

Гибридный подход к 3D реконструкции сложных промышленных объектов из облака точек и изображения

В. Л. Баденко¹, К. О. Беляевский², Д. Ю. Волгин³, Д. К. Зотов⁴, А. А. Федотов⁵

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)

¹vbadenko@gmail.com, ²kirill.beljaevskii@spbpu.com, ³dmitryvolgin@icloud.com,

⁴zotovdk@gmail.com, ⁵alexandrefedotov@gmail.com

Аннотация. Реконструкция трехмерных объектов из облака точек является важной, но сложной и трудоемкой задачей. Для создания цифровых моделей используют лазерное сканирование (ЛС) и фотограмметрию. Подход, сочетающий методы моделирования на основе расстояния (ЛС) и изображения (фотосъемка) называют гибридным моделированием. Он улучшает вычислительные возможности процесса обработки исходных данных за счет взаимного дополнения преимуществ ЛС и фотосъемки. В работе приводится пример реконструкции цилиндрического объекта в сцене производственного помещения на основе гибридного подхода.

Ключевые слова: лазерное сканирование; фотограмметрия; облако точек; 3D реконструкция; гибридный подход

I. ВВЕДЕНИЕ

Сбору и анализу трехмерных данных технической инфраструктуры – будь то в стадии строительства, введения в эксплуатацию, эксплуатации или реконструкции – уделяется все больше внимания исследователями и практиками. Такой сбор и анализ данных необходим для активного мониторинга производства на всех этапах жизненного цикла объекта.

Продвижение технологий пространственной съемки на месте (например, фото / видеограмметрия и наземное лазерное сканирование) позволяет более эффективно собирать 3D-данные о существующей технической инфраструктуре, по сравнению с традиционными ручными методами. Полученные трехмерные существующие данные инфраструктуры используются для определения геометрических свойств целых объектов и их составных компонентов. В последнее время такие данные стали рассматриваться как инструмент, который будет использоваться для управленческих целей в различных точках жизненного цикла проекта: во время строительства, после завершения строительства, а также на этапах эксплуатации и технического обслуживания.

Большинство объектов оборудования в промышленных сценах состоят из основных геометрических примитивов, таких как плоскости, сферы, цилиндры, конусы и торы [1–2]

Элементы цилиндрической формы такие, как технологические линии трубопроводов промышленных предприятий, трубопроводы различного назначения, строительные конструкции из круглых труб (колонны, фермы и т.д.), широко представлены в технических системах и являются одним из наиболее распространенных геометрических примитивов.

Требования производства вызывают растущий спрос на точные цифровые данные трубопроводных систем [3]. Это является следствием строгих правил безопасности, применяемых, например, для химических технологических линий, энергетических и ядерных установок и др. Одной из основных проблем являются износ, трещины или деформации, которые могут возникать при транспортировке жидкостей и газов через трубопроводные системы. Такие цифровые модели могут быть использованы для прогнозирования этих повреждений, или для упрощения процессов проектирования, планирования, управления, обслуживания или расширения системы труб. В некоторых исследованиях [4–6] основное внимание было сосредоточено на преобразовании 3D данных из вида данных, полученных от объекта, в трехмерные структурированные или объектные представления, например в формате CAD, чтобы лучше проиллюстрировать реальные (существующие) условия. Такие представления или модели могут затем использоваться в качестве основы для принятия управленческих решений (например, ремонт и обслуживания).

Извлечение изображений трехмерных объектов из облака точек ЛС, по-прежнему является сложной, трудоемкой задачей. Для промышленных, технологически сложных систем трубопроводов эта задача осложняется наличием большого количества наложений и пересечений. Для полуавтоматического или автоматического определения геометрической структуры элементов в облаке точек в настоящее время применяется ряд

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках соглашения №14.584.21.0025 03.10.2017, уникальный идентификатор: RFMEFI58417X0025, мероприятие 2.1

известных способов и преобразований (например, трансформация Хафа и др.). Одновременно широко используются цифровые технологии, позволяющие создавать трехмерные модели объектов на основе фотосъемки – фотограмметрия [7, 8]. Названные два метода получения 3D информации об объекте и создания его трехмерной модели различаются как с точки зрения устройств, так и требуемых методов 3D реконструкции. Тем не менее, на практике, можно рассматривать моделирование на основе измерения дистанции (ЛС) и моделирование на основе изображений (фотосъемка) как дополняющие друг друга методы [9]. Используемый в работе подход (метод) гибридного моделирования [10] улучшает вычислительные возможности процесса обработки исходных данных за счет сокращения пространства и времени и дает результаты, которые могут быть использованы при автоматизации реконструкции 3D-модели трубопроводов. Подход, сочетающий методы моделирования на основе расстояния (ЛС) и изображения (фотосъемка) называют гибридным моделированием. Этот подход внедряется в процесс 3D-реконструкции. Его эффективность объясняется взаимным дополнением преимуществ ЛС и фотосъемки.

Двумя фундаментальными, хорошо известными подходами для обнаружения геометрических фигур в данных 3D-облаков точек, являются преобразование Хафа [11] и метод RANdom SAmple Consensus (RANSAC) [12]. Подходы, основанные на методе RANSAC, обрабатывают неотфильтрованное облако точек, используя случайную выборку, которая требует минимального количества точек данных для обнаружения фигур. Тем не менее, пользователям необходимо установить несколько пороговых значений, которые варьируются от модели к модели, особенно когда есть данные с шумами и выбросами. Такой подход точного обнаружения трехмерных фигур (плоскостей, сфер, цилиндров и т. д.) зависит от первоначального выбора точек [13]. Другим подходом для обнаружения геометрических фигур является использование методов, которые используют алгоритмы накопления, такие как преобразование Хафа (Hough). Преобразование Хафа выполняет процедуру выбора параметров в пространстве, а кандидаты на объекты получаются, когда они достигают наибольшего количества положительных оценок. Методы, основанные на преобразовании Хафа, были успешно реализованы для обнаружения цилиндров, плоскостей и сфер в облаках точек данных ЛС [14].

II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использован подход взаимодополнения методов лазерного сканирования и фотограмметрии (данных расстояния – облако точек и изображения), аналогично использованному в [15]. На рис. 1 представлена схема реконструкции промышленных объектов, соответствием моделям (примитивам) конструктивной сплошной геометрии (КСГ).

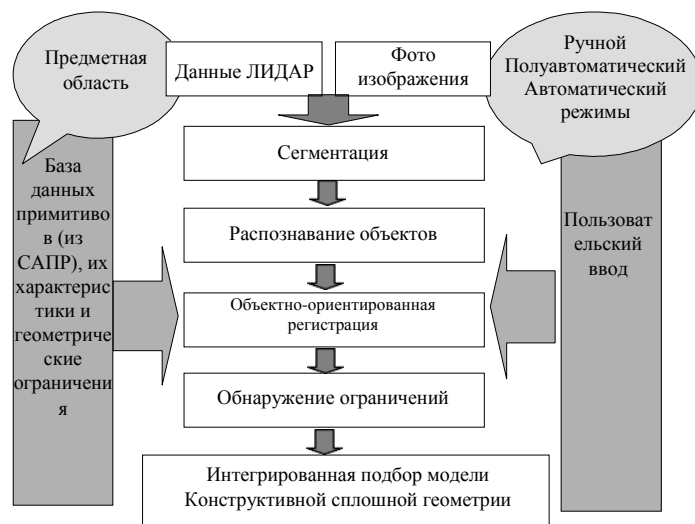


Рис. 1. Схема 3D реконструкции промышленного объекта [15]

Процесс использует предварительную регистрацию облака точек с использованием итеративного алгоритма ближайших точек [16]. Регистрация, полученная на этом этапе, используется до тех пор, пока объекты не будут распознаны. Затем эта первоначальная регистрация уточняется в окончательной интегрированной корректировке с использованием объектной регистрации [17]. Для регистрации изображения используется его контур. Корректируются только параметры внешней ориентации изображения, а смоделированные параметры объектов сохраняются фиксированными.

На следующем шаге сегментации и распознавания объектов используются только данные облака точек, так как в отличие от изображений они предоставляют четкую трехмерную информацию и, следовательно, имеют лучшие шансы на автоматизацию. Это особенно справедливо для реконструкции промышленных объектов, т.к. их элементы могут быть лучше представлены САПР-примитивами, в силу их промышленного производства.

Далее, используя облака точек, применяется подход, состоящий из сегментации и обнаружения объектов на основе преобразования Хафа. На этапе сегментации используется простое разделение на основе ограничения гладкости [1], в предположении, что большинство поверхностей в промышленных средах являются гладкими, а их нормали к поверхности быстро изменяются только на краях объекта. Прежде всего определяется поверхностная нормаль для каждой точки облака точек, используя плоскость, соответствующую точкам в малой окрестности. За этим следует этап расширения области, пока угол между нормальными не превысит заданный порог. Следующий этап распознавания объектов определяет плоскости и цилиндры, присутствующие в сегментах, с использованием преобразования Хафа. Поскольку наличие множества объектов и выбросов (outliers) не является проблемой для преобразования Хафа, это позволяет избавиться от ошибок предыдущего этапа сегментации.

На этапе обнаружения ограничений, объекты, которые были распознаны на предыдущем шаге, объединяются вместе.

Этап реконструкции поверхности предполагает, что комбинация сегментов и этапов распознавания объектов привела к правильно помеченным точкам, что определяет принадлежность точек к какой-либо модели конструктивной сплошной геометрии (англ. Constructive Solid Geometry, CSG).

Чтобы продемонстрировать предложенный метод был проведен тестовый эксперимент с использованием конструкции, состоящей из состыкованных отрезков труб разного диаметра, расположенных в производственном помещении. Облако точек, состоящее из 40 миллионов точек, получено с помощью сканера Focus3D X 130, со стандартным отклонением 5 мм для каждой точки (рис. 2). Изображения получены камерой Canon 5d Mark II с разрешением 22 мегапикселей со стандартным отклонением 1 пиксел. Объект сканировался с одной точки, а изображения получены из 12 различных положений.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изображения и облако точек предоставляют взаимодополняющую информацию. Благодаря такому сочетанию можно ожидать лучшей точности оценки. Край объекта, в которых лазерный сканер обычно получает большое количество шумов, лучше всего воспринимаются на изображениях. Например, в случае цилиндра кромки с обеих сторон обычно не сканируются либо из-за того, что они не видны из-за соединений с другими объектами, либо из-за того, что неудобно размещать сканер в положении, где они видны. В результате длина цилиндра будет плохо определена облаком точек. Напротив, измерения на изображении обеспечивают точки на краях и, таким образом, помогают улучшить точность оценки длины.

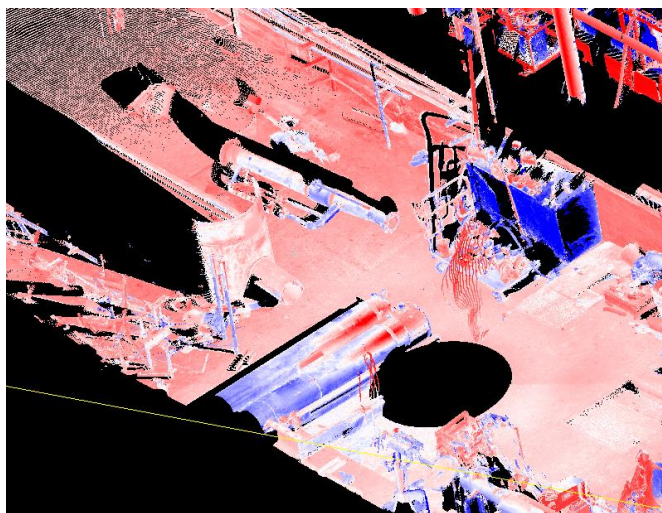


Рис. 2. Облако точек – результат ЛС производственного помещения

Процесс реконструкции начинается с приблизительной регистрации с использованием итеративного алгоритма

ближайших точек (англ. Iterative Closest Point — ICP). Объединение результатов ЛС и фотосъемки с использованием итеративного алгоритма ближайших точек представлено на рис. 3.

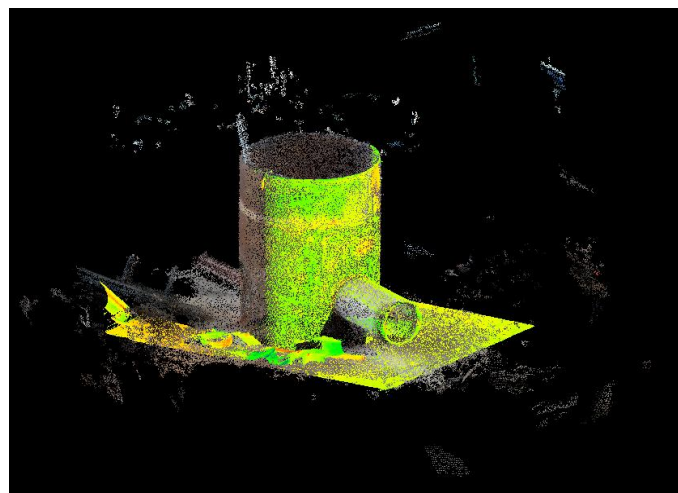


Рис. 3. Объединение результатов ЛС и фотосъемки с использованием итеративного алгоритма ближайших точек

Облако точек сегментировалось с использованием ограничения гладкости на базе расширяющейся области, а цилиндры определялись автоматически с помощью преобразования Хафа. Для изображений ориентация была аппроксимирована с помощью точек схождения.

В результате были получены и зафиксированы геометрические параметры объекта и его положение в пространстве (рис. 4).

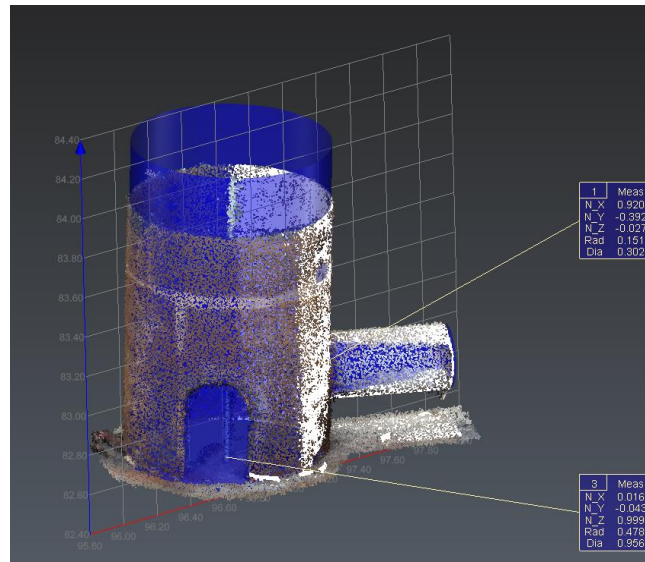


Рис. 4. Геометрические параметры и положение в пространстве цилиндрических объектов

Используя каталог примитивов КСГ, была получена твердотельная цифровая модель объекта, состоящего из цилиндрических элементов (рис. 5), как результат гибридной обработки результатов ЛС и фотосъемки.

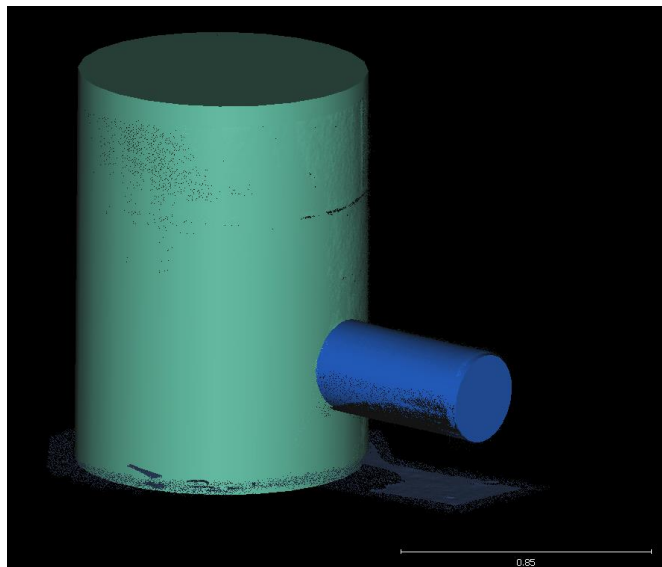


Рис. 5. КСГ модель – результат гибридного моделирования

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние два десятилетия эффективное получение 3D-данных об объектах технической инфраструктуры в результате съемки на основе методов фото / видеogramметрии и наземного лазерного сканирования стало предметом повышенного научно-исследовательского и практического внимания. Исследователи и практические работники прилагают усилия для разработки полуавтоматических или полностью автоматизированных методов и технологий обработки данных для оказания помощи и поддержки в задачах мониторинга производства и управления объектами.

Как показывают исследования, комбинации различных технологий съемки (фотограмметрия и лазерное сканирование) преодолевают недостатки отдельных методов. В так называемом гибридном подходе сочетаются данные, полученные из фото / видеogramметрии и наземного лазерного сканирования, которые имеют потенциал для повышения точности измерений и, следовательно, общей точности 3D-реконструкции. Однако целесообразность такого подхода в таких приложениях, как мониторинг производства и автоматическая компоновка, требует дополнительного исследования.

Для того, чтобы производственный мониторинг и автоматизированные методы и технологии макетирования стали общепринятой практикой в области инжиниринга, необходимы существенные улучшения в методах, используемых для обработки огромных объемов 3D-данных съемки технической инфраструктуры. Большая часть технической инфраструктуры является крупной и сложной, поэтому съемка должна быть произведена в десятках или сотнях мест. Полученные данные обычно имеют избыточный объем, шумны и неструктурированы. Таким образом, исследования необходимы для достижения

прогресса в скорости сбора данных, точности генерируемых моделей и степени детализации, предоставляемой в моделях. Задача дальнейших исследований заключается в полной автоматизации процесса 3D реконструкции инфраструктурных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Rabbani T., Van Den Heuvel F. Efficient hough transform for automatic detection of cylinders in point clouds // *Isprs Wg Iii/3, Iii/4*. 2005. Т. 3. С. 60-65. (doi:10.1.1.118.1736)
- [2] Schnabel R., Wahl R., Klein R. Efficient RANSAC for point-cloud shape detection // *Computer graphics forum*. – Blackwell Publishing Ltd, 2007. Т. 26. № 2. С. 214-226. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8659.2007.01016.x>.
- [3] Veldhuis H., Vosselman G. The 3D reconstruction of straight and curved pipes using digital line photogrammetry // *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*. 1998. Т. 53. № 1. С. 6-16.
- [4] Lee J. et al. Skeleton-based 3D reconstruction of as-built pipelines from laser-scan data // *Automation in construction*. 2013. Т. 35. С. 199-207.
- [5] Ahmed M.F., Haas C.T., Haas R. Automatic detection of cylindrical objects in built facilities // *Journal of Computing in Civil Engineering*. – 2014. Т. 28. № 3. С. 04014009.
- [6] Kawashima K., Kanai S., Date H. Automatic recognition of a piping system from large-scale terrestrial laser scan data // *Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spatial Inform. Sci*. 2011. С. 38-5.
- [7] Liebowitz D., Criminisi A., Zisserman A. Creating architectural models from images // *Computer Graphics Forum*. Blackwell Publishers Ltd, 1999. Т. 18. № 3. С. 39-50.
- [8] Badenko V., Zotov D., Fedotov A. Hybrid processing of laser scanning data // *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2018. Т. 33. С. 01047. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183301047>
- [9] Blaise J.Y., Florenzano M., De Luca L. Architectural Surveying: From a point-cloud to a 3D model, benefits of using theoretical models stemming from the history of representation // *EVA 2004 Florence Electronic Imaging & the Visual Arts*. – Pitagora Editrice Bologna, 2004. С. 244-249.
- [10] De Luca L., Véron P., Florenzano M. Reverse engineering of architectural buildings based on a hybrid modeling approach // *Computers & Graphics*. 2006. Т. 30. № 2. С. 160-176. DOI: 10.1016/j.cag.2006.01.020
- [11] Hough P. V. C. Method and means for recognizing complex patterns : nat. 3069654 США. 1962.
- [12] Fischler M.A., Bolles R.C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography // *Readings in computer vision*. – 1987. – С. 726-740.
- [13] Schnabel R., Wahl R., Klein R. Efficient RANSAC for point-cloud shape detection // *Computer graphics forum*. – Blackwell Publishing Ltd, 2007. Т. 26. № 2. С. 214-226.
- [14] Abuzaina A., Nixon M. S., Carter J. N. Sphere detection in kinect point clouds via the 3d hough transform // *International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns*. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. С. 290-297.
- [15] Rabbani T., Van Den Heuvel F. 3D industrial reconstruction by fitting CSG models to a combination of images and point clouds // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS)*. 2004. Т. 35. № B5. С. 2.
- [16] Besl P.J., McKay N.D. Method for registration of 3-D shapes // *Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures*. – International Society for Optics and Photonics, 1992. Т. 1611. С. 586-607. DOI: 10.1109/34.121791
- [17] Dijkman S.T., Van Den Heuvel F.A. Semi automatic registration of laser scanner data // *INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES*. 2002. Т. 34. № 5. С. 12-17.