

УДК 343.137.9

ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ В ПРОМЫШЛЕННОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТЕНДЕНЦИЙ И НОВЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Гуммаров Олег Яруллаевич,
Аспирант, Университет «Синергия»
Россия, Москва
oleg_lift@mail.ru

Аннотация

Благодаря технологическим достижениям промышленная робототехника вышла за рамки традиционного производства, совершив революцию во многих отраслях и сферах применения. В статье представлен систематический обзор последних достижений в развитии роботов и особенностей их применения в конкретных прикладных сферах. Также выделены перспективные направления развития роботизированных комплексов с учетом технологий искусственного интеллекта, современных протоколов связи и сенсорных инноваций. Отдельный акцент сделан на проблемах и нерешенных вопросах развития робототехники.

Ключевые слова: робот, промышленность, точность, сенсор, движение.

RECENT DEVELOPMENTS AND CHALLENGES IN INDUSTRIAL ROBOTICS: A SYSTEMATIC REVIEW OF TECHNOLOGICAL TRENDS AND NEW APPLICATIONS

Oleg Ya. Gummarov,
Postgraduate student, Synergy University
Russia, Moscow
oleg_lift@mail.ru

ABSTRACT

Thanks to technological advances, industrial robotics has moved beyond traditional manufacturing, revolutionising many sectors and fields of application. This article provides a systematic review of the latest developments in robotics and the specific ways in which robots are used in particular applied fields. It also highlights promising areas for their development, taking into account artificial intelligence technologies, modern communication protocols and sensor innovations. Particular emphasis is placed on the challenges and unresolved issues in the development of robotics.

Keywords: robot, industry, precision, sensor, motion.

Промышленная робототехника претерпела значительные изменения, превратившись из жестких одноцелевых систем в высокоадаптивные и интеллектуальные технологии. Этот прогресс был обусловлен прорывами в области искусственного интеллекта (ИИ), машинного обучения (МО), и интеграции датчиков, что позволило роботам выполнять сложные задачи с большей автономностью и эффективностью. Кроме того, растущая потребность в автоматизации во всех отраслях ускорила эту эволюцию, что привело к повышению производительности, сокращению затрат и улучшению адаптивности в неструктурированных средах. Развитие Индустрии 4.0 стимулировало разработку сложных стратегий управления, объединяющих робототехнику с киберфизическими системами [1].

Международная федерация роботов признает две основные категории роботов: промышленные или автоматизированные роботы, используемые в процессах автоматизации в промышленной среде, а также сервисные роботы, которые нашли свое применение в личных и деловых целях в зависимости от функционального назначения [2].

Наглядно о темпах и тенденциях развития робототехники в промышленных приложениях свидетельствует таблица 1.

Таблица 1 Показатели развития промышленной робототехники [3,4]

Показатель	Значение	Научный комментарий
Количество установленных промышленных роботов в мире	более 4,2 млн единиц	Демонстрирует высокий уровень глобального распространения роботизированных систем в промышленном производстве
Ежегодный объем новых установок	≈ 540–600 тыс. единиц в год	Подтверждает устойчивую динамику технологического обновления производственных комплексов
Средняя мировая плотность роботизации	162 робота на 10 тыс. работников	Отражает степень интеграции робототехнических систем в производственные процессы
Плотность роботизации в Южной Корее	более 1000 роботов на 10 тыс. работников	Является эталонным показателем интенсивного внедрения промышленной автоматизации
Плотность роботизации в Китае	≈ 470 роботов на 10 тыс. работников	Свидетельствует о высоких темпах технологического развития промышленного сектора
Доля автомобильной промышленности в мировом использовании роботов	около 30 % парка	Подтверждает ведущую роль высокоточного автоматизированного производства
Точность современных промышленных манипуляторов	±0,02–0,05 мм	Обеспечивает выполнение операций сверхточной сборки и обработки
Скорость выполнения операций	до 12–15 м/с	Позволяет существенно повышать производительность технологических линий

Средняя наработка на отказ современных систем	60–80 тыс. часов	Характеризует высокий уровень технической надёжности оборудования
Доля предприятий, использующих элементы ИИ в роботизированных комплексах	более 35 % крупных производств	Указывает на переход к интеллектуальным адаптивным системам управления
Снижение времени переналадки роботизированных линий	до 40–60 %	Подтверждает развитие гибких производственных технологий
Рост мирового рынка промышленных роботов	8–12 % ежегодно	Отражает ускорение научно-технического прогресса в области автоматизации

Однако этот стремительный прогресс роботизированных решений для оптимизации производственных процессов поднимает важные вопросы о масштабируемости, экономической эффективности и социальных последствиях робототехники, которые остаются недостаточно изученными в литературе. Также отдельного внимания заслуживают вопросы, связанные с изучением современных парадигм управления, которые повышают точность, адаптивность и взаимодействие в промышленной робототехнике.

Таким образом отмеченные обстоятельства предопределили выбор темы данной статьи.

Доминирующие методы управления роботами в промышленных секторах, а также изменение показателей их эффективности (например, точность, задержка, энергопотребление) в зависимости от области применения, детально рассматривают в своих трудах Алпысбай Н.Д., Тобыл А., Абдираманов О., мольников В.А., Воронова Л.И., Воронов В.И.

Современное состояние дел в контексте взаимодействия человека и робота в искусственных коботических системах освещается Пикаловым Я.Ю., Сарамудом М.В., Штабелем Н.В., Ткачевым С.Б., Бадикой Е.М., Кузьменко В.П., Двирным С.М., Поповым А.В., Спасским Б.А.

Хотя в промышленной робототехнике за последние годы многое заметно сдвинулось вперёд, всё ещё остаются открытые темы, связанные с тем, как сделать так, чтобы роботизированные системы устойчиво подстраивались под производство, где условия постоянно меняются, а внешние воздействия не всегда можно заранее предугадать. По-хорошему, здесь ещё нужен серьёзный пласт исследований: как повысить точность автономных решений, как аккуратнее и надёжнее объединять данные разных датчиков и как проектировать алгоритмы, которые позволят роботу безопасно работать рядом с человеком в сложной, живой производственной среде.

Таким образом, цель статьи – провести систематический обзор последних достижений, технологических тенденций и новых приложений в промышленной робототехнике, а также выделить сложности, присущие данной сфере.

Промышленная робототехника значительно эволюционировала в последние годы, чему способствовал спрос на интеллектуальные, гибкие и автономные решения для автоматизации. По мере того, как отрасли внедряют цифровую трансформацию, роботы распространяются за пределы производства в здравоохранение, логистику и сельское хозяйство, повышая эффективность, безопасность и точность.

На сегодняшний день в развитии промышленной робототехники доминируют три ключевых тенденции: 1) коллаборативная робототехника, 2) автономное принятие

решений, 3) восприятие и сенсорика, отражающие их конвергенцию в рамках Индустрии 5.0.

Кратко охарактеризуем эти тенденции.

Коллаборативная робототехника также известная как коботы, предназначена для работы рядом с людьми в одном рабочем пространстве. Эти роботы весят значительно меньше по сравнению с традиционными промышленными роботами, что обеспечивает большую мобильность и легкость передвижения внутри завода, рабочего пространства или отрасли, где они установлены. Современные исследования в области коботов направлены на то, чтобы позволить им имитировать человека в обучении, адаптации, манипулировании, зрении и познании. Ключевые задачи включают в себя улучшение эргономики для таких работ, как сварка, сборка, проверка безопасности, обработка материалов, полировка и т.д., путем создания системы восприятия робота, планирования управления движением и обучения безопасным, надежным и гибким способом [5].

Автономное принятие решений остается краеугольным камнем для промышленных роботов, работающих в условиях неопределенности, при этом недавние достижения расширяют классические схемы в сторону формулировок, основанных на данных и учитывающих устойчивость. Автономность, основанная на машинном обучении, знаменует собой переход от статического программирования к динамическому принятию решений, основанному на парадигмах контролируемого, неконтролируемого и подкрепляющего обучения. Значительные перспективы и обнадёживающие результаты демонстрирует многоагентные модели глубокого обучения (DRL) с подкреплением и биоинспирированные нейронные парадигмы, которые ускоряют совместное управление. Китайские ученые представили многоагентную структуру DRL для постоянного мониторинга, которая улучшила координацию на 22% при операционных ограничениях. А отечественные исследователи использовали импульсные нейронные сети (биоинспирированные) для управления 3D-манипулятором, что привело к увеличению энергоэффективности на 17% [6].

Передовые системы восприятия и сенсорики, с конфигурацией «камера на исполнительном органе», интегрируют лидары, камеры высокого разрешения и тактильные сенсоры для повышения пространственной осведомлённости и точности позиционирования, что имеет критическое значение при работе в неструктурированных средах. Объединение данных от различных сенсорных систем позволяет повысить точность манипулирования роботами на 40 % и снизить частоту отказов при выполнении операций захвата и перемещения на 25%, обеспечивая эффективное выполнение задач в широком спектре областей – от хирургической робототехники до автоматизированной уборки сельскохозяйственной продукции. Однако высокая вычислительная сложность таких систем и их чувствительность к внешним условиям, например зависимость эффективности лидаров от погодных факторов, ограничивают универсальность их применения

На основе изучения современной литературы и отчетов ведущих производителей робототехники в мире в таблице 2 обобщены ключевые тренды ее развития в ближайшей перспективе.

Таблица 2 Систематизация ключевых технологических трендов, прецизионных метрик и новых приложений в промышленной робототехнике

Технологический тренд и парадигма	Ключевые сквозные технологии и методы контроля	Технические параметры и целевые метрики эффективности	Ожидаемые инженерный эффект
-----------------------------------	--	---	-----------------------------

Интеллектуальное адаптивное управление	Глубокое обучение с подкреплением, нейросетевые модели трансформерного типа, 3D-машинное зрение, алгоритмы предиктивного управления	Точность детекции и захвата объектов в недетерминированной среде: > 99.2%. Динамическая погрешность отслеживания пространственной траектории: <0.1 мм при линейной скорости инструмента ≤ 2.5 м/с. Время планирования траектории: < 15 мс.	Гибкая роботизированная сборка печатных плат, высокоскоростной бесконтактный неразрушающий контроль, селективное манипулирование деформируемыми объектами
Продвинутая коллаборативная робототехника	Бесконтактные емкостные сенсорные покрытия, интегрированные многоосевые датчики крутящего момента в шарнирах, алгоритмы адаптивного ограничения усилий	Время отклика системы безопасности на коллизию: < 10-15 мс Удельная грузоподъемность: до 1:2.2. Порог чувствительности встроенных датчиков момента: ≤0.02 Н м.	Совместные сборочные линии в автомобилестроении (монтаж интерьеров), точечное дозирование в фармацевтике, высокоточная пайка и финишная обработка электроники.
Сверхпрецизионная манипуляция	Пьезоэлектрические актуаторы, динамическая компенсация геометрических и кинематических погрешностей редукторов, лазерные трекары с обратной связью в реальном времени	Снижение абсолютной погрешности позиционирования за счёт компенсации упругих деформаций методом опережающего управления: на 81-82% (до < 0.09 мм). Среднеквадратическое отклонение траектории: 0.5 - 4.75 мкм. Угловая погрешность ориентации фланца: < 0.05°.	Микросистемная техника, позиционирование полупроводниковых кристаллов, лазерная микрообработка, роботизированная инкрементальная формовка
Автономные мобильные роботы и роевой интеллект	Навигация на базе 3D LiDAR SLAM, сенсорная конвергенция (LiDAR + IMU + ToF), протоколы связи 5G-URLLC и	Точность позиционирования при стыковке технологическим оборудованием: ±1...3 мм. Сетевая задержка в контуре управления (< 1-5 мс.	Сквозная межцеховая логистика беспилотных производств, динамическое распределение задач, мобильные

	TSN (Time-Sensitive Networking).	Плотность бесконфликтного трафика при децентрализованном управлении: до 50 единиц на 1000 м2.	гибкие производственные ячейки
Предиктивные цифровые двойники и киберфизические системы	Архитектуры Industrial IoT (IIoT), прогнозные модели глубокого обучения (LSTM/Transformer) для оценки деградации узлов, edge-вычисления.	Метрика достоверности прогнозных моделей отказов: AUC-ROC>0.95. Латентность синхронизации состояний «физический объект – цифровой двойник»: ≤12 мс. Наработка на сложный отказ мехатронных узлов: > 60 000 – 80 000 часов.	Проактивное техническое обслуживание тяжелых шарнирно-сочлененных роботов (>225 кг) в сварочных цехах, сквозная оптимизация энергопотребления роботизированных линий

Представленная в таблице 2 систематизация демонстрирует, что современный вектор развития промышленной робототехники лежит в плоскости прецизионной киберфизической интеграции. Ключевым инженерным достижением является переход от жесткого программирования траекторий к динамическому адаптивному управлению в реальном времени.

В тоже время следует отметить, что развитие робототехники и ее внедрение в промышленные процессы сталкивается с рядом проблем, к которым относится, например, масштабируемость. Высокие вычислительные требования контроллеров на основе ИИ ограничивают внедрение роботов в малых отраслях промышленности. Отдельно следует отметить сложности, связанные с энергоэффективностью робототехники. Энергоемкие алгоритмы управления роботами на производстве могут подорвать цели устойчивого развития. Обеспечение безотказного взаимодействия человека и робота также остается нерешенной проблемой.

Резюмируя полученные результаты, отметим, что системы промышленных роботов вступают в период конвергенции, в котором разнородные вспомогательные технологии – ИИ, цифровые двойники, сверхнадежная связь с низкой задержкой и развивающиеся квантовые/квантово-ориентированные вычисления определяют широкие перспективы их развития. Однако вопросы, связанные с безопасностью, энергоэффективностью, взаимодействием с персоналом в рабочем пространстве требуют дальнейших углубленных исследований.

Список литературы:

1. Палий А.В. Применение искусственного интеллекта в промышленной робототехнике // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. 2023. Т. 8. № 5-2 (31). С. 135-139.
2. Чарыева Л., Мыратлыев А., Човдыров О., Мусаева Дж. Робототехника и автоматизация: будущее промышленного производства // Матрица научного познания. 2023. № 10-2. С. 230-234.

3. Чэнь И. Применение и развитие промышленной робототехники для управления производственными процессами // Перспективы науки. 2024. № 3 (174). С. 83-85.
4. Припотнев М.С. Управление движением в промышленной робототехнике при их связи с мехатронными системами // Научно-исследовательский центр "Technical Innovations". 2024. № 22. С. 183-188.
5. Ибрагимов Р.С. О перспективах применения робототехники в промышленном секторе экономики // Научно-техническая информация. Серия 1: Организация и методика информационной работы. 2024. № 7. С. 1-6.
6. Дубинина М.Г. Синергия промышленной робототехники и информационно-коммуникационных технологий // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2025. Т. 16. № 3. С. 398-416.

References:

1. Paliy A.V. The Application of Artificial Intelligence in Industrial Robotics // International Journal of Information Technology and Energy Efficiency. 2023. Vol. 8. No. 5-2 (31). pp. 135-139.
2. Charyeva L., Myratlyev A., Chovdyrov O., Musaeva J. Robotics and automation: the future of industrial production // Matrix of Scientific Knowledge. 2023. No. 10-2. pp. 230-234.
3. Chen, Y. Application and Development of Industrial Robotics for Production Process Control // Prospects of Science. 2024. No. 3 (174). pp. 83-85.
4. Pripotnev M.S. Motion control in industrial robotics in relation to mechatronic systems // Research Centre 'Technical Innovations'. 2024. No. 22. pp. 183-188.
5. Ibragimov R. On the prospects for the application of robotics in the industrial sector of the economy // Scientific and Technical Information. Series 1: Organisation and Methods of Information Work. 2024. No. 7. pp. 1-6.
6. Dubinina M.G. Synergy between industrial robotics and information and communication technologies // MIR (Modernisation. Innovation. Development). 2025. Vol. 16. No. 3. pp. 398-416.