

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

# Содержание

<b>Аннотация</b>	<b>3</b>
<b>1 Введение</b>	<b>4</b>
1.1 Описание области . . . . .	4
1.2 Постановка задачи . . . . .	4
1.3 Структура работы . . . . .	4
<b>2 Обзор литературы</b>	<b>5</b>
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
<b>Список литературы</b>	<b>15</b>

## **Аннотация**

В работе рассматривается задача планирования движения автономного робота в динамической среде. Выполнен обзор и анализ современных алгоритмов глобального и локального 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 случайном 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 офлайн-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 <b>Dijkstra</b>	Низкая	Высокая	Гарантированная оптимальность, простота	Полный пересчёт при изменениях
Графовые <b>A*</b>	Низкая	Средняя	Быстрее Дейкстры, эвристический поиск	Зависит от эвристики
Графовые <b>D*</b>	Высокая	Средняя	Инкрементальное перепланирование	Сложная реализация
Графовые <b>D* Lite</b>	Высокая	Средняя	Эффективное обновление пути	Требует памяти
Графовые <b>LPA*</b>	Высокая	Средняя	Повторное использование поиска	Медленнее D* Lite
Графовые <b>ARA*</b>	Средняя	Средняя	Быстрое первое решение	Временно субоптимален
Семплинг <b>RRT</b>	Средняя	Низкая	Быстро находит путь	Плохое качество пути
Семплинг <b>RRT*</b>	Средняя	Высокая	Оптимальные траектории	Медленная сходимость
Семплинг <b>BIT*</b>	Средняя	Средняя	Эвристическое ускорение	Сложная настройка
Семплинг <b>RABIT*</b>	Средняя	Средняя	Быстрая оптимизация	Зависит от локального оптимизатора
Семплинг <b>Risk-DTRRT</b>	Высокая	Высокая	Учет неопределённости	Сложность модели
Бионические <b>GA</b>	Средняя	Высокая	Гибкость, адаптация	Медленная сходимость
Бионические <b>ACO</b>	Средняя	Средняя	Распределённый поиск	Чувствителен к параметрам
Бионические <b>ABC</b>	Средняя	Средняя	Простота реализации	Нестабильность
Бионические <b>PSO</b>	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 неопределённость 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 <b>PID</b>	Низкая	Низкая	Простота, высокая частота управления	Нет планирования, нет обхода препятствий
Классические контроллеры <b>LQR</b>	Средняя	Средняя	Оптимальность, устойчивость	Требует линеаризации
Классические контроллеры <b>PID+LQR</b>	Средняя	Средняя	Повышенная устойчивость и точность	Сложность настройки
Геометрические <b>DWA</b>	Высокая	Низкая	Реактивность, практическая применимость	Локальные минимумы
Геометрические <b>VO</b>	Высокая	Низкая–средняя	Учёт движущихся препятствий	Чувствительность к шуму
Геометрические <b>APF</b>	Средняя	Очень низкая	Простота, высокая скорость	Локальные минимумы
Геометрические <b>VFH</b>	Высокая	Низкая	Эффективная работа с сенсорами	Нет глобальной оптимальности
Оптимизационные <b>MPC</b>	Высокая	Высокая	Учёт ограничений и динамики	Большие вычислительные затраты
Оптимизационные <b>MPPI</b>	Высокая	Высокая	Качественные траектории	Требует параллелизма
Оптимизационные <b>CCS-MPPI</b>	Очень высокая	Очень высокая	Вероятностные гарантии безопасности	Сложная реализация
Оптимизационные <b>RMPPI</b>	Очень высокая	Очень высокая	Робастность к ошибкам модели	Высокая вычислительная цена
Оптимизационные <b>Adaptive MPPI</b>	Очень высокая	Очень высокая	Адаптация к неопределённости	Сложность настройки
Оптимизационные <b>MPPI + Costmap</b>	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”. В: *Procedia Engineering* 48 (2012), с. 10—14.
- [2] Balci, Isin M., Bakolas, Efstathios, Vlahov, Bogdan I., Theodorou и Evangelos A. “Constrained Covariance Steering Based Tube-MPPT”. В: *2022 American Control Conference (ACC)* (2022), с. 4197—4202.
- [3] Alexandru Bârsan. “Position Control of a Mobile Robot through PID Controller”. В: *Acta Universitatis Cibiniensis. Technical Series* 71 (2019), с. 14—20.
- [4] Johann Borenstein и Yoram Koren. “The Vector Field Histogram — Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots”. В: *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”. В: *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.” В: *Instrumentation* 6.2 (2024), с. 90—100.
- [7] Yanjie Cao и Norzalilah Mohamad Nor. “An improved dynamic window approach algorithm for dynamic obstacle avoidance in mobile robot formation”. В: *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”. В: *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 16.3 (2018/2019), с. 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”. В: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (2016), с. 4207—4214.
- [10] Karaboga D. и Basturk B. “A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial Bee Colony (ABC) algorithm”. В: *Journal of Global Optimization* 39.3 (2007), с. 459—471.

- [11] E. W. Dijkstra. “A Note on Two Problems in Connexion with Graphs”. B: *Numerische Mathematik* 1 (1959), с. 269—271.
- [12] František DuchoĚ, Andrej Babinec, Martin Kajan, Peter BeĚo, Martin Florek, Tomáš Fico и Ladislav Juriřica. “Path Planning with Modified A Algorithm for a Mobile Robot”. B: *Procedia Engineering* (2014), с. 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), с. 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), с. 344—357.
- [16] Williams G., Drews P., Goldfain B., Rehğ J. M. и Theodorou E. A. “Aggressive driving with model predictive path integral control”. B: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (2016), с. 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), с. 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), с. 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), с. 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), с. 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), с. 448—468.
- [24] Oussama Khatib. “Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots”. B: *The International Journal of Robotics Research* 5.1 (1986), с. 90—98.
- [25] “Knowledge-based Genetic Algorithm for Dynamic Path Planning of Mobile Robots”. B: *EEE International Conference on Robotics and Automation* 5 (2004), с. 350—4355.
- [26] Sven Koenig и Maxim Likhachev. “D\* Lite”. B: *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI)* (2002), с. 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), с. 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), с. 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), с. 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), с. 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), с. 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), с. 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), с. 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), с. 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), с. 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), с. 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), с. 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), с. 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), с. 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), с. 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).