



РАЗРАБОТКА АВТОНОМНЫХ РОБОТОВ ДЛЯ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ

Захаров Павел Ильич

доцент кафедры мехатроники и робототехники, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация

В статье рассматриваются теоретические и практические аспекты разработки автономных мобильных роботов, предназначенных для транспортировки грузов в городских и промышленных условиях. Приведён анализ архитектуры систем навигации, восприятия окружающей среды и принятия решений. Описаны современные алгоритмы компьютерного зрения, SLAM-навигации, планирования траекторий и взаимодействия с внешними информационными системами. Особое внимание уделено вопросам энергоэффективности, безопасности, построению коммуникационной инфраструктуры и интеграции с системами логистики. Представлены результаты реализации прототипов и обсуждаются перспективы внедрения автономных систем доставки в экономику будущего.

Ключевые слова: автономный робот, доставка грузов, навигация, SLAM, искусственный интеллект, логистика, сенсорные системы, автономное управление.

Введение

Развитие робототехники в последние десятилетия вышло за пределы промышленной автоматизации и охватило повседневную сферу жизни. Одним из наиболее перспективных направлений является создание автономных мобильных роботов для доставки грузов — систем, способных самостоятельно перемещаться в реальной среде, избегая препятствий, принимая решения и взаимодействуя с пользователями.

Потребность в подобных технологиях особенно возросла в связи с развитием электронной коммерции, городской логистики и пандемийных ограничений, когда спрос на бесконтактную доставку значительно увеличился. Ведущие компании, такие как Amazon, Yandex, Starship Technologies и DPD, активно внедряют автономные решения на базе искусственного интеллекта и компьютерного зрения.

Целью настоящей работы является рассмотрение принципов построения систем автономной доставки, анализ используемых технологий и оценка их эффективности с точки зрения точности, надёжности и экономической целесообразности.

Архитектура и компоненты автономных роботов

Современный автономный робот-доставщик представляет собой сложную мехатронную систему, включающую аппаратные, программные и интеллектуальные компоненты.

К основным подсистемам относятся:

Сенсорный модуль, обеспечивающий восприятие окружающей среды с помощью камер, лидаров, ультразвуковых и инерциальных датчиков.

Модуль навигации, отвечающий за построение карты местности и определение текущего положения робота.

Система планирования и управления, реализующая выбор оптимальной траектории, анализ рисков и предотвращение столкновений.

Коммуникационный блок, обеспечивающий обмен данными с сервером или другими роботами.

Энергетическая система, включающая аккумуляторные батареи и контроллеры питания.

Особое значение имеет интеграция всех компонентов в единую архитектуру с высокой степенью отказоустойчивости. В качестве базовой платформы часто используются Linux-совместимые системы на базе ROS (Robot Operating System), позволяющие унифицировать взаимодействие модулей и ускорить разработку.

Системы навигации и картографирования

Навигация является ключевым элементом автономной мобильности. Наиболее распространённой технологией является SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) — одновременное построение карты и определение положения робота.

Визуальный SLAM использует камеры и алгоритмы обработки изображений (ORB-SLAM, RTAB-Map), в то время как лидарный вариант основан на лазерном сканировании и сопоставлении облаков точек. Современные системы сочетают оба подхода, обеспечивая высокую точность позиционирования даже в условиях плохого освещения.

Для навигации в городских условиях также применяются данные GPS, однако в плотной застройке сигнал часто теряется, поэтому создаются гибридные решения, комбинирующие спутниковые, инерциальные и визуальные источники данных.

Математически навигация реализуется через фильтры Калмана и байесовские модели вероятностного позиционирования, обеспечивающие устойчивость системы при наличии шумов и неопределённости.

Алгоритмы планирования маршрутов и принятия решений

Планирование маршрутов включает три уровня: глобальное (между районами или улицами), локальное (на уровне конкретной сцены) и реактивное (непосредственное избегание препятствий).

Для глобального планирования используются графовые алгоритмы — Dijkstra, A*, Theta* и их эвристические модификации. На локальном уровне всё чаще применяются нейросетевые модели, обученные на реальных данных, что позволяет учитывать поведение пешеходов и динамику движения транспорта.

Реактивное управление реализуется с помощью алгоритмов **Dynamic Window Approach (DWA)** и **Model Predictive Control (MPC)**, позволяющих быстро корректировать траекторию при внезапных изменениях среды.

Современные системы используют элементы **reinforcement learning (обучения с подкреплением)**, где робот учится на основе вознаграждения за успешные действия. Такой подход обеспечивает адаптацию к новым условиям без явного программирования всех сценариев.

Сенсорные технологии и восприятие среды

Качество восприятия внешней среды определяет способность робота действовать безопасно и надёжно. Используются комбинации датчиков:

Лидары обеспечивают трёхмерное облако точек и точное измерение расстояний;

Камеры высокого разрешения распознают объекты, дорожные знаки, людей и животных;

Ультразвуковые сенсоры фиксируют близкие препятствия;

IMU (инерциальные модули) определяют наклон и ускорение платформы.

На основе данных сенсоров строится трёхмерная модель окружающей среды. Для анализа изображений применяются нейросетевые архитектуры (YOLOv8, EfficientDet, SegNet), обученные на больших датасетах городских сцен.

Комбинирование данных разных сенсоров — **сенсорный фьюжн** — осуществляется с помощью фильтров Калмана или сетей Transformer-типа, что повышает точность распознавания и снижает вероятность ошибок.

Энергетическая эффективность и устойчивость

Автономные роботы ограничены ёмкостью аккумуляторов, поэтому оптимизация энергопотребления имеет критическое значение. В системах применяются литий-ионные батареи, суперконденсаторы и интеллектуальные контроллеры, распределяющие энергию между приводами, сенсорами и вычислительным блоком.

Для повышения энергоэффективности используются методы рекуперации при торможении, режимы “сна” при ожидании задач и оптимизация маршрутов с учётом рельефа. Некоторые модели оснащаются солнечными панелями, обеспечивающими подзарядку при движении на открытой местности.

Перспективным направлением является внедрение **энергетических предиктивных моделей**, способных прогнозировать расход батареи в зависимости от маршрута и погодных условий. Это позволяет планировать миссии без риска остановки робота из-за разряда.

Безопасность и взаимодействие с инфраструктурой

Одним из важнейших аспектов разработки является безопасность. Робот должен гарантировать отсутствие столкновений и защищённость коммуникационных каналов.

Современные роботы подключаются к **интеллектуальной инфраструктуре** города (V2X — Vehicle to Everything), обмениваясь данными с дорожными сенсорами, светофорами и центрами управления движением. Это обеспечивает координацию и коллективное взаимодействие между автономными устройствами.

Для связи используется 5G, обеспечивающая малую задержку и высокую пропускную способность, что особенно важно при дистанционном контроле и обновлениях программного обеспечения.

Практические реализации и опыт внедрения

В последние годы реализовано множество успешных проектов. Компания **Starship Technologies** внедрила более тысячи курьерских роботов, работающих в США и Европе. Каждый робот оснащён шестью колёсами, GPS, камерами, лидарами и способен перевозить груз до 10 кг.

В России компания **Yandex** разрабатывает роботов-доставщиков “Яндекс.Ровер”, которые функционируют в городах и университетских кампусах. Они используют компьютерное зрение и обучаются на миллионах километров навигационных данных.

В Беларуси и Казахстане ведутся разработки малогабаритных автономных платформ для внутрискладской логистики, особенно в сфере электронной коммерции. Результаты испытаний показывают, что при правильной настройке сенсорных систем точность навигации достигает 2–3 см при скорости до 10 км/ч.

Перспективы развития и социально-экономическое значение

С распространением технологий искусственного интеллекта и дешёвых сенсоров стоимость автономных систем стремительно снижается. Ожидается, что в ближайшие 10 лет рынок доставки с помощью роботов вырастет в несколько раз, особенно в мегаполисах, где плотность заказов высока.

Кроме экономических преимуществ, автономные системы решают социальные задачи — снижение трафика, уменьшение выбросов CO₂, повышение доступности доставки для людей с ограниченными возможностями.

В будущем возможно объединение роботов в **кооперативные сети**, где они будут обмениваться задачами, строить совместные маршруты и использовать общие зарядные станции. Такой подход соответствует концепции “умных городов”, где транспорт и логистика работают как единая киберфизическая экосистема.

Заключение

Разработка автономных роботов для доставки грузов является одним из ключевых направлений современной робототехники и цифровой экономики. Сочетание сенсорных технологий, машинного обучения и энергоэффективных систем делает возможным создание надёжных, безопасных и полностью автономных платформ.

Главной тенденцией остаётся интеграция робототехнических систем в городскую инфраструктуру, где автономные устройства взаимодействуют с транспортом, пешеходами и логистическими центрами. Внедрение подобных технологий открывает новые горизонты для развития “зелёной логистики” и устойчивых транспортных систем будущего.

Литература

1. Иванов П.Н. Основы мобильной робототехники. — М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2022.
2. Литвинов Е.С. Алгоритмы навигации автономных систем. — Минск: БГУИР, 2023.
3. Siciliano B., Khatib O. Springer Handbook of Robotics. — Springer, 2020.
4. Thrun S., Burgard W. Probabilistic Robotics. — MIT Press, 2021.
5. Starship Technologies Annual Report 2023. — Tallinn, 2023.
6. Yandex Robotics Research Group. Adaptive Navigation for Delivery Robots. — Moscow, 2024.
7. European Commission. Smart Mobility and Autonomous Delivery Systems. — Brussels, 2024.