с z_0 . Это достигается благодаря помещению координат плоскостного основания изучаемого объекта в локальную систему координат $(x; y)$. Следует отметить, что лазерное сканирование, вообще говоря, не предназначено для получения данных о геометрической конфигурации поверхностей, на которых располагаются склады или отвалы, не может и не должно их предоставлять. Определить это можно, только полностью очистив поверхность насыпного материала, что на практике не является реальным.

Поскольку в разрабатываемой методике используется только одна плоскость-основание, то она описывается уравнением $A_x + B_y + C_z + D = 0$, где параметры A, B, C, D определяются методом наименьших квадратов. При этом расстояние d от произвольной точки с координатами (x, y, z) будет равно $A_x + B_y + C_z + D$. Наглядная иллюстрация такого расчета приведена на рис. 1.

Использование единого полигона-основания позволяет использовать единую плоскость для всей трехмерной модели объекта. В рамках существующих подходов, тем не менее, все равно потребовалось бы делать отдельный расчет проекции каждого «среза»-треугольника в трехмерной модели, причем триангуляция Делоне предполагает дублирование расчетов. Это вызвано тем, что параметры общей грани смежных треугольников используются в вычислениях два раза. Это замедляет расчеты и (или) требует более высокой вычислительной мощности.

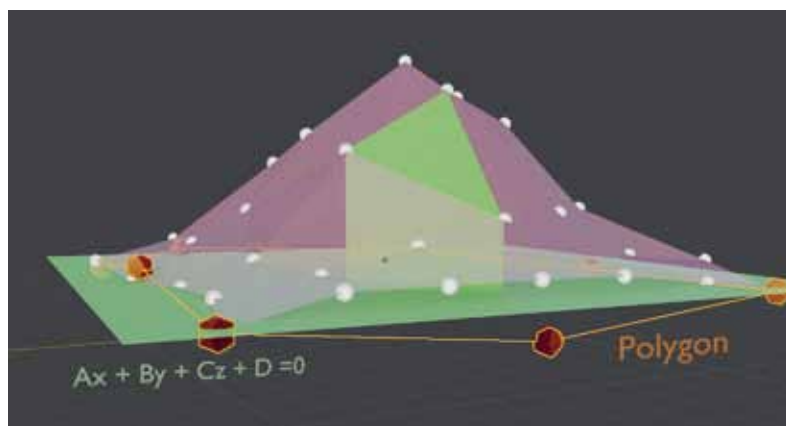


Рис. 1. Визуализация представления плоскости (полигона-основания) и точек с различными координатами на трехмерной модели объекта

Fig. 1. Visualization of representation of the plane (polygon-base) and points with different coordinates on a 3D object model

Для исключения данного недостатка существующих подходов авторы предлагают «привязывать» плоскости и плотные облака точек к мировой системе координат. Плоскость располагается таким образом, чтобы она стала началом отсчета координат. Было проведено матричное преобразование: при известных параметрах уравнения плоскости рассчитан угол ее наклона относительно осей x , y мировой системы координат, с использованием этих значений задана матрица трансформации R :

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta + u_x^2(1 - \cos\theta) & u_x u_y(1 - \cos\theta) - u_z \sin\theta & u_x u_z(1 - \cos\theta) + u_y \sin\theta \\ u_y u_x(1 - \cos\theta) + u_z \sin\theta & \cos\theta + u_y^2(1 - \cos\theta) & u_y u_z(1 - \cos\theta) - u_x \sin\theta \\ u_z u_x(1 - \cos\theta) - u_y \sin\theta & u_z u_y(1 - \cos\theta) + u_x \sin\theta & \cos\theta + u_x^2(1 - \cos\theta) \end{bmatrix}$$

где вектор u – текущее положение плоскости относительно мировых координат.

Поскольку для проведения измерений на данном этапе в рамках авторской методики нужны только координаты осей x и y исходного вектора, то координаты u_z принимаются равными нулю. После умножения координат каждой исходной точки на R облако точек преобразуется таким образом, что плоскость полигона-основания совпадает с плоскостью пересечения осей x и y .

Проведенное преобразование исключает необходимость в дублировании расчетов проекций, поскольку начало проекций перемещено в нулевую координату z . Соответственно, координата каждой точки трехмерной модели уже содержит значения высот, необходимые для расчета объема. Достаточно только лишь рассчитать объем треугольных призм, образованных полигональной сеткой.

Отметим, что часто исходные плотные облака точек содержат геопространственные данные (координаты x , y , z) с шестью и более знаками для каждой точки. При обработке этой информации возникают ошибки, вызванные тем, что результаты расчетов искажаются при переводе в тип данных «float» из-за недостаточной размерности последних. Поэтому перед обработкой исходные плотные облака переводились в локальную систему координат со снижением размерности на величину Δ для исключения по-

терь точности. Для последующего отображения точек эта величина суммировалась со вновь полученными данными.

Представленная методика оценки объема трехмерных объектов получила программную реализацию в веб-приложении «Система управления мониторингом строительных работ на объектах, прошедших государственную экспертизу».

Для проведения воздушного лазерного сканирования использовано беспилотное воздушное судно «DJI Matrice 600 Pro» (производство – Китайская Народная Республика) типа «гексакоптер» с бортовым приемником спутниковой системы навигации и воздушный лазерный сканер «АГМ-МС3.200» (производство – Российская Федерация) с частотой сканирования 600 кГц.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе исследований было проведено тестирование разработанной методики измерения объемных объектов с целью определения ее точности и пригодности в реальных производственных условиях. Для тестирования использовались искусственно созданные облака точек на основе простых геометрических примитивов – четырехгранных пирамид. В отличие от реальных данных, получаемых по результатам лазерного сканирования, в них отсутствуют случайные шумы и погрешности. Далее примитивы были размещены на плоскости, к их данным был добавлен случайный шум с нормальным распределением. Идея заключалась в том, что примитивы строятся по заданным пользователем размерам, соответственно, авторам были известны эталонные (точные) значения объема соответствующих фигур. При сравнении заранее эталонных значений со значениями, полученными по авторской методике, можно сделать вывод о степени точности последней.

Например, в качестве одного из эталонов была использована четырехугольная пирамида высотой 2 м и площадью основания 4 м, что путем элементарных вычислений дает объем 2,6 м³. При реализации авторской методики расчета объема были получены данные, что объем одной пирамиды составляет 2,67 м³, пяти пирамид – 13,68 м³, что говорит о достаточно высокой точности измерений. Скриншоты веб-приложения, где выполнялись измерения, приведены на рис. 2.

Также были оценены затраты времени на проведение расчетов по двум методикам – традиционной и авторской. Для этого использовалось тестовое облако, содержащее 218426 точек, образующих 433271 треугольник. При применении разработанных ранее подходов, кратко охарактеризованных во введении статьи, требуется от 148,8 до 158,2 мс. При использовании авторской методики время расчетов сокращалось до 90,9-103 мс.

К этой величине нужно добавить время на перевод данных из мировой в локальную систему координат

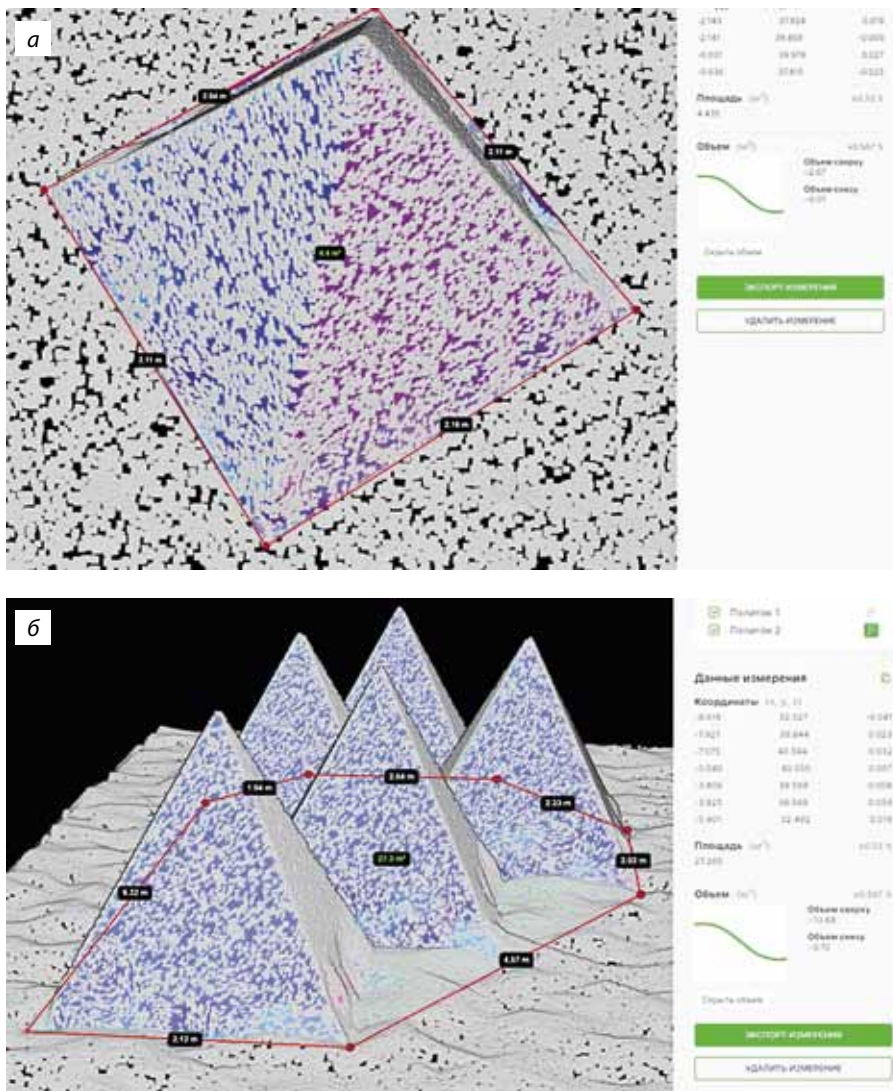


Рис. 2. Пример расчета объема объекта по авторской методике в веб-приложении: а – расчет объема одной четырехугольной пирамиды, б – расчет объема пяти четырехугольных пирамид

Fig. 2. An example of calculating the volume of the object using the author's method in the web application: а – calculation of the volume of one quadrangular pyramid, б – calculation of the volume of five quadrangular pyramids

нат (от 40 до 50 мс). В целом общее время на выполнение всех необходимых работ, включая выбор точек, визуализацию, сократилось в среднем с 581 до 533,8 мс или около 8%.

Для современных персональных компьютеров при работе с небольшими облаками точек такая разница не носит принципиального характера. Однако на практике нередко возникает необходимость использования облаков с 1 млн точек и 2 млн треугольников, поэтому разница во времени расчета может достигнуть нескольких секунд. Это уже влияет на проектирование интерфейса программного обеспечения и удобство пользования им. Таким образом, тестирование показало, что авторская методика измерения объема трехмерных объектов обладает достаточно высокой точностью и обеспечивает большее быстродействие.

На втором этапе исследования выполнялись оценки объема объектов реальных предприятий. Такими объектами стал ряд наземных складов разных размеров. Их объемы были измерены разными способами. Результаты измерений представлены в таблице.

Как следует из данных таблицы, использование данных лазерного сканирования с последующей обработкой информации по авторской методике дает достаточно высокую точность данных, сопоставимую с традиционной наземной маркшейдерской съемкой.

Существенное расхождение наблюдается при определении объемов складов.

Для склада № 4380 при использовании разных методов получены существенно отличающиеся друг от друга результаты. Границы этого склада было объективно сложно идентифицировать из-за осыпания и выпадения крупных кусков вещества, следовательно, затрудняется построение полигона-основания с последующим влиянием на результаты расчетов (рис. 3).

Представляется, что более правильный вариант определения границ представлен в правой части рис. 3, так как в левой части рисунка в площадь полигона-основания попадают пустые участки земли. Однако это утверждение не носит абсолютного характера. Пример склада № 2000 показывает, что представленная в исследовании технология дает возможность работать с объектами достаточно сложных геометрических форм, обращая меньшее внимание на воз-

можное не вполне точное определение границ.

Склад № 2000 имеет вогнутые границы, а также несколько выступающих фрагментов, поэтому при использовании стандартных методов расчет становится намного более трудоемким и менее точным. Но для авторской методики форма границы склада не имеет значения, так как объем будет рассчитываться по полигональной сетке и плотному облаку точек. В данном случае определяющее значение будет иметь не определение максимально точных границ склада, а выбор точек, соответствующих его основанию (все точки полигона должны находиться в плоскости основания склада). На рис. 4 показаны два варианта определения границ полигона-основания для склада № 2000.

Площадь склада, определенная при высокой детализации границ, составила 1734 м², при низкой детализации границ – 1745 м². На первый взгляд, низкая детализа-

Сравнение результатов определения объема складов разными методами

Comparing the results of storage volume determination with different methods

Номер объекта съемки	Результаты измерения объемов, м ³				
	Наземная съемка	Аэрофотосъемка	Воздушное лазерное сканирование с обработкой по стандартной методике	Измерение объема по облаку точек по авторской методике (измерение № 1)	Измерение объема по облаку точек по авторской методике (измерение № 2)
Склады малого размера					
№ 211	47,7	43,1	47,7	40,5	41,0
№ 210	44,3	41,4	41,6	46,3	47,2
№ 264	49,4	53,5	53,5	52,5	53,8
№ 235	52,1	51,6	56,1	52,9	54,2
№ 208	51,0	59,1	58,8	54,5	56,0
№ 263	52,4	52,6	58,0	56,1	56,5
Склады среднего размера					
№ 4437	73,8	78,2	77,3	77,1	76,2
№ 4380	73,5	73,7	75,6	80,8	77,5
№ 4354	69,8	74,3	76,6	75,0	76,3
№ 4353	70,0	75,8	74,3	75,8	76,9
№ 4438	74,1	77,8	80,3	77,3	78,6
Склад большого размера					
№ 2000	2996,0	2706,4	2842,7	2548,8	2482,5



Рис. 3. Пример вариативного построения границ полигона-основания

Fig. 3. An example of variative construction of the polygon-base boundaries

ция границ должна зависеть объем склада. Однако в этом случае расчеты дали результат 2482,54 м³, тогда как при высокой детализации – 2548,78 м³, т.е. разница составила около 2,7%. Следовательно, существенной разницы в точности расчетов в зависимости от степени детализации полигона-основания не наблюдается, главное требование – чтобы все точки полигона лежали в одной плоскости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для измерения объемов насыпи и выемки перспективно использование технологии лазерного сканирования, построения плотного облака точек с последующей обработкой данных на основе компьютерной графики. Вместе

с тем существующие подходы обладают рядом недостатков и ограничений – искажение результатов при использовании некорректных данных о площади основания измеряемого объекта, различия результатов триангуляции на каждой итерации и неподконтрольность этого процесса пользователю, длительное время обработки данных.

В работе представлена методика обработки результатов лазерного сканирования, которая отличается построением полигона-основания объекта в одной и только одной плоскости, привязкой этой плоскости и плотного облака точек к мировой системе координат. Данная методика получила практическую реализацию в веб-приложении «Система управления мониторингом строительных работ на



Рис. 4. Пример расчета объема склада № 2000 при разной степени детализации границ: а – расчет объема при высокой детализации границ, б – расчет объема при ограниченной детализации границ

Fig. 4. Example of calculating the volume of warehouse No 2000 at different degrees of boundary details: a – volume calculation at high boundary details, б – volume calculation at limited boundary details

объектах, прошедших государственную экспертизу», разработанным авторами.

Тестирование методики проводилось на геометрических примитивах с заранее известным (эталонным) объемом, что показало ее достаточно высокую точность, а также хорошее быстродействие. По сравнению со стандартной последовательностью обработки данных лазерного сканирования время выполнения работы сократилось на 8%. При работе с плотными облаками точек большого объема это может быть значимой величиной.

Далее в исследовании тремя способами были измерены объемы наземных складов предприятия различного размера.

Данные лазерного сканирования обрабатывались как по стандартной методике, так и по описанной в статье авторской. Результаты обнаруживают достаточно высокую

сходимость с классическими методами измерения объемов. В то же время при расчете объемов объектов, расположенных близко друг от друга, возникает проблема корректного разграничения их оснований. В этом случае рационально рассчитывать сразу объем всей группы таких объектов. Также в исследовании показано, что предложенная методика позволяет определять объем объектов со сложными конфигурациями границ в горизонтальной плоскости, степень трудоемкой детализации полигона основания не влияет на точность.

Представленная методика дает возможность по данным лазерного сканирования быстро и достаточно точно определять объем насыпных объектов, а также таких объектов угольной промышленности, как склады угля, породные отвалы. В перспективе изложенные подходы могут быть использованы также для контроля состояния объемных объектов (выявления эрозии отвалов, потенциально возможных наклонов и обрушений массы угля, находящейся на складах и др.).

Список литературы

1. Liu Y., Zheng Y. Accurate volume calculation driven by Delaunay triangulation for coal measurement // Scientific Programming. 2021. Vol. 2021. Article ID 6613264. DOI: 10.1155/2021/6613264.
2. Гусев В.Н., Блищенко А.А., Санникова А.П. Исследование комплекса факторов, оказывающих влияние на погрешность реализации маркшейдерской съемки горных объектов с применением геодезического квадрокоптера // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 173-179. DOI: 10.31897/PMI.2022.35.
3. Singh S.K., Banerjee B.P., Raval S. A review of laser scanning for geological and geotechnical applications in underground mining // International Journal of Mining Science and Technology. 2023. Vol. 33. No. 2. P. 133-154. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.09.022.
4. Slaker B.A., Mohamed K.M. A practical application of photogrammetry to performing rib characterization measurements in an underground coal mine using a DSLR camera // International Journal of Mining Science and Technology. 2017. Vol. 27. No. 1. P. 83-90. DOI: 10.1016/j.ijmst.2016.09.032.
5. Różański Z., Wrona P., Pach G. et al. The impact of precipitation on the mine waste dump // Journal of Sustainable Mining. 2012. Vol. 20. No. 1. P. 2-12. DOI: 10.46873/2300-3960.1035.
6. An improved ground control point configuration for digital surface model construction in a coal waste dump using an unmanned aerial vehicle system / H. Ren, Y. Zhao, W. Xiao et al. // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. No. 10. Article no. 1623. DOI: 10.3390/rs12101623.

7. Ignjatović Stupar D., Rošer J., Vulić M. Investigation of unmanned aerial vehicles-based photogrammetry for large mine subsidence monitoring // *Minerals*. 2020. Vol. 10. No. 2. Article no. 196. DOI: 10.3390/min10020196.
8. Utilization of geodetic methods results in small open-pit mine conditions: a case study from Slovakia / S. Labant, M. Bindzarova Gergelova, Z. Kuzevicova et al. // *Minerals*. 2020. Vol. 10. No. 6. Article no. 489. DOI: 10.3390/min10060489.
9. Gago R.M., Pereira M.Y.A., Pereira G.A.S. An aerial robotic system for inventory of stockpile warehouses // *Engineering Reports*. 2021. Vol. 3. No. 9. Article ID e12396. DOI: 10.1002/eng2.12396.
10. Фотограмметрическая обработка изображений на основе беспилотных летательных аппаратов и наземного лазерного сканирования при проектировании открытых горных работ / А.Ю. Кротенок, Д.Н. Шурыгин, Т.В. Литовченко и др. // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. № 12. С. 50-55.
11. Матрица деформаций как инструмент уточнения геодезических координат / А.О. Рада, И.Л. Непомнищев, А.Д. Кузнецов и др. // *Успехи современного естествознания*. 2023. № 6. С. 122-128. DOI: 10.17513/use.38062.

INNOVATIONS

Original Paper

UDC 622+528.08 © A.O. Rada, A.D. Kuznetsov, I.L. Nepomnishchev, N.Yu. Konkov, 2023
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2023, № 12, pp. 37-43
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-12-37-43>

Title

IMPROVING MEASUREMENTS OF VOLUMETRIC OBJECTS IN THE COAL INDUSTRY USING LASER SCANNING DATA

Authors

Rada A.O.¹, Kuznetsov A.D.¹, Nepomnishchev I.L.¹, Konkov N.Yu.¹

¹ Kemerovo State University, Kemerovo, 650000, Russian Federation

Authors Information

Rada A.O., PhD (Economic), Director of the Institute of Digitalization, e-mail: rada.ao@kemsu.ru

Kuznetsov A.D., Director of the Center for Geodesy, Aerial Survey and Cadastral Works of the Institute of Digitalization, e-mail: adkuz@inbox.ru

Nepomnishchev I.L., Head of the Geodesy Sector of the Center for Geodesy, Aerial Surveys and Cadastral Works of the Institute of Digitalization, e-mail: i.nepomnishchev@i-digit.ru

Konkov N.Yu., Leading Programmer of the Development Department of the Institute of Digitalization, e-mail: n.konkov@i-digit.ru

Abstract

The purpose of the study is to develop and test a method for measuring the volumes of three-dimensional objects in the coal industry, which makes it possible to improve the accuracy of the results and the speed of obtaining them. Compared to existing approaches to processing laser scanning data, it is proposed to use one and only one plane to create the base polygon of the object, place the base polygon and the dense point cloud in the world coordinate system. Testing the technique implemented in the web application on geometric primitives showed high accuracy and increased performance. Further, surveys of coal storages of various sizes were carried out in various ways – ground survey using total stations, aerial photography, airborne laser scanning. The laser scanning data were processed both in the traditional way and according to the method developed in the study. A high convergence of the results of this technique with standard approaches, as well as a fairly high degree of accuracy, is shown.

Keywords

Coal storage, Rock dump, Storage capacity, Volume measurement, Laser scanning, Dense point cloud, Mine surveying, Digital technologies.

References

1. Liu Y. & Zheng Y. Accurate volume calculation driven by Delaunay triangulation for coal measurement. *Scientific Programming*, 2021, (2021), article ID 6613264. DOI: 10.1155/2021/6613264.
2. Gusev V.N., Blishchenko A.A. & Sannikova A.P. Study of a set of factors influencing the error of surveying mine facilities using a geodetic quadcopter. *Journal of Mining Institute*, 2022, (254), pp. 173–179. (In Russ.). DOI: 10.31897/PMI.2022.35.
3. Singh S.K., Banerjee B.P. & Raval S. A review of laser scanning for geological and geotechnical applications in underground mining. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2023, (33), pp. 133–154. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.09.022.
4. Slaker B.A. & Mohamed K.M. A practical application of photogrammetry to performing rib characterization measurements in an underground coal mine

using a DSLR camera. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, (27), pp. 83–90. DOI: 10.1016/j.ijmst.2016.09.032.

5. Róžański Z., Wrona P., Pach G. et al. The impact of precipitation on the mine waste dump. *Journal of Sustainable Mining*, 2012, (20), pp. 2–12. DOI: 10.46873/2300-3960.1035.

6. Ren H., Zhao Y., Xiao W., Wang X. & Sui T. An improved ground control point configuration for digital surface model construction in a coal waste dump using an unmanned aerial vehicle system. *Remote Sensing*, 2020, (12), article no. 1623. DOI: 10.3390/rs12101623.

7. Ignjatović Stupar D., Rošer J. & Vulić M. Investigation of unmanned aerial vehicles-based photogrammetry for large mine subsidence monitoring. *Minerals*, 2020, (10), article no. 196. DOI: 10.3390/min10020196.

8. Labant S., Bindzarova Gergelova M., Kuzevicova Z. et al. Utilization of geodetic methods results in small open-pit mine conditions: a case study from Slovakia. *Minerals*, 2020, (10), article no. 489. DOI: 10.3390/min10060489.

9. Gago R.M., Pereira M.Y.A. & Pereira G.A.S. An aerial robotic system for inventory of stockpile warehouses. *Engineering Reports*, 2021, (3), article ID e12396. DOI: 10.1002/eng2.12396.

10. Krotенок A.Yu., Shurygin D.N., Litovchenko T.V., Kharitonova V.R. & Semenova Yu.A. Photogrammetry of images of air drones and ground-based laser scanning in open pit mine planning. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017, 12, pp. 50–55. (In Russ.).

11. Rada A.O., Nepomnishchev I.L., Kuznetsov A.D. & Akulov A.O. Deformation matrix as a tool for refining geodetic coordinates. *Advances in current natural sciences*, 2023, 6, pp. 122–128. (In Russ.). DOI: 10.17513/use.38062.

Acknowledgments

The research is conducted as part of the comprehensive scientific and technical program of a complete innovative cycle "Development and implementation of a complex of technologies in the fields of exploration and extraction of minerals, ensuring of industrial safety, bioremediation, creation of new products of deep processing of coal raw materials with consecutive amelioration of ecological impact on the environment and risks to human life", approved by the Decree of the Government of the Russian Federation from 11.05.2022 No. 1144-r., agreement No. 075-15-2022-1195 dated September 30, 2022.

For citation

Rada A.O., Kuznetsov A.D., Nepomnishchev I.L. & Konkov N.Yu. Improving measurements of volumetric objects in the coal industry using laser scanning data. *Ugol'*, 2023, (12), pp. 37-43. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-12-37-43.

Paper info

Received September 9, 2023

Reviewed November 10, 2023

Accepted November 27, 2023