

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГАОУ ВО НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ»

Факультет компьютерных наук
Образовательная программа «Прикладная математика и информатика»

Отчет об исследовательском проекте на тему:

Автономная навигация мобильного робота с использованием Robotic Operating System: алгоритмы планирования и управления
(промежуточный, этап 1)

Выполнил студент:

группы #БПМИ244, 2 курса Злобин Герман Эдуардович

Принял руководитель проекта:

Дергачев Степан Алексеевич
Штатный преподаватель
Базовая кафедра Федерального исследовательского центра
«Информатика и управление» Российской академии наук

Москва 2026

Содержание

Аннотация	3
1 Введение	4
1.1 Описание области	4
1.2 Постановка задачи	4
1.3 Структура работы	4
2 Обзор литературы	5
2.1 Обзор методов глобального планирования	5
2.1.1 Алгоритмы поиска по графу	5
2.1.2 Алгоритмы случайной выборки (Sampling-based)	6
2.1.3 Интеллектуальные бионические алгоритмы	7
2.2 Обзор методов локального планирования	9
2.2.1 Классические контроллеры	9
2.2.2 Геометрические или реактивные методы	10
2.2.3 Оптимизационные или предсказательные методы	11
2.3 Вывод по главе	13
Список литературы	15

Аннотация

В работе рассматривается задача планирования движения автономного робота в динамической среде. Выполнен обзор и анализ современных алгоритмов глобального и локально-го планирования, рассмотрены их принципы работы, достоинства и ограничения. Проведено сравнительное исследование методов с точки зрения вычислительной эффективности и применимости в условиях изменяющейся среды. На основе анализа обоснован выбор подходов, наиболее подходящих для задач навигации мобильных роботов.

Ключевые слова

Навигация; планирование пути; динамическая среда; мобильные роботы; локальный и глобальный планировщик.

1 Введение

In progress...

1.1 Описание области

1.2 Постановка задачи

1.3 Структура работы

2 Обзор литературы

Задаче планирования движения мобильных роботов в динамических средах посвящено большое количество научных исследований. В обзорных работах [6, 23, 48], предлагаются классификации методов планирования, анализируются их достоинства и ограничения. В данной главе рассматриваются основные классы алгоритмов глобального и локального планирования с акцентом на их применимость в условиях изменяющейся среды.

2.1 Обзор методов глобального планирования

Методы глобального планирования предназначены для построения маршрута от начальной точки к цели на основе априорной или частично известной карты среды. Как правило, они ориентированы на поиск оптимального или близкого к оптимальному пути и используются на верхнем уровне навигационной системы.

2.1.1 Алгоритмы поиска по графу

Алгоритмы поиска по графу относятся к классическим методам планирования и широко применяются в задачах навигации мобильных роботов [48]. Они предполагают дискретизацию пространства в виде графа или решётки и поиск пути между вершинами.

Алгоритм Дейкстры [11] предназначен для поиска кратчайшего пути в графе с неотрицательными весами рёбер. Он гарантирует нахождение оптимального решения, однако требует обработки большого числа вершин, что приводит к высокой вычислительной сложности при увеличении размера карты.

Алгоритм A* [19] является развитием метода Дейкстры и использует эвристическую функцию для ускорения поиска. При корректном выборе эвристики A* существенно снижает количество рассматриваемых вершин и демонстрирует высокую эффективность в двумерных и слаборазмерных средах. Тем не менее, в сложных и высокоразмерных пространствах его производительность снижается.

В условиях динамической среды классические алгоритмы Дейкстры и A* требуют полного пересчёта маршрута при изменении информации о препятствиях, что ограничивает их применение в реальном времени.

Для устранения данного недостатка были разработаны инкрементальные алгоритмы перепланирования. **Алгоритм D*** [45] и его модификация **D* Lite** [26] позволяют обновлять ранее найденный путь при появлении новых данных об окружающей среде. **Алгоритм Lifelong Planning A* (LPA*)** [26] поддерживает повторное использование результатов

предыдущего поиска. **Алгоритм ARA*** [28] реализует anytime-подход, обеспечивая быстрое получение приближённого решения с последующим улучшением.

Таким образом, алгоритмы поиска по графу обеспечивают высокое качество планирования и предсказуемость поведения робота. Однако их применение в динамических средах ограничено вычислительной сложностью и зависимостью от точности карты.

2.1.2 Алгоритмы случайной выборки (Sampling-based)

Алгоритмы случайной выборки (sampling-based planners) предназначены для планирования движения в непрерывных и высокоразмерных пространствах конфигураций [47]. Они основаны на случайному семплировании допустимых состояний и построении графа или дерева достижимых конфигураций.

Алгоритм Rapidly-exploring Random Tree (RRT) [27] осуществляет итеративное расширение дерева в направлении случайных точек пространства. Он быстро находит допустимые траектории в сложных средах и обладает хорошими исследовательскими свойствами. Однако получаемые пути, как правило, далеки от оптимальных.

Алгоритм RRT* [22] является модификацией RRT и гарантирует асимптотическую оптимальность. По мере увеличения числа семплов качество найденного пути улучшается. Недостатком RRT* является высокая вычислительная сложность и медленная сходимость в средах с узкими проходами.

Алгоритм Batch Informed Trees (BIT*) [17] сочетает идеи эвристического поиска и семплирования. Он ограничивает область поиска с использованием эвристики, аналогичной A*, что повышает эффективность планирования. **Алгоритм RABIT*** [9] расширяет BIT* за счёт применения локальной оптимизации, что ускоряет сходимость к качественным решениям.

Для задач с динамическими препятствиями предлагаются специализированные методы, например **Risk-DTRRT** [8], учитывающий вероятность столкновений и уровень риска при построении траектории.

В целом семплинг-базированные алгоритмы хорошо масштабируются на пространства высокой размерности и не требуют полной дискретизации среды. Однако в динамических условиях они часто нуждаются в перестроении структуры поиска, что снижает их эффективность при быстром изменении обстановки.

2.1.3 Интеллектуальные бионические алгоритмы

Бионические и интеллектуальные алгоритмы основаны на моделировании коллективного поведения биологических систем и применяются для решения задач оптимизации [29]. В планировании движения они используются для поиска приближённых оптимальных траекторий.

Генетические алгоритмы (GA) [20] представляют траекторию в виде хромосомы и используют операции скрещивания и мутации для поиска оптимального решения. Они обладают высокой гибкостью и способны адаптироваться к изменениям среды, однако требуют значительных вычислительных ресурсов и не гарантируют сходимости за ограниченное время.

Алгоритмы муравьиной колонии (ACO) [32] основаны на коллективном поиске пути с использованием виртуальных феромонов. Они эффективны в задачах поиска кратчайших маршрутов, но чувствительны к настройке параметров и могут медленно адаптироваться к динамическим изменениям.

Алгоритм искусственной пчелиной колонии (ABC) [10] и **алгоритм роя частиц (PSO)** [21] применяются для оптимизации параметрических представлений траектории. Их преимуществами являются простота реализации и возможность параллельной обработки. Основным недостатком является зависимость качества решения от начальной инициализации и параметров.

Бионические методы демонстрируют хорошую адаптивность, однако чаще используются в онлайн-планировании или в средах с медленно меняющейся динамикой.

Таблица 2.1: Сравнение алгоритмов глобального планирования

Класс алгоритм	Работа в динамической среде	Вычислительная сложность	Основные преимущества	Основные недостатки
Графовые Dijkstra	Низкая	Высокая	Гарантированная оптимальность, простота	Полный пересчёт при изменениях
Графовые A*	Низкая	Средняя	Быстрее Дейкстры, эвристический поиск	Зависит от эвристики
Графовые D* [*]	Высокая	Средняя	Инкрементальное перепланирование	Сложная реализация
Графовые D* Lite	Высокая	Средняя	Эффективное обновление пути	Требует памяти
Графовые LPA*	Высокая	Средняя	Повторное использование поиска	Медленнее D* Lite
Графовые ARA*	Средняя	Средняя	Быстрое первое решение	Временно субоптимален
Семплинг RRT	Средняя	Низкая	Быстро находит путь	Плохое качество пути
Семплинг RRT*	Средняя	Высокая	Оптимальные траектории	Медленная сходимость
Семплинг BIT*	Средняя	Средняя	Эвристическое ускорение	Сложная настройка
Семплинг RABIT*	Средняя	Средняя	Быстрая оптимизация	Зависит от локального оптимизатора
Семплинг Risk-DTRRT	Высокая	Высокая	Учет неопределённости	Сложность модели
Бионические GA	Средняя	Высокая	Гибкость, адаптация	Медленная сходимость
Бионические ACO	Средняя	Средняя	Распределённый поиск	Чувствителен к параметрам
Бионические ABC	Средняя	Средняя	Простота реализации	Нестабильность
Бионические PSO	Средняя	Средняя	Быстро сходится	Локальные минимумы

2.2 Обзор методов локального планирования

Методы локального планирования предназначены для формирования управляющих воздействий в реальном времени на основе текущего состояния робота и информации о ближайшем окружении. В отличие от глобальных планировщиков, которые строят маршрут на всей карте, локальные методы работают в ограниченной области и ориентированы прежде всего на безопасное движение, обход препятствий и следование заданному глобальному пути. Это делает их особенно важными в динамических средах, где присутствуют движущиеся объекты и неопределенность в данных сенсоров. Как правило, локальные планировщики используются совместно с глобальными: глобальный уровень задаёт опорный маршрут, а локальный корректирует движение робота с учётом текущей ситуации.

2.2.1 Классические контроллеры

Классические контроллеры применяются в первую очередь для задачи слежения за заданной траекторией и стабилизации движения робота. Они не выполняют планирование траектории в строгом смысле, однако широко используются как нижний исполнительный уровень в навигационных системах.

PID-контроллер является одним из наиболее простых и распространённых регуляторов. Он формирует управляющее воздействие на основе текущей ошибки, её интегральной и дифференциальной составляющих. В задачах мобильной робототехники PID применяется для управления линейной и угловой скоростью робота с целью достижения заданной позиции или следования траектории [3]. Основными преимуществами PID-регулятора являются простота реализации, низкие вычислительные затраты и высокая частота работы. К недостаткам относится отсутствие учёта динамики окружающей среды и невозможность самостоятельного избегания препятствий, что ограничивает его применение только исполнительным уровнем.

Основная цель — заставить робота перемещаться в заданную позицию с помощью PID-регулятора, настроенного на управление линейным и угловым положением. PID-контроллер используется для регулирования скорости и ориентации робота так, чтобы он достигал требуемой позиции.

Линейно-квадратичный регулятор (LQR) основан на минимизации квадратичного функционала качества, учитывающего отклонение состояния системы от заданного и величину управляющего воздействия. В работах [41] и [43] показано, что LQR позволяет обеспечить более устойчивое и оптимальное движение мобильного робота по сравнению с

PID, особенно при задаче слежения за траекторией. LQR учитывает модель динамики системы, что повышает точность управления. Его основным недостатком является необходимость линеаризации модели и чувствительность к ошибкам параметров.

Комбинированные схемы PID+LQR используются для объединения простоты PID и оптимальных свойств LQR. В работе [35] показано, что такой подход позволяет повысить устойчивость системы, улучшить качество позиционирования и подавить колебания. Однако гибридные контроллеры требуют более сложной настройки и точного согласования параметров.

В целом классические контроллеры не являются полноценными локальными планировщиками, но выполняют важную роль исполнительного уровня, обеспечивая реализацию траекторий, полученных более высокими уровнями навигационной системы.

2.2.2 Геометрические или реактивные методы

Геометрические или реактивные методы локального планирования принимают решения непосредственно на основе текущих сенсорных данных и геометрии окружающей среды. Они не строят долгосрочные траектории, а выбирают допустимое направление или скорость движения, обеспечивающие безопасность в ближайшем будущем.

Метод Dynamic Window Approach (DWA) был предложен в [14]. Он рассматривает пространство допустимых линейных и угловых скоростей робота и выбирает те из них, которые достижимы с учётом динамических ограничений и не приводят к столкновениям. Далее используется целевая функция, учитывающая приближение к цели, скорость движения и расстояние до препятствий. В работе [7] предложена модификация DWA, ориентированная на динамические препятствия и групповые движения роботов. Основным достоинством DWA является высокая скорость работы и практическая применимость, однако метод подвержен застреванию в локальных минимумах.

Метод Velocity Obstacles (VO) был предложен в [13] и основан на построении множества скоростей, которые приведут к столкновению с препятствием в будущем. Эти скорости исключаются из допустимого пространства управления. Такой подход позволяет учитывать движение препятствий и прогнозировать возможные столкновения. В работе [31] предложено расширение VO, учитывающее как положение, так и скорости объектов. Преимуществом метода является корректная работа в динамических средах, однако он чувствителен к шуму в измерениях.

Метод искусственных потенциальных полей (APF) был предложен Хатибом

в [24]. Цель моделируется как источник притяжения, а препятствия — как источники отталкивания, и робот движется по направлению результирующего градиента. В [34] предложена модификация APF для задач навигации в неизвестной среде с динамическими препятствиями. Основными преимуществами APF являются простота и высокая вычислительная эффективность. Существенным недостатком является наличие локальных минимумов, из-за которых робот может застревать.

Метод Vector Field Histogram (VFH) был представлен в [4] и основан на построении гистограммы плотности препятствий по данным сенсоров. На её основе выбирается направление движения с минимальной опасностью столкновения. В работе [1] предложены модификации VFH, улучшающие точность построения гистограмм и учитывающие динамические препятствия. Метод хорошо работает в реальном времени, однако не обеспечивает глобальной оптимальности траектории.

Геометрические методы отличаются высокой вычислительной эффективностью и широко применяются в реальных робототехнических системах. Их основным недостатком является локальный характер принятия решений, что может приводить к неоптимальному поведению в сложных средах.

2.2.3 Оптимизационные или предсказательные методы

Оптимизационные методы формулируют задачу локального планирования как задачу оптимального управления, в которой необходимо минимизировать функционал качества при наличии динамических и кинематических ограничений.

Model Predictive Control (MPC) является одним из наиболее распространённых методов этого класса. В обзоре [46] показано, что MPC позволяет учитывать динамику робота, ограничения на управление и наличие препятствий. Алгоритм на каждом шаге решает задачу оптимизации на конечном горизонте прогнозирования, обеспечивая высокое качество траекторий. Основным недостатком является высокая вычислительная сложность.

Model Predictive Path Integral (MPPI) представляет собой стохастический вариант MPC, основанный на выборке большого числа возможных траекторий и оценке их стоимости [15]. В работе [16] MPPI успешно применён для задачи агрессивного автономного вождения. Преимуществами MPPI являются возможность работы с нелинейной динамикой и с ложными функциями стоимости. Недостатком является необходимость больших вычислительных ресурсов.

Алгоритм CCS-MPPI, предложенный в [2], объединяет MPPI с методом Covariance

Steering и позволяет управлять не только средним значением состояния, но и его ковариацией, обеспечивая вероятностные гарантии соблюдения ограничений. Этот подход особенно эффективен в стохастических средах, но сложен в реализации.

Метод RMPPI, предложенный в [39], направлен на повышение робастности MPPI к ошибкам модели и внешним возмущениям. Он сочетает MPPI с трекинг-контроллером и механизмами безопасного распространения номинальной траектории.

Метод Adaptive MPPI предложен в работе [37], в нём параметры модели и контроллера автоматически настраиваются под текущие условия среды. Это позволяет повысить устойчивость алгоритма при неточной модели динамики.

Метод MPPI with Costmap, представленный в работе [38], использует локальную карту затрат (cost map), формируемую на основе априорной карты и данных с камеры, что позволяет интегрировать глобальную информацию в локальное планирование.

Оптимизационные методы обеспечивают наивысшее качество траекторий и наилучшее учёт динамики робота и среды, однако их применение ограничено высокими вычислительными затратами и сложностью реализации.

Таблица 2.2: Сравнение алгоритмов локального планирования

Класс алгоритм	Работа в динамической среде	Вычислительная сложность	Основные преимущества	Основные недостатки
Классические контроллеры PID	Низкая	Низкая	Простота, высокая частота управления	Нет планирования, нет обхода препятствий
Классические контроллеры LQR	Средняя	Средняя	Оптимальность, устойчивость	Требует линеаризации
Классические контроллеры PID+LQR	Средняя	Средняя	Повышенная устойчивость и точность	Сложность настройки
Геометрические DWA	Высокая	Низкая	Реактивность, практическая применимость	Локальные минимумы
Геометрические VO	Высокая	Низкая–средняя	Учёт движущихся препятствий	Чувствительность к шуму
Геометрические APF	Средняя	Очень низкая	Простота, высокая скорость	Локальные минимумы
Геометрические VFH	Высокая	Низкая	Эффективная работа с сенсорами	Нет глобальной оптимальности
Оптимизационные MPC	Высокая	Высокая	Учёт ограничений и динамики	Большие вычислительные затраты
Оптимизационные MPPI	Высокая	Высокая	Качественные траектории	Требует параллелизма
Оптимизационные CCS-MPPI	Очень высокая	Очень высокая	Вероятностные гарантии безопасности	Сложная реализация
Оптимизационные RMPPI	Очень высокая	Очень высокая	Робастность к ошибкам модели	Высокая вычислительная цена
Оптимизационные Adaptive MPPI	Очень высокая	Очень высокая	Адаптация к неопределённости	Сложность настройки
Оптимизационные MPPI + Costmap	Очень высокая	Очень высокая	Интеграция глобальной информации	Большая вычислительная нагрузка

2.3 Вывод по главе

В данной главе был выполнен обзор основных подходов к планированию движения мобильных роботов, включающий методы глобального и локального планирования. Рассмотрены алгоритмы поиска по графу, семплинг-базированные и бионические методы глобального планирования, а также классические контроллеры, геометрические и оптимизационные методы локального уровня. Для каждого класса алгоритмов были проанализированы принципы работы, области применения, преимущества и ограничения.

Показано, что методы глобального планирования позволяют формировать маршрут движения робота с учётом структуры среды и обеспечивают достижение целевой точки, однако в динамических условиях их эффективность ограничивается необходимостью частого перепланирования и высокой вычислительной сложностью. Алгоритмы поиска по графу обеспечивают высокую предсказуемость и качество решений, семплинг-базированные методы лучше масштабируются на сложные и высокоразмерные пространства, а бионические алгоритмы обладают высокой гибкостью, но требуют значительных вычислительных ресурсов и тщательной настройки.

Методы локального планирования, в свою очередь, обеспечивают реактивное управление движением робота и его безопасное взаимодействие с динамической средой. Геометрические методы отличаются высокой скоростью работы и простотой реализации, оптимизационные и предсказательные методы позволяют получать траектории высокого качества с учётом динамики и ограничений, а классические контроллеры играют роль исполнительного уровня, реализующего полученные управляющие воздействия.

Таким образом, анализ показал, что ни один из рассмотренных подходов не является универсальным и полностью самостоятельным решением задачи навигации в динамической среде. Наиболее перспективным и практически оправданным является использование гибридных навигационных систем, в которых глобальный планировщик формирует опорный маршрут, локальный планировщик обеспечивает адаптацию к текущей обстановке и избегание препятствий, а классические контроллеры реализуют устойчивое и точное управление движением робота. Такой многоуровневый подход позволяет совместить преимущества различных методов и повысить надёжность и эффективность автономной навигации.

Список литературы

- [1] Andrej Babinec, Martin Dekan, František Duchoň и Anton Vitko. “Modifications of VFH Navigation Methods for Mobile Robots”. B: *Procedia Engineering* 48 (2012), c. 10—14.
- [2] Balci, Isin M., Bakolas, Efstathios, Vlahov, Bogdan I., Theodorou и Evangelos A. “Constrained Covariance Steering Based Tube-MPPI”. B: *2022 American Control Conference (ACC)* (2022), c. 4197—4202.
- [3] Alexandru Bârsan. “Position Control of a Mobile Robot through PID Controller”. B: *Acta Universitatis Cibiniensis. Technical Series* 71 (2019), c. 14—20.
- [4] Johann Borenstein и Yoram Koren. “The Vector Field Histogram — Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots”. B: *IEEE Journal of Robotics and Automation* 7.3 (1991).
- [5] Said Broumi, Mohamed Talea, Assia Bakali, Florentin Smarandache и Luige Vladareanu. “Applying Dijkstra Algorithm for Solving Neutrosophic Shortest Path Problem”. B: *Proceedings of the 2016 International Conference on Advanced Mechatronic Systems, Melbourne, Australia*. 2016.
- [6] Kuanqi CAI, Chaoqun WANG, Jiyu CHENG, Shuang SON1G, SILVA Clarence W. DE и MENG Max Q.-H. “Mobile Robot Path Planning in Dynamic Environments: A Survey.” B: *Instrumentation* 6.2 (2024), c. 90—100.
- [7] Yanjie Cao и Norzalilah Mohamad Nor. “An improved dynamic window approach algorithm for dynamic obstacle avoidance in mobile robot formation”. B: *Decision Analytics Journal* (2024).
- [8] Wenzheng Chi, Chaoqun Wang, Jiankun Wang и Max Q.-H. Meng. “Risk-DTRRT-Based Optimal Motion Planning Algorithm for Mobile Robots”. B: *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 16.3 (2018/2019), c. 1271—1288.
- [9] Sanjiban Choudhury, Jonathan D. Gammell, Timothy D. Barfoot, Siddhartha S. Srinivasa и Sebastian Scherer. “Regionally Accelerated Batch Informed Trees (RABIT): A Framework to Integrate Local Information into Optimal Path Planning”. B: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (2016), c. 4207—4214.
- [10] Karaboga D. и Basturk B. “A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial Bee Colony (ABC) algorithm”. B: *Journal of Global Optimization* 39.3 (2007), c. 459—471.

- [11] E. W. Dijkstra. “A Note on Two Problems in Connexion with Graphs”. B: *Numerische Mathematik* 1 (1959), c. 269—271.
- [12] František Duchoň, Andrej Babinec, Martin Kajan, Peter Beňo, Martin Florek, Tomáš Fico и Ladislav Jurišica. “Path Planning with Modified A Algorithm for a Mobile Robot”. B: *Procedia Engineering* (2014), c. 59—69.
- [13] Paolo Fiorini и Zvi Shiller. “Motion Planning in Dynamic Environments Using Velocity Obstacles”. B: *The International Journal of Robotics Research* 17.7 (1998), c. 760—772.
- [14] Dieter Fox, Wolfram Burgard и Sebastian Thrun. “The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance”. B: *IEEE Robotics Automation Magazine* (1997).
- [15] Williams G., Aldrich A. и Theodorou E. A. “Model Predictive Path Integral Control: From Theory to Parallel Computation”. B: *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 40.2 (2017), c. 344—357.
- [16] Williams G., Drews P., Goldfain B., Rehg J. M. и Theodorou E. A. “Aggressive driving with model predictive path integral control”. B: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (2016), c. 1433—1440.
- [17] Jonathan D. Gammell, Siddhartha S. Srinivasa и Timothy D. Barfoot. “Batch Informed Trees (BIT): Sampling-based optimal planning via the heuristically guided search”. B: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (2015), c. 3067—3074.
- [18] Meng Guo, Karl H. Johansson и Dimos V. Dimarogonas. “Revising Motion Planning under Linear Temporal Logic Specifications in Partially Known Workspaces”. B: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (2013).
- [19] Peter Hart и Nils Nilsson. “A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths”. B: *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics* 4.2 (1968), c. 100—107.
- [20] J. H Holland. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Four volumes. University of Michigan Press, 1975.
- [21] Kennedy J. и Eberhart R. “Particle Swarm Optimization”. B: *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN'95)* (1995), c. 1942—1948.
- [22] Sertac Karaman и Emilio Frazzoli. “Sampling-based Algorithms for Optimal Motion Planning”. B: *The International Journal of Robotics Research* 30.7 (2011), c. 846—894.

- [23] Karthik Karur, Nitin Sharma, Chinmay Dharmatti и Joshua E. Siegel. “A Survey of Path Planning Algorithms for Mobile Robots”. B: *Vehicles* 3.3 (2021), c. 448—468.
- [24] Oussama Khatib. “Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots”. B: *The International Journal of Robotics Research* 5.1 (1986), c. 90—98.
- [25] “Knowledge-based Genetic Algorithm for Dynamic Path Planning of Mobile Robots”. B: *IEEE International Conference on Robotics and Automation* 5 (2004), c. 350—4355.
- [26] Sven Koenig и Maxim Likhachev. “D* Lite”. B: *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI)* (2002), c. 476—483.
- [27] Steven M. LaValle. “Rapidly-exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning”. B: *TR-98-11, Computer Science Dept., Iowa State University* (1998).
- [28] Maxim Likhachev, David I. Ferguson, Geoffrey J. Gordon, Anthony (Tony) Stentz и Sebastian Thrun. “Anytime Dynamic A: An Anytime, Replanning Algorithm”. B: *Proceedings of the 15th International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS)* (2005), c. 262—271.
- [29] Shiwei Lin, Jianguo Wang и Xiaoying Kong. “Bio-Inspired Reactive Approaches for Automated Guided Vehicle Path Planning: A Review”. B: *Biomimetics* 11.1 (2026).
- [30] Hong Liu, Bin Xu, Dianjie Lu и Guijuan Zhang. “A path planning approach for crowd evacuation in buildings based on improved artificial bee colony algorithm”. B: 68 (2018), c. 360—376.
- [31] Wanxin Liu, Bo Zhang, Pudong Liu, Jian Pan и Shiyu Chen. “Velocity Obstacle Guided Motion Planning Method in Dynamic Environments”. B: *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences* 36.1 (2024).
- [32] Dorigo M., Maniezzo V. и Colorni A. “Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents”. B: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B* 26.1 (1996), c. 29—41.
- [33] Edward F. Moore. “An Algorithm for Finding Shortest Paths in a Graph”. B: *Proceedings of an International Symposium on the Theory of Switching* (1959), c. 285—292.
- [34] Shahid Mohammad Mulla, Aryan Kanakapudi, Lakshmi Narasimhan и Anuj Tiwari. “RF-Source Seeking with Obstacle Avoidance using Real-time Modified Artificial Potential Fields in Unknown Environments”. B: *arXiv preprint, arXiv:2506.06811, version 1* (2025).

- [35] Chukwuma Samuel Okafor, Chimaihe B. Mbachu, Chidiebere N. Muoghalu и Bonaventure O. Ekengwu. “Positioning and Trajectory Tracking with Deflection Suppression in Flexible Link Robotic Manipulator Using PID-LQR Controller”. B: *Asian Journal of Science, Technology, Engineering, and Art* 3.4 (2025), c. 1131–1146.
- [36] Morgan Quigley, Brian Gerkey, Ken Conley, Josh Faust, Tully Foote, Jeremy Leibs, Eric Berger, Rob Wheeler и Andrew Y. Ng. “ROS: an open-source Robot Operating System”. B: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (2009).
- [37] Guzman R., Oliveira R. и Ramos F. “Adaptive Model Predictive Control by Learning Classifiers”. B: *Proceedings of The 4th Annual Learning for Dynamics and Control Conference (PMLR)* 168 (2022), c. 480—491.
- [38] Guzman R., Oliveira R. и Ramos F. “Model predictive path integral control for car driving with autogenerated cost map based on prior map and camera image”. B: *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)* (2019), c. 2109—2114.
- [39] Gandhi M. S., Vlahov B., Gibson J., Williams G. и Theodorou E. A. “Robust Model Predictive Path Integral Control: Analysis and Performance Guarantees”. B: *IEEE Robotics and Automation Letters* 6.2 (2021), c. 1423—1430.
- [40] Roudabe Seif и Mohammadreza Asghari Oskoei. “Mobile Robot Path Planning by RRT in Dynamic Environments*”. B: *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)* 7.5 (2015), c. 24—30.
- [41] Zefan Su, Hanchen Yao, Jianwei Peng, Zhelin Liao, Zengwei Wang, Hui Yu, Houde Dai и Tim C. Lueth. “LQR-based control strategy for improving human–robot companionship and natural obstacle avoidance”. B: *Biomimetic Intelligence and Robotics* 4.4 (2024).
- [42] Alaa Tharwat, Mohamed Elhoseny, Aboul Ella Hassanien, Thomas Gabel и Arun Kumar Sangaiah. “Intelligent Bézier curve-based path planning model using Chaotic Particle Swarm Optimization algorithm”. B: *Cluster Computing* (2018), c. 4745—4766.
- [43] Baiyu Tian, Tianliang Lin, Chunhui Zhang, Zhongshen Li, Shengjie Fu и Qihuai Chen. “Mixed Linear Quadratic Regulator Controller Design for Path Tracking Control of Autonomous Tracked Vehicles”. B: *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (2024), c. 127—136.
- [44] Jinguo Wang, Na Wang и Huiyu Jiang. “Robot global path planning based on improved ant colony algorithm”. B: *Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering* (2015), c. 2099—2102.

- [45] Jingjin Yu и Steven M. LaValle. “The Focussed D Algorithm for Real-Time Replanning”. B: *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI '95)* (1995), c. 1652—1659.
- [46] Shuyou Yu, Matthias Hirche, Yanjun Huang, Hong Chen и Frank Allgöwer. “Model predictive control for autonomous ground vehicles: a review”. B: *Autonomous Intelligent Systems* 1.4 (2021).
- [47] Liding Zhang, Kuanqi Cai, Zewei Sun, Zhenshan Bing, Chaoqun Wang, Luis Figueredo, Sami Haddadin и Alois Knoll. “Motion planning for robotics: A review for sampling-based planners”. B: *Biomimetic Intelligence and Robotics* 5.1 (2025), c. 262—271.
- [48] Chengmin Zhou, Bingding Huang и Pasi Fränti. “A review of motion planning algorithms for intelligent robotics”. B: *arXiv preprint, arXiv:2102.02376, version 2* (2021).