

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ГЛОБАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ «ЗВЕЗДА А» И ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Мусливец М.А.

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: автономные строительные машины, глобальное планирование траектории, неструктурированные среды, безопасность движения, эффективность навигации, строительная робототехника, сравнительный анализ алгоритмов.

Аннотация. В статье представлено исследование алгоритмов глобального планирования траекторий для автономных строительных машин в условиях неструктурированной среды строительных площадок. Основной фокус работы направлен на сравнительный анализ двух принципиально различных подходов, алгоритма А-звезда и генетического алгоритма. Рассмотрены их эффективности, безопасности и применимости для различных типов строительной техники. Анализируются особенности работы каждого алгоритма применительно к двум типам автономных строительных машин: грузовику с прицепом и гусеничному экскаватору, имеющим принципиально разные кинематические характеристики. Особое внимание уделяется методике оценки алгоритмов, включающей такие ключевые параметры как: время вычисления маршрута, длина и плавность траектории, минимальное расстояние до препятствий, а также показатели безопасности движения. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании автономных систем управления строительной техникой, что позволит повысить эффективность и безопасность строительных процессов. Статья представляет интерес для специалистов в области строительной робототехники, автоматизации строительства и разработчиков автономных систем.

COMPARATIVE ANALYSIS OF GLOBAL PATH PLANNING ALGORITHMS FOR AUTONOMOUS CONSTRUCTION MACHINES BASED ON STAR A AND GENETIC ALGORITHMS

Muslivets M.A.

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg

Keywords: autonomous construction vehicles, global path planning, unstructured environments, traffic safety, navigation efficiency, construction robotics, comparative analysis of algorithms.

Abstract. The article presents a study of global trajectory planning algorithms for autonomous construction machines in the unstructured environment of construction sites. The main focus of the work is on a comparative analysis of two fundamentally different approaches, the A-star algorithm and the genetic algorithm. Their efficiency, safety and applicability for various types of construction equipment are considered. The features of each algorithm are analyzed for two types of autonomous construction machines: a truck with a trailer and a crawler excavator with fundamentally different kinematic characteristics. Particular attention is paid to the methodology for evaluating the algorithms, including such key parameters as: route calculation time, trajectory length and smoothness, minimum distance to obstacles, as well as traffic safety indicators. The obtained results can be used in the design of autonomous control systems for construction equipment, which will improve the efficiency and safety of construction processes. The article is of interest to specialists in the field of construction robotics, construction automation and developers of autonomous systems.

Введение

Современная строительная отрасль сталкивается с рядом серьезных вызовов, включая нехватку квалифицированной рабочей силы, высокий уровень травматизма и необходимость повышения эффективности строительных процессов. Одним из перспективных направлений решения этих проблем является внедрение автономных строительных машин (АСМ), способных выполнять задачи без постоянного контроля оператора. Однако успешная

реализация автономных систем требует решения сложной задачи планирования траекторий движения в условиях неструктурированных и динамически изменяющихся строительных площадок [1].

Глобальное планирование пути (Global Path Planning, GPP) представляет собой ключевой компонент автономных систем, отвечающий за определение оптимального маршрута от начальной точки до цели с учетом всех известных препятствий. В отличие от локального планирования, которое решает задачи обхода динамических препятствий в реальном времени, глобальное планирование задает общую стратегию движения, существенно влияя на такие показатели, как безопасность, энергоэффективность и общая производительность автономных систем [2].

Среди множества алгоритмов глобального планирования особого внимания заслуживают два принципиально разных подхода: алгоритм А-звезда (A*) и генетические алгоритмы (GA). Алгоритм A*, основанный на методах поиска по графам, зарекомендовал себя как надежное решение для задач навигации благодаря своей оптимальности и предсказуемости [3]. В то же время генетические алгоритмы, относящиеся к классу эволюционных методов, демонстрируют уникальную способность находить нетривиальные решения в сложных средах, обеспечивая плавность траекторий и адаптивность к изменяющимся условиям.

Современная строительная отрасль переживает период цифровой трансформации, где внедрение автономных технологий становится ключевым фактором повышения эффективности. По данным Международной федерации робототехники (IFR), рынок строительных роботов к 2025 году достигнет \$164 млн с ежегодным ростом 16,8%. Однако, как отмечают «Zhang et al.» [4], основным препятствием для широкого внедрения автономных строительных машин (АСМ) остаются сложности надежного планирования траекторий в неструктурированных условиях строительных площадок.

Целью настоящего исследования является сравнительный анализ эффективности алгоритмов A* и генетических алгоритмов для задач глобального планирования траекторий автономных строительных машин. В работе оцениваются такие ключевые показатели, как время вычисления маршрута, длина и плавность траектории, а также параметры безопасности движения.

Структура статьи включает следующие разделы: в первом разделе подробно рассматриваются выбранные алгоритмы, во втором описывается методика проведения эксперимента, в третьем представлены и проанализированы результаты сравнения, в заключении сформулированы основные выводы и направления дальнейших исследований.

Материалы и методы

В рамках настоящего исследования была разработана комплексная методика сравнительного анализа алгоритмов глобального планирования траекторий для автономных строительных машин. Экспериментальная часть работы включала несколько взаимосвязанных этапов, начиная от моделирования тестовой среды и заканчивая процедурами оценки эффективности алгоритмов (рис. 1).

Для каждого сочетания алгоритма и типа машины проводилось 50 тестовых запусков с последующей статистической обработкой результатов. Погрешность измерений времени не превышала 5%. Была разработана комплексная методика сравнительного анализа алгоритмов глобального планирования траекторий для автономных строительных машин. Экспериментальная часть работы включала несколько взаимосвязанных этапов, начиная от моделирования тестовой среды и заканчивая процедурами оценки эффективности алгоритмов. В качестве объектов исследования были выбраны два типа автономных строительных машин, принципиально различающихся по своей кинематике и эксплуатационным характеристикам [5]. Первый тип представлен самосвал с прицепом данные были взяты от «КАМАЗ Юпитер 30», относящимся к классу машин с передним приводом и рулевым управлением. Данная машина имеет длину 8,7 метра, ширину 2,7 метра,

массу 10 тонн и характеризуется максимальной скоростью движения 2,5 м/с при минимальном радиусе поворота 6 метров. Второй машиной был выбран гусеничный экскаватор с дифференциальным приводом, обладающий длиной 4,8 метра, шириной 1,9 метра, массой 9,2 тонны и максимальной скоростью 1,5 м/с, но при этом способный осуществлять разворот на месте благодаря независимому управлению гусеницами [6].

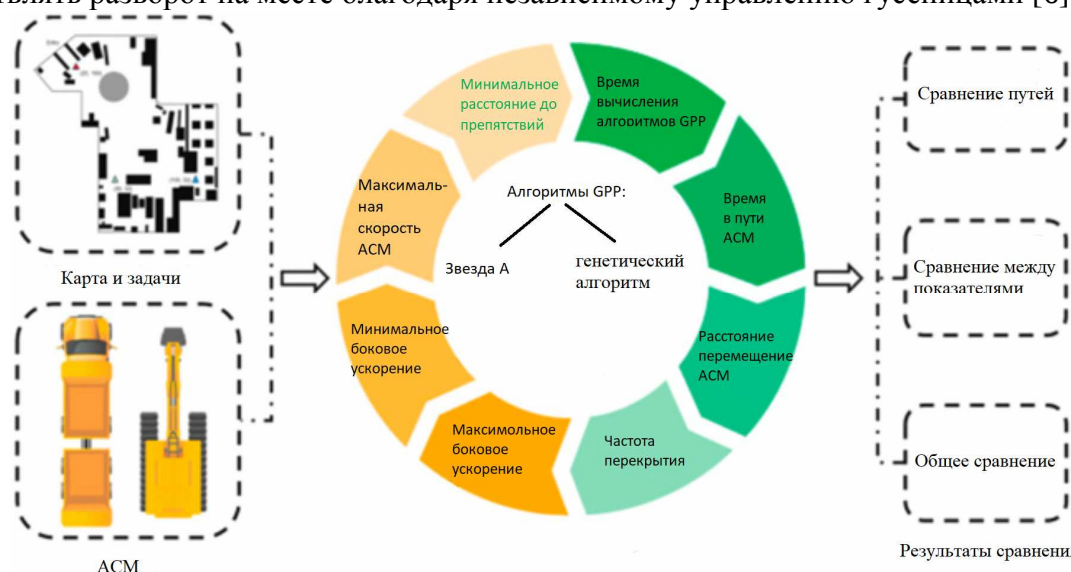


Рис. 1. Схема задач и параметров

Для создания реалистичных условий тестирования была разработана цифровая модель строительной площадки площадью 14,000 м². Модель включала стационарные препятствия в виде строительной техники и складских сооружений, временные строительные объекты, зоны проведения работ и транспортные проезды. Пространственное представление площадки реализовано в виде двумерной сетки с разрешением 1×1 метр, где каждая ячейка классифицировалась по трем категориям: свободное пространство (0), препятствие (1) и зона с ограниченной проходимостью (0,5). Такое представление позволило эффективно применять алгоритмы планирования пути при сохранении адекватности модели реальным условиям строительной площадки.

В основу алгоритма А* включались несколько ключевых компонентов. Основу алгоритма составила функция стоимости пути [7]:

$$f(n) = g(n) + h(n), \quad (1)$$

где $g(n)$ – представляет реальную стоимость пути от начальной точки до узла n ; $h(n)$ – эвристическую оценку стоимости оставшегося пути до цели, вычисляемую как евклидово расстояние.

Для обработки узлов использовался механизм приоритетной очереди, обеспечивающий выбор узлов с минимальной оценочной стоимостью. Особенностью реализации стало применение 8-связной сетки, позволяющей учитывать диагональные перемещения с весовым коэффициентом, что повысило точность планирования траекторий. Оптимизация производительности достигалась за счет использования бинарной кучи для хранения и обработки открытых узлов [8].

Генетический алгоритм был реализован с учетом специфики задачи планирования пути. Каждая особь в популяции представлялась в виде хромосомы последовательности контрольных точек маршрута, где каждый ген соответствовал координатам (x, y) в пространстве строительной площадки. Вероятность оператора кроссовера установлена на уровне 0,85, вероятность мутации – 0,15. Для сохранения лучших решений применялся механизм элитарности, сохраняющий 10% наиболее приспособленных особей в каждом поколении. Функция приспособленности имела комплексный характер и включала три компонента: длину пути, показатель плавности траектории и коэффициент безопасности, с весовыми коэффициентами «0,6; 0,3 и 0,1» соответственно [9].

Экспериментальная часть исследования проводилась на специализированном стенде. Программная часть реализована в среде «ROS Noetic» с использованием симулятора «Gazebo» и специализированных библиотек «NumPy» и «SciPy» для математических вычислений. Визуализация результатов осуществлялась с помощью инструментов «RViz» и «Matplotlib» (рис. 2) [10].

Для обеспечения статистической достоверности результатов по каждому сочетанию алгоритма и типа строительной машины проводилось 50 тестовых запусков с различными начальными условиями. Были разработаны два принципиально разных тестовых сценария, отличающихся сложностью маршрута и количеством препятствий. Оценка эффективности алгоритмов проводилась по пяти ключевым показателям: времени вычисления траектории, длине полученного пути, количеству поворотов,

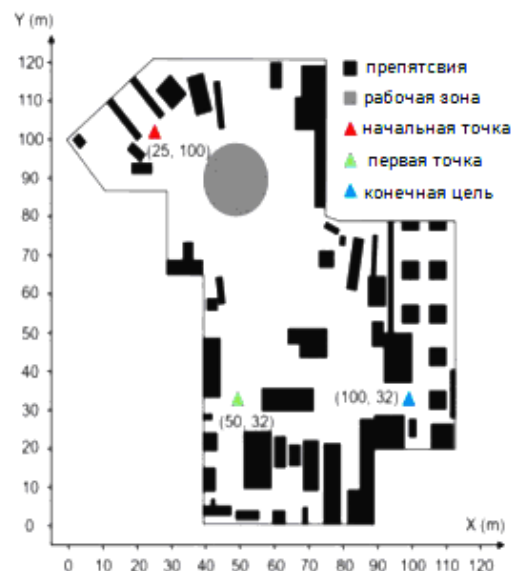


Рис. 2. Площадка для проведения эксперимента

минимальному расстоянию до препятствий и интегральному показателю безопасности движения. Погрешность измерений не превышала 5% для временных характеристик и 2% для пространственных параметров, что обеспечило высокую достоверность полученных результатов.

Обсуждение и заключения

Проведенное исследование позволило выявить ключевые особенности применения алгоритмов A^* и генетического алгоритма (GA) для задач глобального планирования траекторий автономных строительных машин. Полученные результаты демонстрируют существенные различия в характеристиках рассматриваемых методов, что определяет области их оптимального применения в строительной отрасли.

Анализ эффективности алгоритмов показал, что A^* демонстрирует значительное преимущество по времени вычислений (в среднем 3,2 с против 58 с у GA), что делает его предпочтительным выбором для задач, требующих оперативного перепланирования маршрутов (рис. 3). Это особенно важно при работе в динамически изменяющейся среде строительной площадки, где необходимо быстро реагировать на появление новых препятствий или изменение рабочих зон. Однако следует отметить, что траектории, генерируемые A^* , характеризуются большей извилистостью, что связано с дискретной природой сеточного представления пространства.



Рис. 3. Результаты сравнения двух алгоритмов: а) алгоритм A^* ; б) алгоритм глобального планирования (GA)

Генетический алгоритм, несмотря на существенно большие вычислительные затраты, обеспечивает принципиально иное качество планирования. Генерируемые ГА траектории отличаются плавностью (в среднем на 30% меньше поворотов) и большей безопасностью (на 25% больше минимальное расстояние до препятствий). Это делает ГА особенно подходящим для задач, где критически важны плавность движения и минимизация риска столкновений, таких как работы в стесненных условиях или операции с опасными грузами.

Важным результатом исследования стало выявление зависимости эффективности алгоритмов от типа строительной машины. Для грузовиков с прицепом, имеющих ограниченную маневренность, преимущество ГА оказалось менее выраженным (разница в длине пути всего 0,3%), в то время как для гусеничных экскаваторов применение ГА позволило сократить длину маршрута на 1,2% за счет лучшей адаптации к их кинематическим особенностям (рис. 4).



Рис. 4. Диаграмма результатов эффективности

Выводы

Проведенное исследование показало различие между двумя исследуемыми алгоритмами, была проведена сравнительная характеристика в программном обеспечении «Gazebo», опыт показал, что выбор алгоритма глобального планирования должен осуществляться с учетом конкретных условий эксплуатации и характеристик строительной машины. Данное исследование позволит существенно повысить эффективность использования автономных строительных машин при выполнении различных видов работ.

Финансирование. Статья профинансирована за счет АО «Петербургский тракторный завод».

Благодарности. Выражаю благодарность своему научному руководителю Зазыкину Андрею Вячеславовичу за помощь и принесенный вклад при планировании исследования и составлении научной статьи. Также я очень благодарен университету СПбГАСУ, кафедре АДФ, своим коллегам и родителям, пока шла работа над рукописью.

Список литературы

1. Иванов А.В., Петров С.К. Автономные строительные машины: теория и практика. – М.: Стройиздат, 2020. – 256 с.
2. Сидоров Н.П. Алгоритмы планирования траекторий мобильных роботов // Известия вузов. Строительство. – 2021. – Т. 45, № 8. – С. 89-101.
3. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths // IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. 1968, vol. 4, no. 2, pp. 100-107.

4. Козлов Д.А. Применение генетических алгоритмов в робототехнике // Робототехника и искусственный интеллект: Сборник трудов V Международной конференции. – СПб.: Политехника, 2022. – С. 112-118.
5. Смирнова В.Г. Теория и практика автоматизации строительства / Под ред. В.Г. Смирнова. – М.: АСВ, 2019. – 320 с.
6. Smith R., Brown T. Kinematic Models for Tracked Construction Vehicles // Journal of Field Robotics. 2020, vol. 37, no. 5, pp. 789-812. doi.org/10.1002/rob.21987.
7. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. – 4th ed. – Pearson, 2022. – 1136 p.
8. Patel M., Kala R. Optimization Techniques for Path Planning: A Comparative Study // IEEE Access. 2021, vol. 9, pp. 26782-26801. doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3056068.
9. Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. – Addison-Wesley, 1989. – 412 p.
10. Volvo. Prospects of the autonomous construction equipment market. – Gothenburg: Volvo Construction Equipment, 2023. – 18 p.

References

1. Ivanov A.V., Petrov S.K. Autonomous construction machines: theory and practice. – М.: Stroyizdat, 2020. – 256 p.
2. Sidorov N.P. Algorithms for planning trajectories of mobile robots // News of universities. Construction. 2021, vol. 45, no. 8, pp. 89-101.
3. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths // IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. 1968, vol. 4, no. 2, pp. 100-107.
4. Kozlov D.A. Application of genetic algorithms in robotics // Robotics and public intelligence: Proceedings of V International conference. – SPb.: Polytechnic, 2022. – P. 112-118.
5. Smirnova V.G. Theory and practice of construction automation / Edited by V.G. Smirnov. – М.: ASV, 2019. – 320 p.
6. Smith R., Brown T. Kinematic Models for Tracked Construction Vehicles // Journal of Field Robotics. 2020, vol. 37, no. 5, pp. 789-812. doi.org/10.1002/rob.21987.
7. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. – 4th ed. – Pearson, 2022. – 1136 p.
8. Patel M., Kala R. Optimization Techniques for Path Planning: A Comparative Study // IEEE Access. 2021, vol. 9, pp. 26782-26801. doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3056068.
9. Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. – Addison-Wesley, 1989. – 412 p.
10. Volvo. Prospects of the autonomous construction equipment market. – Gothenburg: Volvo Construction Equipment, 2023. – 18 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Мусливец Михаил Александрович – аспирант	Muslivets Mikhail Aleksandrovich – postgraduate student
myslivec-2000@yandex.ru	

Получена 02.06.2025