

Р. А. Дьяченко³, Д. А. Гура^{1,2}, С. А. Ярутин^{1✉}, Т. А. Тихонов¹

Оптимизация маршрутов перемещения лазерных сканирующих систем для мониторинга состояния конструкций и оборудования промышленного объекта

¹Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Российская Федерация

²Кубанский государственный аграрный университет, г. Краснодар, Российская Федерация

³Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Российская Федерация
e-mail: yarutinsa@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрен подход к оптимизации маршрутов для мониторинга состояния конструкций и оборудования промышленного объекта с использованием данных лазерного 3D-сканирования. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности и полноты обследований при формировании цифровых двойников промышленных систем. Предложен метод автоматизированного планирования маршрутов, учитывающий геометрию объекта, зоны видимости сканера и ограничения перемещения оператора или мобильной платформы. Разработанный алгоритм основан на гибридной эвристической схеме, включающей жадное построение первичного маршрута, локальную оптимизацию и генетические механизмы поиска. В качестве исходных данных использовались облака точек, полученные при лазерном сканировании, на основе которых формировались карты видимости и граф возможных перемещений. Проведенные эксперименты на модели промышленного участка площадью 400 м² показали, что предложенный метод позволяет сократить длину маршрута на 30–35%, повысить полноту покрытия контрольных зон до 95% и снизить общее время обследования примерно на 25% по сравнению с традиционными подходами. Результаты подтверждают эффективность алгоритма и его применимость для интеграции в системы цифровых двойников, а также для планирования автономных обследований в задачах промышленного мониторинга и технической диагностики.

Ключевые слова: оптимизация маршрутов; 3D-сканирование; лазерное зондирование; цифровой двойник; мониторинг конструкций; промышленный объект; техническая диагностика

R. A. Dyachenko³, D. A. Gura^{1,2}, S. A. Yarutin^{1✉}, T. A. Tikhonov¹

Optimization of routes for moving laser scanning systems to monitor the condition of structures and equipment at an industrial facility

¹Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

²Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation

³Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University) Moscow, Russia
e-mail: yarutinsa@yandex.ru

Abstract. The article considers an approach to route optimization for monitoring the condition of structures and equipment of an industrial facility using 3D laser scanning data. The relevance of the study is due to the need to increase the effectiveness and completeness of surveys in the formation of digital counterparts of industrial systems. A method of automated route planning is proposed that considers the geometry of the object, the visibility range of the scanner and the restrictions on the

movement of the operator or mobile platform. The developed algorithm is based on a hybrid heuristic scheme that includes greedy primary route construction, local optimization, and genetic search mechanisms. Point clouds obtained by laser scanning were used as the initial data, on the basis of which visibility maps and a graph of possible displacements were formed. Experiments conducted on a model of an industrial site with an area of 400 m² have shown that the proposed method makes it possible to reduce the length of the route by 30-35%, increase the coverage of control areas to 95% and reduce the total survey time by about 25% compared with traditional approaches. The results confirm the effectiveness of the algorithm and its applicability for integration into digital twin systems, as well as for planning autonomous surveys in the tasks of industrial monitoring and technical diagnostics.

Keywords: route optimization; 3D scanning; laser sensing; digital twin; structural monitoring; industrial facility; technical diagnostics

Введение

Современные промышленные объекты представляют собой сложные инженерные системы, включающие большое количество конструктивных элементов и технологического оборудования. Надежность и безопасность их эксплуатации напрямую зависят от регулярного мониторинга состояния несущих конструкций, креплений, трубопроводов, резервуаров и других критических узлов. В условиях возрастающих требований к промышленной безопасности и минимизации простоев особое значение приобретает повышение эффективности и точности таких обследований.

Традиционные методы мониторинга, основанные на визуальных осмотрах и выборочных измерениях, обладают рядом существенных ограничений. Они требуют значительных трудовых затрат, зависят от человеческого фактора и не обеспечивают полной пространственной информации о состоянии объекта. В последние годы широкое распространение получают технологии лазерного 3D-сканирования и фотограмметрии, позволяющие оперативно формировать высокоточные цифровые модели объектов. На основе таких данных создаются цифровые двойники, обеспечивающие возможность дистанционного анализа, выявления дефектов и динамического контроля изменений геометрии во времени.

Однако, несмотря на высокую точность данных 3D-сканирования, остается нерешенной проблема оптимальной организации маршрутов обхода или пролета сканирующих устройств [1,2]. На крупных и пространственно сложных объектах выбор позиций для сканирования и порядок их обхода существенно влияет на полноту охвата, время обследования и затраты ресурсов. В большинстве случаев маршруты формируются вручную специалистами, что не гарантирует оптимальности и требует значительного опыта. В результате часть зон может оставаться недосмотренной, а часть – сканироваться избыточно, что снижает эффективность обследования.

Таким образом, возникает необходимость в методах автоматизированного планирования и оптимизации маршрутов мониторинга, учитывающих пространственную структуру объекта, ограничения доступности и параметры оборудования. Решение данной задачи позволит повысить производительность обследо-

ний, обеспечить полное покрытие контролируемых поверхностей и сократить время, необходимое для съемки и последующей обработки данных [3].

Цель исследования заключается в повышении эффективности мониторинга состояния конструкций и оборудования промышленного объекта за счет оптимизации маршрутов обхода по данным 3D-сканирования, что позволяет сократить время обследования и повысить полноту охвата контрольных зон.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- проанализировать существующие подходы к организации маршрутов мониторинга и выявить их ограничения;
- формализовать задачу оптимизации маршрута с учетом геометрии объекта, зон видимости и ограничений перемещения;
- разработать и реализовать алгоритм оптимизации маршрутов по данным 3D-сканирования;
- провести экспериментальную проверку на примере промышленного объекта и оценить эффективность предложенного метода.

Разработка и применение подобного подхода позволит автоматизировать процесс планирования обследований, обеспечить адаптацию маршрутов к изменяющимся условиям эксплуатации и интегрировать процедуры мониторинга в общую систему управления цифровым двойником промышленного объекта [4].

Методы и материалы

В качестве исходных данных для решения задачи использовались результаты лазерного 3D-сканирования промышленного объекта, включающего металлоконструкции, трубопроводы и технологические площадки. Сканирование выполнялось с использованием наземного лазерного сканера (ЛИДАР) с угловым разрешением $0,01^\circ$ и максимальной дальностью до 120 м. По результатам съемки сформировано облако точек плотностью порядка $10^6 - 10^7$ очек на кадр, которое было объединено и очищено от шумов и посторонних объектов [5]. На основе полученных данных построена трехмерная цифровая модель объекта, используемая для анализа геометрии, расчета зон видимости и моделирования возможных маршрутов обхода.

Для решения задачи оптимизации маршрута была выполнена формализация пространственной модели мониторинга. Геометрия объекта представляется в виде множества контрольных точек $P = \{p_i\}$, расположенных на поверхностях конструкций, которые должны быть обследованы. Множество возможных позиций сканирования $S = \{s_j\}$ ограничивается областями, доступными для размещения оборудования или движения оператора (например, площадками, галереями, лестницами) [6].

Каждой позиции сканирования сопоставляется зона видимости $V(s_j)$, определяемая угловыми и дальностными характеристиками сканера. Точка поверхности p_i считается доступной для наблюдения из позиции s_j , если выполняется условие прямой видимости без пересечений с элементами геометрии объекта.

Для каждой пары (s_j, s_k) определена метрика перемещения $d(s_j, s_k)$, учитывающая реальную протяженность пути по доступным маршрутам или по рабочим площадкам.

Таким образом, задача сводится к поиску упорядоченного подмножества позиций $\mathcal{S}^* \subseteq \mathcal{S}$, обеспечивающего:

- максимальное покрытие множества контрольных точек P ;
- минимальную суммарную длину маршрута $\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n d(s_j, s_k)$;
- выполнение ограничений по видимости, времени обследования и допустимым зонам перемещения.

Эта задача по своей сути является разновидностью задачи коммивояжера с покрытием (Covering TSP), дополненной геометрическими ограничениями, определяемыми 3D-моделью.

Для ее решения применен гибридный эвристический алгоритм, включающий:

- построение первичного маршрута методом жадного выбора (greedy nearest neighbor) с учетом видимости точек;
- локальную оптимизацию маршрута с использованием модифицированного алгоритма двухточечных перестановок (2-opt);
- коррекцию маршрута с помощью генетического подхода, обеспечивающего минимизацию функции цели:

$$F = \alpha \cdot L + \beta \cdot (1 - C) + \gamma \cdot R,$$

где L – длина маршрута, C – доля покрытия контрольных точек, R – штраф за недоступные или дублирующие сканы, α, β, γ – весовые коэффициенты [7].

Построение карт видимости выполнялось в программной среде Python с использованием библиотек *Open3D* и *NumPy* для анализа облаков точек, а также *NetworkX* для моделирования графа перемещений. Визуализация маршрутов и результатов оптимизации реализована в *Blender* с использованием собственных скриптов на *Python API* [8].

Для проверки работоспособности и эффективности предложенного подхода использовалась модель реального промышленного участка – фрагмента насосной станции площадью около 400 м². На этой модели были заданы контрольные зоны, моделирующие участки сварных швов и крепежных узлов, подлежащие регулярному мониторингу.

В ходе эксперимента проводилось сравнение трех вариантов маршрутов:

- базовый (ручной) – маршрут, построенный оператором по интуитивному принципу;
- равномерный – маршрут с равномерным распределением точек наблюдения по поверхности;
- оптимизированный – маршрут, рассчитанный по предложенному алгоритму.

Сравнение выполнялось по метрикам: длина маршрута, доля покрытия поверхности, количество сканов и время обследования.

Результаты и обсуждение

В ходе исследования проведена серия экспериментов на цифровой модели промышленного участка площадью около 400 м², включающего металлические конструкции, трубопроводы и технологические площадки. Основная цель эксперимента – оценка эффективности предложенного алгоритма оптимизации маршрутов по сравнению с традиционными методами: ручной и равномерной расстановкой точек сканирования (таб. 1).

Для количественной оценки эффективности использовались следующие показатели: длина маршрута (L, м) - суммарная протяженность пути, который должен пройти оператор или робот; доля покрытия контрольных точек (C, %) – процент контрольных точек поверхности, доступных для сканирования из выбранных позиций; количество сканов (N) – число позиций, из которых выполняется обследование; время обследования (T, мин) - оценка времени, необходимого для выполнения маршрута с учетом перемещения между точками и времени сканирования.

Таблица 1

Метод	L (м)	C (%)	N	T (мин)
Ручной	180	85	15	95
Равномерный	165	88	18	90
Оптимизированный	120	95	12	70

Предложенный оптимизированный маршрут обеспечивает сокращение длины пути на 33% по сравнению с ручным и на 27% по сравнению с равномерным методом. Доля покрытия увеличивается до 95%, что демонстрирует эффективность алгоритма в обеспечении полного наблюдения ключевых зон. Сокращение количества сканов и времени обследования свидетельствует о повышении производительности обследований и снижении трудозатрат.

Проведен анализ влияния ключевых параметров маршрутизации D_{max} – максимального расстояния между позициями сканирования, и W_{max} - ширины зоны видимости сканера, на эффективность маршрута. Увеличение D_{max} позволяет сократить длину маршрута, но может привести к снижению доли покрытия контрольных точек, если зоны видимости пересекаются недостаточно. Увеличение W_{max} повышает покрытие и снижает количество необходимых позиций, но требует сканеров с большей дальностью или более широким углом обзора. Оптимальное сочетание параметров $D_{max}=5$ м, $W_{max}=120^\circ$ обеспечивает баланс между минимальной длиной маршрута и максимальным покрытием.

Визуализация маршрутов показала, что оптимизированный маршрут избегает дублирующих сканов и эффективно использует доступные площадки и проходы. Карта покрытия контрольных точек демонстрирует отсутствие «мертвых зон» по сравнению с ручным маршрутом.

Обсуждение

Результаты подтверждают эффективность предложенного подхода: сокращение трудозатрат и времени обследования достигается за счет оптимального распределения точек сканирования и минимизации лишних перемещений; повышение полноты покрытия критических зон снижает риск пропуска дефектов и улучшает качество мониторинга; алгоритм гибко адаптируется к различным конфигурациям объектов и может быть использован для мобильных роботов или операторов на производственных площадках.

Ограничения текущего исследования включают зависимость качества маршрута от точности исходной 3D-модели, необходимость точного моделирования зон видимости сканера и ограниченность вычислительных ресурсов при увеличении размеров объекта. В целом, предложенный метод позволяет интегрировать оптимизированные маршруты обследований в систему цифрового двойника, обеспечивая эффективное планирование и анализ данных мониторинга.

Заключение

В данной работе рассмотрена задача оптимизации маршрутов для мониторинга состояния конструкций и оборудования промышленного объекта на основе данных 3D-сканирования. Проведен анализ существующих методов организации обходов и выявлены их ограничения, связанные с неполным покрытием контрольных зон и избыточными перемещениями операторов.

Разработан алгоритм оптимизации маршрутов, учитывающий пространственную структуру объекта, зоны видимости сканера и ограничения перемещения. Применение гибридного эвристического подхода с элементами жадного построения, локальной оптимизации и генетического алгоритма позволило минимизировать суммарную длину маршрута, увеличить полноту покрытия контрольных точек и сократить количество необходимых позиций сканирования.

Экспериментальные результаты на модели промышленного участка показали, что предложенный метод обеспечивает сокращение длины маршрута до 33% по сравнению с ручным подходом, увеличивает долю покрытия до 95% и снижает время обследования на 25–30%. Анализ влияния параметров маршрутизации D_{max} и W_{max} позволил определить оптимальные значения, обеспечивающие баланс между минимальной длиной маршрута и максимальным покрытием.

Предложенный подход демонстрирует высокую эффективность и может быть использован для автоматизации планирования обследований в промышленных объектах, интеграции с системами цифровых двойников, а также в мобильных роботизированных системах. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются: автоматическая адаптация маршрутов при изменении геометрии объекта, интеграция с нейросетевым анализом дефектов и расширение алгоритма для крупных и пространственно сложных объектов.

Таким образом, работа вносит вклад в повышение эффективности мониторинга промышленных объектов и создание цифровых двойников с автоматизированным планированием обследований, что способствует снижению трудо-

затрат, сокращению времени обследований и повышению надежности эксплуатации оборудования.

Благодарности

Исследование проводилось при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках проекта № LAB-24.1/2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Christofides N. Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem // Report 388. Graduate School of Industrial Administration, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 1976. 28 p.
2. Papadimitriou C.H., Steiglitz K. Combinatorial optimization: algorithms and complexity. Prentice Hall, 1982. 384 p.
3. Разработка структуры интеллектуальной системы для решения задач территориального планирования / Д. А. Гура, Р. А. Дьяченко, К. Л. Саввиди, Д. А. Дражецкий // Передовые исследования Кубани : Сборник материалов Ежегодной отчетной конференции грантодержателей Кубанского научного фонда, Сочи, 29–31 мая 2024 года. – Краснодар: Кубанский научный фонд, 2024. – С. 197-200.
4. К вопросу о структуризации информации для хранения данных лазерного сканирования / Р. А. Дьяченко, Д. А. Гура, С. В. Самарин [и др.] // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". – 2024. – № 2. – С. 102-110. – DOI 10.26297/2312-9409.2024.2.6.
5. Gura, D., Dyachenko, R., Yarutin, S., Makaryan, A. (2025). Optimal Placement of Laser Scanning Stations for Organizing Work on Three-Dimensional Identification of Objects in Space. In: Stanimirović, P.S., Mourtas, S.D., Sahoo, J.K. (eds) Hybrid Methods for Modeling and Optimizing Complex Systems. HMMOCS 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1481. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95649-2_45.
6. Алгоритмическое обеспечение эффективного сканирования территорий: построение оптимальных маршрутов / Р. А. Дьяченко, Д. А. Гура, С. А. Ярутин, П. Е. Чечель // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2025. – Т. 4. – С. 11-16. – DOI 10.33764/2618-981X-2025-4-11-16. – EDN FSYWYS.
7. Ma, Y., Easa, S., Cheng, J., & Yu, B. (2021). Automatic Framework for Detecting Obstacles Restricting 3D Highway Sight Distance Using Mobile Laser Scanning Data. Journal of Computing in Civil Engineering, 35(4), 04021008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000973](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000973)
8. Saha, A., & Dhara, B. C. (2023). 3D LiDAR-based Obstacle Detection and Tracking for Autonomous Navigation in Dynamic Environments. International Journal of Intelligent Robotics and Applications, 8(1), 39–60. <https://doi.org/10.1007/s41315-023-00302-1>

© Р. А. Дьяченко, Д. А. Гура, С. А. Ярутин, Т. А. Тихонов, 2026