

М. А. Алтынцев¹, Г. Д. Геращенко¹*

Автоматизированное извлечение контуров по данным лазерного сканирования при фасадной съемке

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: mnbcv@mail.ru

Аннотация. Для выполнения фасадной съемки могут применяться различные геодезические методы, включающие полевую съемку и камеральную обработку. По результатам фасадной съемки создаются чертежи фасада, которые содержат информацию о точных параметрах постройки и ее декоративных формах. До сих пор не существует технологии или решения, позволяющих строить полноценный чертеж в полностью автоматическом режиме. Камеральная обработка в интерактивном режиме довольно трудоемка и сильно зависит от навыков оператора. Хотя и существует множество методов извлечения метрической информации из проведенных измерений, которые можно использовать для частичной автоматизации построения чертежа, но ни один из них не является достаточно универсальным. Если использовать существующие классические алгоритмы и методы в комплексе, то можно достичь автоматизированного извлечения контуров по данным лазерного сканирования при фасадной съемке. В статье рассмотрены существующие методы извлечения метрической информации из проведенных измерений, алгоритмы обработки полученных данных, а также предложена методика обработки массива точек лазерных отражений с целью упрощения камеральной обработки. Результатом обработки являются извлеченные контуры фасада здания.

Ключевые слова: наземное лазерное сканирование, массив точек лазерных отражений, фасадная съемка, автоматизированное извлечение контуров, автоматическая классификация

M. A. Altyntsev¹, G. D. Geraschenko¹*

Automated extraction of contours based on laser scanning data during facade survey

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: mnbcv@mail.ru

Abstract. Facade survey can be carried out using various surveying methods, including field survey and data processing. According to the results of the facade survey, drawings of the facade are created, which contain information about the exact parameters of the building and its decorative forms. There is still no technology or solution that allows creating a full-scale drawing in a fully automatic mode. Data processing in manual mode is quite time-consuming and strongly depends on the skills of the operator. Although there are many methods of extracting metric information from measurements that can be used to partially automate the creating of a drawing, none of them is universal enough. If we use the existing classical algorithms and methods in a complex, it is possible to achieve automated contour extraction based on laser scanning data during facade survey. The existing methods of extracting metric information from measurements, algorithms for processing the obtained data are considered. The technique for processing laser points to simplify data processing is proposed. The result of processing is extracted contours of the building facade.

Keywords: terrestrial laser scanning, point cloud, facade survey, automated extraction of contours, automatic classification

Введение

Фасадная съемка является востребованной услугой. Основной задачей фасадной съемки является получение наиболее точных измерений (координат, габаритов) различных вертикальных поверхностей как зданий, так и сооружений. Такую съемку проводят в целях выявления деформаций, измерения отклонений элементов зданий и сооружений, для подсчета объема материалов при строительных или реставрационных работах, точной визуализации объекта.

Выбор прибора для фасадной съемки может зависеть как от требований к точности и поставленных задач, так и от особенностей здания и окружающей обстановки. Можно выделить несколько основных видов фасадной съемки: тахеометрическая, аэрофотограмметрическая, лазерная и комбинированная.

Тахеометрическая фасадная съемка выполняется тахеометром. Такой способ является наиболее трудозатратным при больших объемах, но может быть достаточным при малой загруженности фасада или небольшой площади фасада. Может использоваться при съемке частных домов, промышленных построек.

Аэрофотограмметрическая фасадная съемка выполняется с помощью камер, установленных на борту воздушных транспортных средств, в частности беспилотных летательных аппаратов. Данный способ оптимален при съемке больших по площади территорий или труднодоступных объектов.

Лазерная фасадная съемка выполняется с помощью лазерного сканера. Основными преимуществами данной съемки являются высокая скорость и высокая точность. Этот метод применяется чаще всего при съемке фасадов с обилием декоративных элементов, архитектурных форм. Примерами таких фасадов могут служить исторические сооружения либо архитектурные памятники.

Комбинированный метод может включать в себя несколько выше указанных методов. Он объединяет в себе преимущества нескольких способов и нивелирует их недостатки.

Также стоит отметить о существовании интерактивного метода фасадной съемки с помощью рулетки и дальномеров, но его редко используют из-за его трудоемкости и весьма низкой точности. Тем не менее, иногда его могут использовать как дополнение к основным методам в определенных ситуациях.

Чертежи фасадов создают по результатам обработки данных геодезических измерений в специализированном программном обеспечении. На сегодняшний день до сих пор не решена проблема автоматического построения чертежа фасада. Не существует технологии, позволяющей загрузить массив точек лазерных отражений (ТЛО) фасада здания и получить готовый чертеж, на котором отображены все детали вплоть до выступов рамы окна и дверных проемов.

Обработка данных с помощью инеративных операций занимает большое количество времени, а человеческий фактор оставляет место для ошибок. Автоматизация могла бы увеличить как скорость обработки данных, так и повысить ее точность.

Методы автоматизированной обработки и извлечения метрической информации для построения чертежей фасадов

Существует большое количество различных методов автоматического извлечения метрической информации из проведенных измерений. В зависимости от того, какие стоят задачи и какие требования предъявляются к точности готового чертежа фасада, необходимо адаптировать эти методы автоматического извлечения метрической информации под каждый из методов фасадной съемки, особенно учитывая внешние условия измерений.

Некоторые компании предлагают решения, которые можно было бы частично применять для автоматического построения чертежей фасадов. Например, компания «Геоскан» предлагает автоматическую классификацию крыш зданий на плотном массиве точек лазерных отражений, пример которого приведен на рис. 1 [1].

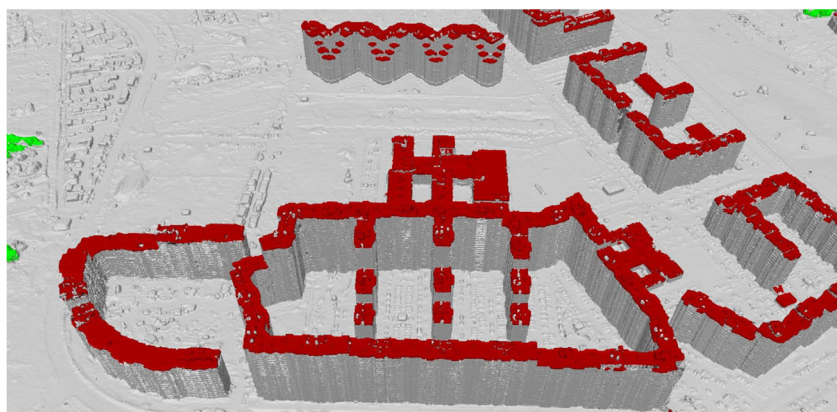


Рис. 1. Автоматическая классификация крыш зданий на плотном массиве ТЛО

Данное решение используется с применением классических алгоритмов. На сегодняшний день активно развиваются технологии компьютерного зрения, искусственных нейронных сетей, машинного обучения. Это позволило получить принципиально новые методы автоматизированной обработки и извлечения метрической информации.

Например, возможно семантическое разделение объектов по результатам сканирования (рис. 2), но такое решение применяется для интерьеров и единичных объектов [2].



Рис. 2. Основные этапы классификации 3D объектов в массивах точек

Для фасадов зданий тоже применяется семантическое разделение (рис. 3), но с другой целью. Данные решения используются в задачах, связанных с беспилотным транспортом [3]. Они заключаются в определении объектов на уровне «дорога – дерево – дом». Этого достаточно для беспилотного транспорта, но недостаточно для фасадной съемки. На сегодняшний день не существует решения, которое выполняет семантическое разделение архитектурных элементов экстерьера здания по облаку точек.

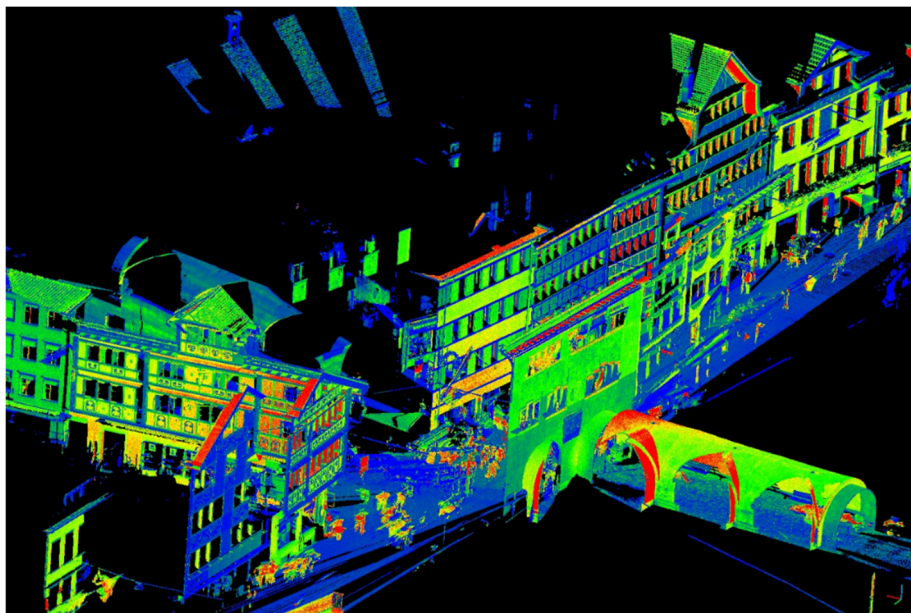


Рис. 3. Крупномасштабный бенчмарк Semantic3D

Если же рассматривать задачу не с точки зрения массива точек, а с точки зрения изображения, то существует еще несколько решений.

Та же компания «Геоскан» предлагает решение для автоматического поиска объектов на ортофотоплане (рис. 4) [1].



Рис. 4. Автоматический поиск объектов на ортофотоплане

Можно было бы адаптировать такое решение для фасада зданий, но оно имеет ряд недостатков. Код продукта закрытый, услуга – платная, да и невозможно привязывать всю работу к одному программному продукту.

Если использовать программные продукты с открытым исходным кодом, то можно создать свою искусственную нейросеть для автоматизированного выделения контуров. Существуют примеры применения нейросетей для распознавания объектов на изображении (рис. 5). В частности, в [4] создали нейросеть для определения дефектов труб.

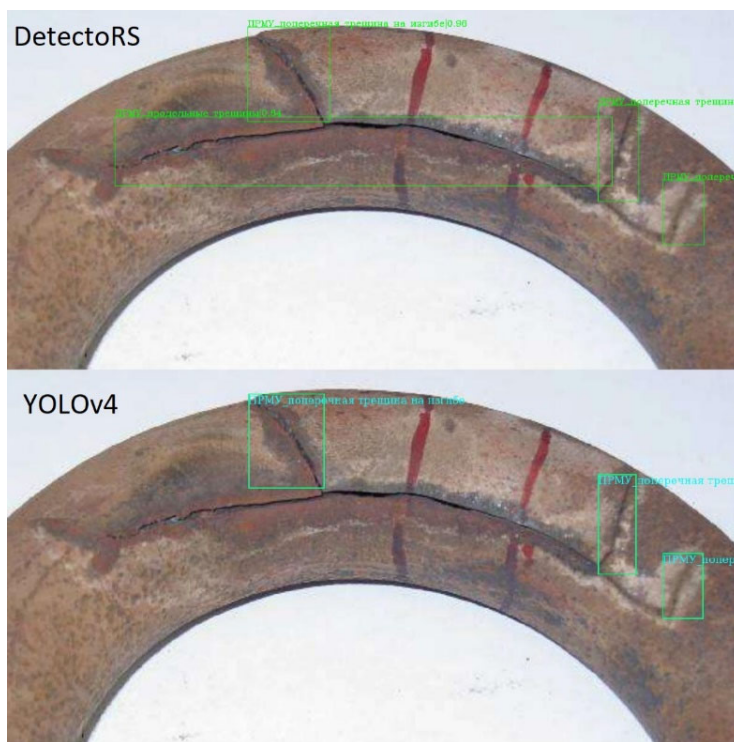


Рис. 5. Пример детекции дефектов в виде прямоугольников для одного и того же изображения с помощью разных архитектур нейросетей

Основные недостатки любого решения с машинным обучением:

- необходим большой объем данных для обучения;
- зачастую сложно подготовить данные автоматически;
- большинство задач требуют больших вычислительных мощностей;
- обучение одной нейронной сети требует много времени, то есть необходимо допускать как можно меньше ошибок, и требуется специалист с большим опытом (нейросеть верхнего уровня).

Самостоятельное создание подобной искусственной нейросети требует не только навыков в областях компьютерного зрения и машинного обучения.

Для разработки программы, использующей нейросеть, требуется: создать обучающий набор данных (собрать и разметить), спроектировать архитектуру нейронной сети, обучить нейросеть, внедрить нейросеть в программный продукт. Ввиду того, что большинство зданий отличается друг от друга, сложно бу-

дет подобрать такой объем данных для обучения, чтобы результат был универсальным.

Достигнуть автоматизации можно также путем использования классических алгоритмов. Если разделить проблему на несколько задач, то можно подобрать решение к каждой из них.

Для выполнения автоматизированного выделения контуров по данным наземного лазерного сканирования в целях построения чертежей фасадов зданий требуется:

- фильтрация;
- классификация;
- векторизация.

Результат качества каждой из этих операций будет влиять на итоговый результат.

Фильтрацией называют процесс устранения шумов в данных. В процессе фильтрации яркость каждой точки заменяется таким значением яркости, которое наименее искажено помехой. Для изображений фильтрация бывает пространственной и частотной.

Пространственная фильтрация включает в себя методы обработки, основанные на непосредственном влиянии на пиксели изображения. К недостаткам данных методов относят размытие контуров и снижение резкости.

Частотная фильтрация использует методы обработки, основанные на модификации сигнала, который формируют с помощью применения к изображению преобразования Фурье. Она может оказывать более концентрированное влияние, мало касаясь полезной информации.

Дискретные периодические сигналы описываются двумерным рядом Фурье, имеющим следующий вид:

$$x_{i_1, i_2} = \frac{1}{I_1 I_2} \sum_{k_1=0}^{I_1-1} \sum_{k_2=0}^{I_2-1} X_{k_1, k_2} \exp \left(i \frac{2\pi}{I_1} i_1 k_1 + i \frac{2\pi}{I_2} i_2 k_2 \right), \quad i = \sqrt{-1} \quad (1)$$

где I_1 – число элементов по оси y ;

I_2 – число элементов по оси x ;

x_{i_1, i_2} – значения сигнала;

X_{k_1, k_2} – коэффициенты Фурье;

k_1, k_2 – двумерный номер базисной функции;

$\frac{2\pi k_{1(2)}}{I_{1(2)}}$ – пространственные частоты.

У данного двумерного представления базисными функциями являются двумерные комплексные экспоненты (также называемые комплексными синусоидами), которые имеют прямоугольную периодичность с периодом $I_1 \times I_2$:

$$\begin{aligned}\varphi_{k_1 k_2}(i_1, i_2) &= \frac{1}{I_1 I_2} W_1^{-i_1 k_1} W_2^{-i_2 k_2}, \\ W_1 &= \exp\left(-i \frac{2\pi}{I_1}\right), \quad W_2 = \exp\left(-i \frac{2\pi}{I_2}\right).\end{aligned}\tag{2}$$

Выражение (1), которое восстанавливает сигнал x_{i_1, i_2} по его спектру X_{k_1, k_2} , является обратным преобразованием Фурье. Двумерный частотный спектр сигнала x_{i_1, i_2} образуется коэффициентами Фурье X_{k_1, k_2} . Данные коэффициенты определяются с помощью формулы прямого преобразования Фурье:

$$X_{k_1, k_2} = \sum_{i_1=0}^{I_1-1} \sum_{i_2=0}^{I_2-1} x_{i_1, i_2} W_1^{i_1 k_1} W_2^{i_2 k_2}.\tag{3}$$

Данные двумерные преобразования можно представить в виде последовательных одномерных преобразований по строкам и столбцам матрицы изображения, так как они симметричны и могут быть разделены относительно переменных:

$$X_{k_1, k_2} = \sum_{i_1=0}^{I_1-1} \left(\sum_{i_2=0}^{I_2-1} x_{i_1, i_2} W_2^{i_2 k_2} \right) W_1^{i_1 k_1}.\tag{4}$$

После применения преобразования Фурье получают результат в виде представления изображения в частотной плоскости с помощью коэффициентов Фурье. Применение полученных коэффициентов в работе позволяет использовать широкие возможности изменения и фильтрации изображения.

Фильтрация изображения используется для обнаружения границ, выделения контуров, подчеркивания мелких деталей изображения, а также выделения больших однородных по тону областей и сглаживания изображения путем подавления мелких деталей изображения и уменьшения импульсного шума [5].

Классификация объектов на изображении выполняется либо в интерактивном режиме, либо в полуавтоматическом с помощью алгоритмов предварительной классификации. Эти алгоритмы делятся на две группы: алгоритмы контролируемой классификации с применением методов обучения и неконтролируемой классификации без обучения.

Например, к классификации с обучением относится алгоритм, основанный на методе максимального правдоподобия. В данном методе пиксели изображения представляются векторами, у которых компонентами являются значения яркости в каждом спектральном канале. После этого составляется обучающая выборка в виде изображения, на котором определены участки, соответствующие различным классам. По итогам задания границ этих классов производят оценку век-

тора математического ожидания и корреляционной матрицы для каждого из классов. Затем, для каждого из пикселей классифицируемого изображения составляется вектор измерений спектральных яркостей, а также вычисляются условные плотности вероятностей этого вектора для каждого из классов объектов на изображении. Классификация пикселя осуществляется с помощью определения наиболее правдоподобной гипотезы, путем сравнения данных условных плотностей вероятностей с некоторым порогом. Этот метод обеспечивает оптимальное распознавание при справедливости предположения о нормальном законе распределения вектора признаков, но состоит из множества операций и относительно медленный.

Метод минимальных расстояний является упрощенным методом максимального правдоподобия, основан на евклидовой метрике и может рассматриваться безотносительно к нормальному закону распределения. Классификация в данном методе основывается на сравнении расстояний между пикселями изображения и средними значениями классов в пространстве яркостей, которое вычисляется в соответствии с выражением:

$$d_{xyc} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\mu_{ci} - X_{xyi})^2}, \quad (5)$$

где n – количество спектральных каналов;

i – номер канала;

c – номер класса;

X_{xyi} – значение пикселя с координатами x, y канала i ;

μ_{ci} – среднее значение яркости канала (обучающий выборки) c в канале i ;

d_{xyc} – спектральное расстояние между пикселями x, y и средним значением класса c .

Метод минимальных расстояний уступает в точности методу максимального правдоподобия и методам, которые учитывают окружение пикселя, но является самым простым и быстрым методом.

Примерами алгоритмов классификации без обучения могут служить алгоритмы IsoData и K-Means, которые относятся к группе процедур кластеризации спектральных изображений. В них используются минимальное спектральное расстояние для определения соответствующего кластера для каждого пикселя. Данные процедуры выполняются в несколько итераций. В первой итерации кластеризации спектральное пространство равномерно разбивается на области кластеров. Затем вычисляется спектральное расстояние между пикселем и средним значением каждого из кластеров. В итоге пиксель относится к кластеру, расстояние до которого минимально. Средние значения спектральных признаков рассчитываются после итерации по полученным кластерам. Средние значения кластеров зависят от значений спектральных яркостей, попавших в них пикселей

и изменяются в соответствии с ними. После этого выполняется следующая итерация, во время которой повторяют кластеризацию с новыми средними значениями кластеров. Подобные перерасчеты повторяются из итерации в итерацию либо до момента, когда все пиксели с заданной вероятностью не окажутся в каком-либо из кластеров, либо до достижения заданного количества итераций [6].

Автоматическая векторизация состоит из двух этапов: оконтуривание закрашенных областей и векторное представление объектов. Оконтуривание выполняется по алгоритму жука. Суть данного алгоритма заключается в отслеживании первой ненулевой точки объекта на исходном изображении. После этого выполняется движение вокруг этой точки по часовой стрелке в восьми направлениях окрестности. Первой анализируемой точкой является точка, с которой жук попал в центр окрестности. Пока не будет найдена новая «черная точка», движение по окрестности не прекращается. Эта точка принимается за центр окрестности и процедура повторяется снова. Движение по контуру будет происходить до момента совпадения очередной точки с первой точкой контура, что будет означать замыкание контура. Далее идет поиск нового объекта по координатам и процесс начинается заново.

При векторизации полигоны представляются наборами пар координат, у которых совпадают первые и последние точки. Одна пара координат соответствует точке. Если каждый полигон соответствует логической записи в базе, записанной как строки переменной длины пар координат, то происходит перевод графического изображения в векторную форму. В итоге получаются полигоны, которые наделены уникальными идентификаторами и состоят из пар координат. В свою очередь, они соответствуют количеству пикселей контура, образующих его границу в избранной последовательности [7].

Описание исходных данных

В сентябре 2021 года была выполнена съемка в студенческом городке СГУГиТ методом наземного лазерного сканирования с помощью лазерного сканера Geomax Zoom 300. Данный сканер имеет следующие характеристики, связанные с точностью измерений: точность измерения расстояний составляет 6 мм на 50 м, расходимость лазерного луча – 0,37 мрад. Целью съемки было создание трехмерной модели общежития №1 [8, 9]. Полученный массив точек лазерных отражений (ТЛО) приведен на рис. 6:

Взаимное ориентирование сканов выполняется автоматически в ПО X-PAD Office Fusion и основано на анализе зон взаимного перекрытия. Весь процесс состоит из двух этапов. Первый этап состоит из вычисления приблизительных элементов взаимного ориентирования сканов. На втором этапе происходит уравнивание, основанное на расчете расстояний между всеми точками соседних сканов, а также определении параметров трансформирования с помощью итеративного метода ближайших точек ICP [10].

Внешнее ориентирование массива ТЛО основывалось на съемке тахеометром Leica TM30, имеющего точность 1". Ориентирование данных НЛС основывалось на координатах точки установки прибора и координатах марок, установ-

ленных на штативах на точках М1 и М2. Идентификация этих марок в массиве ТЛО происходила интерактивным способом.

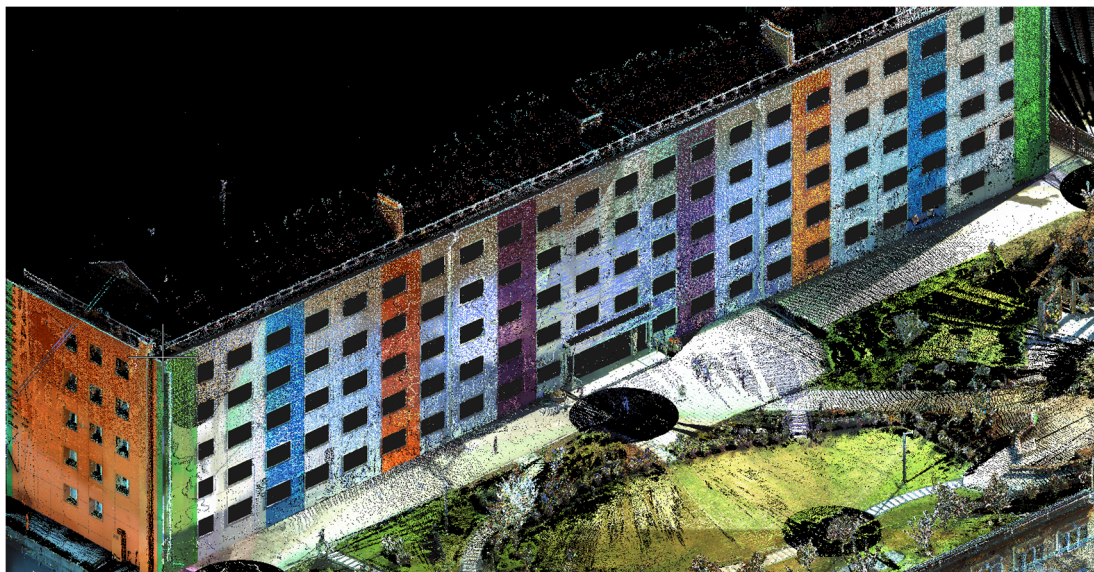


Рис. 6. Массив ТЛО, полученный в результате наземного лазерного сканирования

Методика извлечения контуров при фасадной съемке

Для выполнения автоматизированного выделения контуров по данным наземного лазерного сканирования в целях построения чертежа фасада зданий требуется соблюсти определенный порядок действий. Сначала требуется выбрать сечение массива ТЛО, которое обеспечивало бы максимальную плотность и минимальное количество шума. Конфигурация сечения может отличаться в зависимости от качества съемки, внешних условий и самого фасада здания. В данном случае размер пикселей определялся при переходе от массива точек к изображению сечения. При уменьшении размера пикселей контур размыкается, при увеличении – каждая точка отображается с помощью нескольких пикселей.

Затем сечение обрабатывается подобно изображениям. Чтобы убрать оставшийся шум, применяют фильтрацию. Каждый метод фильтрации может давать отличающиеся результаты, поэтому следует перебирать несколько методов и оставлять наиболее подходящий.

Выполнив наиболее оптимальную фильтрацию, следует провести классификацию, которая, в свою очередь, тоже может быть выполнена множеством методов. Выбор классификации аналогичен выбору фильтрации – путем перебора и оставлением наиболее подходящего.

В результате мы будем иметь растровое изображение, очищенное от лишнего шума и прошедшее классификацию. Контурные элементов фасадов уже будут выделены, но с ними еще нельзя работать. Для того, чтобы иметь возможность дальше работать с контурами, требуется выполнить векторизацию. В итоге мы получим контуры в векторном формате, которые легко поддаются дальнейшей обработке.

Результаты

В нашем случае было выбрано сечение ТЛО в месте вертикального ряда окон (рис. 7), так как фасад здания обладает кривизной. При сечении массива ТЛО по всему фасаду либо были бы потеряны данные в месте максимальной кривизны, либо был бы добавлен шум в местах минимальной кривизны.



Рис. 7. Сечение массива ТЛО в месте вертикального ряда окон

После этого были применены несколько способов фильтрации изображения, наиболее оптимальным из которых оказался метод адаптивной фильтрации Enhanced Lee. Результаты данной фильтрации приведены на рис. 8.

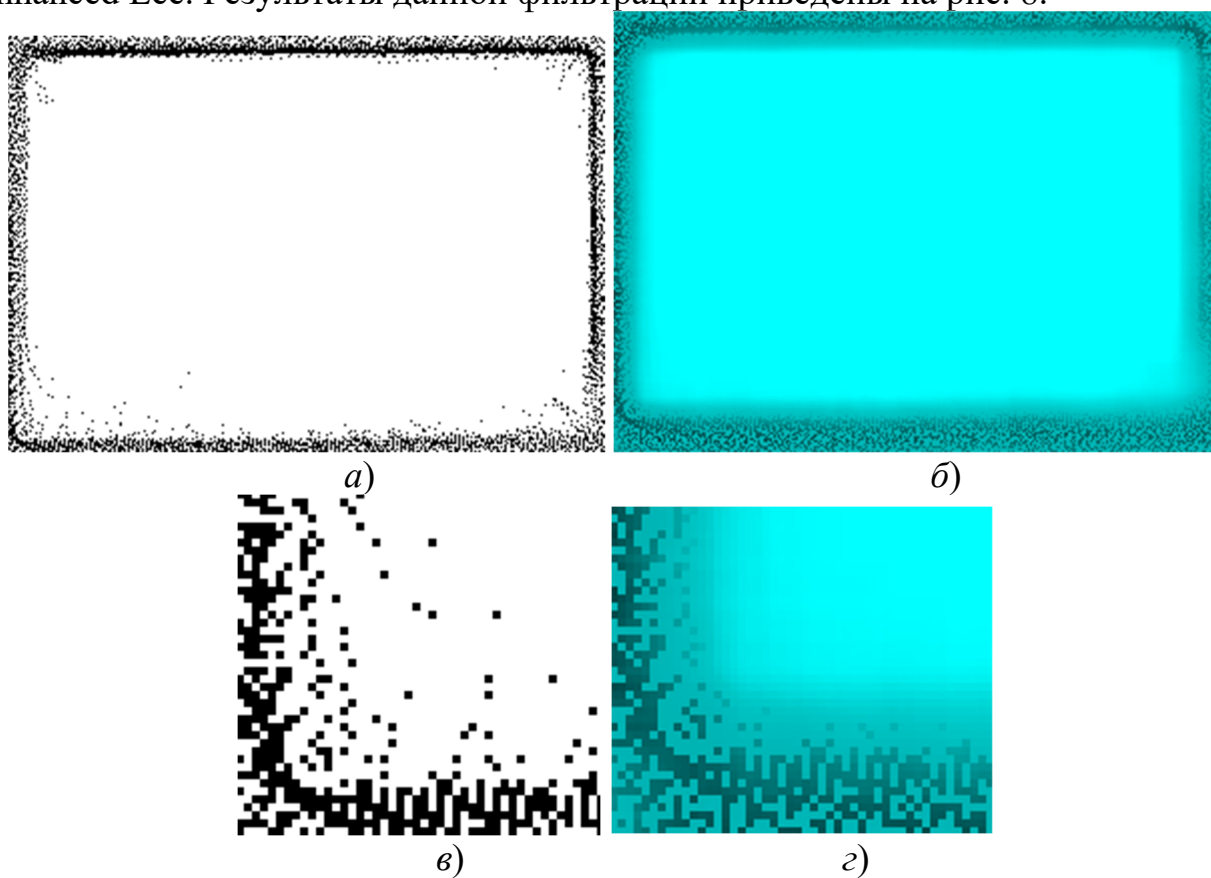


Рис. 8. Окно в сечение массива ТЛО:

а) до фильтрации; б) после фильтрации; в) до фильтрации, увеличенно;
г) после фильтрации, увеличенно

Затем была проведена классификация по данным, полученным в результате фильтрации. Так как отсутствовали подходящие материалы для обучения, был применен метод неконтролируемой классификации IsoData. Результат классификации приведен на рис. 9.

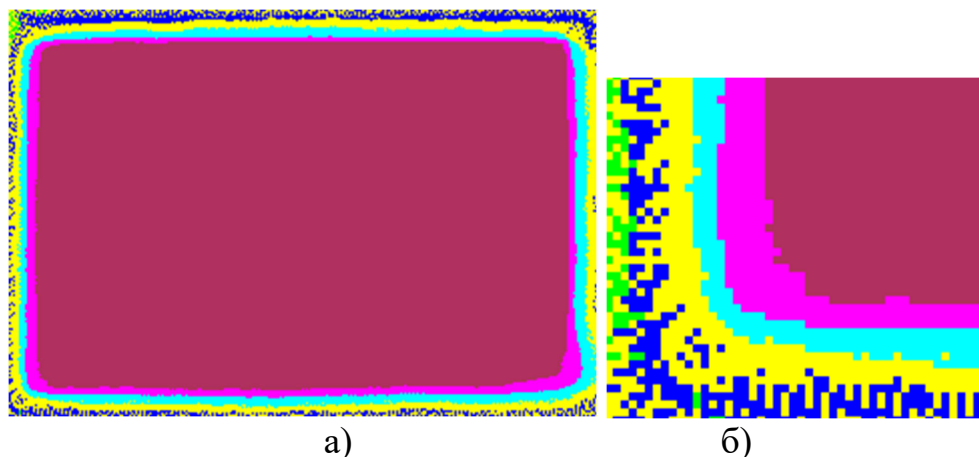


Рис. 9. Окно в сечение массива ТЛО:

а) после классификации; б) после классификации, увеличенно

В конце была проведена векторизация по полученным данным классификации. Результат векторизации приведен на рис.10.

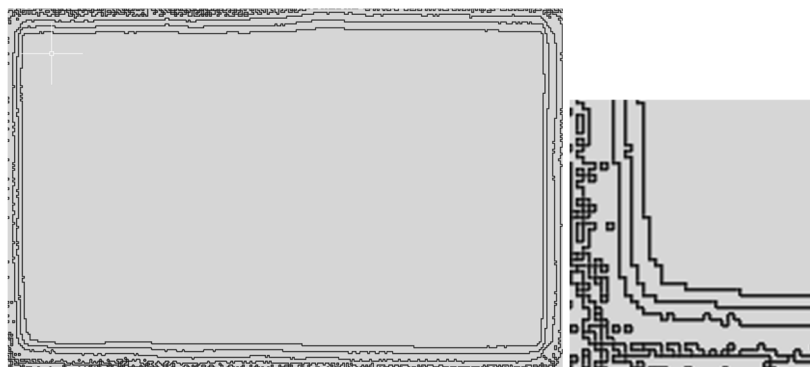


Рис. 10. Окно в сечение массива ТЛО:

а) после вектризации; б) после вектризации, увеличенно

Как видно на рис. 10, полученный контур приближен к форме прямоугольника, но видно, что линии недостаточно прямые и углы скруглены. На итоговой результат повлияло несколько факторов: качество фильтрации, классификации и общий размер пикселей. Для улучшения результата можно было бы использовать альтернативные способы фильтрации или контролируруемую классификацию с обучением.

Заключение

Предложенная методика автоматизированного выделения контуров по данным наземного лазерного сканирования в целях построения чертежей фаса-

дов зданий позволяет спланировать работу по камеральному этапу фасадной съемки. Результатом данной методики является векторное изображение фасада, которое возможно редактировать и применять для дальнейшего построения чертежей фасадов. Методика обладает гибкостью, которая позволяет подходить к каждому объекту индивидуально. В перспективе, при достаточном наборе данных, возможно применение обучения для контролируемой классификации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Искусственный интеллект и PhotoScan [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.geoscan.aero/themes/geoscan/assets/seminary/files/Искусственный интеллект и PhotoScan.pdf](https://www.geoscan.aero/themes/geoscan/assets/seminary/files/Искусственный_интеллект_и_PhotoScan.pdf).
2. Rusu R. B., Cousins S. 3d is here: Point cloud library (pcl) // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2011. – P. 1–4.
3. Hackel T., Savinov N., Ladicky L. Semantic3D.net: A new Large-scale Point Cloud Classification Benchmark // ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. – 2017. – № IV-1/W1. – p. 91–98.
4. Программно-аппаратный комплекс для детектирования дефектов на трубах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://phygitalism.com/ru/defects-detector>.
5. Зраенко С. М., Ровенков С. С. Пространственные фильтры на основе свертки в программном комплексе ENVI // Новые образовательные технологии в вузе: Шестая международная научно-методическая конференция, 2-5 февраля 2009 года : сборник тезисов докладов : Часть 2. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2009. – С. 135–139.
6. Зраенко С. М., Емельянов А. Ю. Алгоритмы классификации изображений в пакете прикладных программ ENVI // Новые образовательные технологии в вузе: Шестая международная научно-методическая конференция, 2-5 февраля 2009 года: сборник тезисов докладов: Часть 2. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2009. – С. 131–134.
7. Абламейко С. В., Лагуновский Д. М. Обработка изображений: технология, методы, применение: Учебное пособие. – Мн.: Амафед, 2000. – 304 с.
8. SPS Zoom300 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://geomax-positioning.com/ru-ru/products/laser-scanners/sps-zoom300>.
9. Алтынцев М. А., Геращенко Г. Д. Исследование точности трехмерного моделирования по данным съемки с помощью наземного лазерного сканера Geomax Zoom 300 // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2022. XVIII Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов (Новосибирск, 18–20 мая 2022 г.). – Новосибирск: СГУГиТ, 2022. – С. 76–85.
10. X-PAD Office Fusion [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://geomax-positioning.com/ru-ru/products/software/x-pad-suite/x-pad-fusion>.

© М. А. Алтынцев, Г. Д. Геращенко, 2023