

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. №7 (181). С.28-36.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. №7 (181). P.28-36.

Научная статья

УДК 621.757

doi: 10.30987/2223-4608-2026-7-28-36

Стратегии роботизированной сборки на основе применения интеллектуального управления и сенсорных систем

Михаил Владимирович Вартанов¹, д.т.н.

До Мань Зунг², аспирант

Нгуен Куанг Туан³, аспирант

Светлана Алексеевна Паршина⁴, к.т.н.

^{1, 2, 3, 4} Московский политехнический университет, Москва, Россия

¹ m.v.vartanov@mospolytech.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6057-9478>

² d.m.zung@mospolytech.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0818-2088>

³ nguyenguangtuanmta37@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁴ psa40@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. В условиях пятой промышленной революции (Индустрии 5.0) задачи робототехнической сборки становятся все сложнее, требуя повышенной точности, производительности, гибкости и автономности. Применение классических методов позиционного программирования становится неэффективным в связи с повышением точности деталей машин. Кроме того, позиционное программирование неэффективно в условиях неорганизованной среды и расширения применения нежестких и гибких деталей в машинах. Ужесточение допусков усложняет выполнение условий собираемости при автоматической сборке. Простейшим решением является дооснащение промышленных роботов средствами пассивной адаптации. В ряде исследований предложено использование одновременно нескольких физико-технических эффектов при автоматической сборке. Однако подобные системы оказываются узкоспециализированными решениями, что неэффективно в условиях многопредметного производства. Следующим уровнем развития является применение различных датчиков для реализации обратной связи. В ряде случаев и этого оказывается недостаточно. В настоящее время наблюдается переход от систем на основе одного датчика к мультисенсорным системам, объединяющим данные от зрения, силомоментных, тактильных датчиков и лазерных сканеров для повышения точности, и надежности. В статье представлен обзор методов интеграции мультисенсорных систем для роботизированной сборки. Анализируются пассивные и активные стратегии, использующие обратную связь для кинематического управления. Рассматривается роль искусственного интеллекта и машинного обучения, позволяющих роботам осваивать сложные навыки при манипулировании, относительном ориентировании и сопряжении. Обобщая современные решения, статья определяет будущие направления исследований, подтверждая, что мультисенсорная интеграция и интеллектуальное управление являются ключом к созданию автономных производственных систем.

Ключевые слова: роботизированная сборка, мультисенсорные системы, адаптивное управление, машинное обучение, контактные состояния, стратегии поиска

Для цитирования: Вартанов М.В., Зунг Д.М., Туан Н.К., Паршина С.А. Стратегии роботизированной сборки на основе интеллектуального управления и сенсорных систем // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 7 (181). С. 28–36. doi: 10.30987/2223-4608-2026-7-28-36

Robotized assembly strategies based on the use of intelligent control and sensor systems

Mikhail V. Vartanov¹, D. Eng.

Do M. Zung², PhD student

Nguyen Q. Tuan³, PhD student

Svetlana A. Parshina⁴, PhD Eng.

^{1, 2, 3, 4} Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

¹ m.v.vartanov@mospolytech.ru

² d.m.zung@mospolytech.ru

³ nguyenquangtuanmta37@gmail.com

⁴ psa40@yandex.ru

Abstract. Under the Fifth Industrial Revolution (Industry 5.0), the tasks of robotized assembly are becoming increasingly complex, requiring particular accuracy, productivity, flexibility and autonomy. The use of classical coordinated programmable controls becomes ineffective due to the increased accuracy of machine parts. In addition, coordinated programmable control is inoperable in an unordered environment and the increasing use of movable and flexible parts in machines. Stiffening of tolerances contributes to more complicated assembly conditions within automatic assembly. The simplest solution is to upgrade industrial robots with passive adaptation measures. A number of studies have suggested the simultaneous use of several physical and technical effects during automatic assembly. However, such systems turn out to be highly specialized solutions, which is ineffective in a multi-subject production environment. The next level of development is the use of various sensors to implement feedback. However, in some cases, this is not enough. Currently, there is a shift from single-sensor systems to multisensory systems that combine data from vision, power, tactile sensors, and laser scanners to improve accuracy and reliability. The article provides an overview of methods for integrating multisensory systems into robotic assembly. Passive and active strategies using feedback for kinematic control are analyzed. The role of artificial intelligence and machine learning is viewed, allowing robots to master complex skills in manipulation, relative orientation and integration. Summarizing modern solutions, the article defines future research directions, confirming that multisensory integration and intelligent control are the key to the creation of autonomous production systems.

Keywords: robotized assembly, multisensory systems, adaptive control, machine learning; contact functions; search strategies

For citation: Vartanov M.V., Zung D.M., Tuan N.Q., Parshina S.A. Robotized assembly strategies based on the use of intelligent control and sensor systems / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 7 (181). P. 28–36. doi: 10.30987/2223-4608-2026-7-28-36

ВВЕДЕНИЕ

Пятая промышленная революция (Индустрия 5.0) предъявляет более высокие требования к оборудованию по точности, гибкости и автономности в производстве. В этом контексте задачи роботизированной сборки становятся областью, играющей решающую роль в автоматизации производства. Промышленные роботы уже доказали свою стратегическую ценность, способствуя повышению производительности до 40 % в автомобильной промышленности, улучшению выявления дефектов на 30 % благодаря системам машинного зрения и сокращению производственного травматизма на 15 % [1].

Традиционные промышленные роботизированные системы, работающие на основе позиционного управления, оказываются неэффективными в динамичных или неструктурированных средах. Они

испытывают трудности при возникновении отклонений и неопределённости в реальном производстве. Эти ограничения снижают надёжность и производительность роботизированной сборки.

Центральный тезис данной статьи заключается в том, что интеграция мультисенсорных систем является ключевым фактором для решения указанных выше задач. Объединяя информацию с различных типов датчиков, робот может сформировать более полное представление об окружающей среде, что позволяет ему выполнять точные корректировки и адаптироваться к изменяющимся условиям. Цель этой статьи – представить обзор сенсорных стратегий от подходов с использованием одного датчика до сложных методов мультисенсорной интеграции. Кроме того, в статье рассматриваются методы адаптивного управления и изучается влияние искусственного интеллекта на автоматизацию сборочных процессов.

Рассмотрена эволюция фундаментальных поисковых стратегий, лежащих в основе различных операций роботизированной сборки.

Эволюция стратегий поиска при роботизированной сборке

Эффективность системы роботизированной сборки зависит от сложности стратегии поиска – процедуры, которую реализует робот для определения местоположения и сопряжения деталей. В данном разделе рассмотрена эволюция стратегий: от простых методов, основанных на одном датчике до методов интеграции информации от нескольких датчиков [1 – 3]. Первоначальные стратегии были сосредоточены на информации от датчика позиционирования робота. Данные методы заложили основу для более сложных систем.

Визуальные датчики (Vision Sensors). Системы машинного зрения являются одним из наиболее распространенных инструментов для определения положения деталей. Эти методы можно разделить на две основные категории:

– Методы 2D. Использование изображений с одной камеры для определения положения целевой поверхности (рис. 1). Такие методики, как преобразование Хафа (Hough transform), применяются для обнаружения круглых объектов, типа втулки [4]. Однако этот подход становится менее эффективным при отклонении угла обзора, что вызывает перспективные искажения и приводит к отображению круглого отверстия как эллипса. Для решения проблемы были разработаны более совершенные модели, такие как модель «активного контура» (snake model) для точного извлечения контура даже при искажении изображения [5].

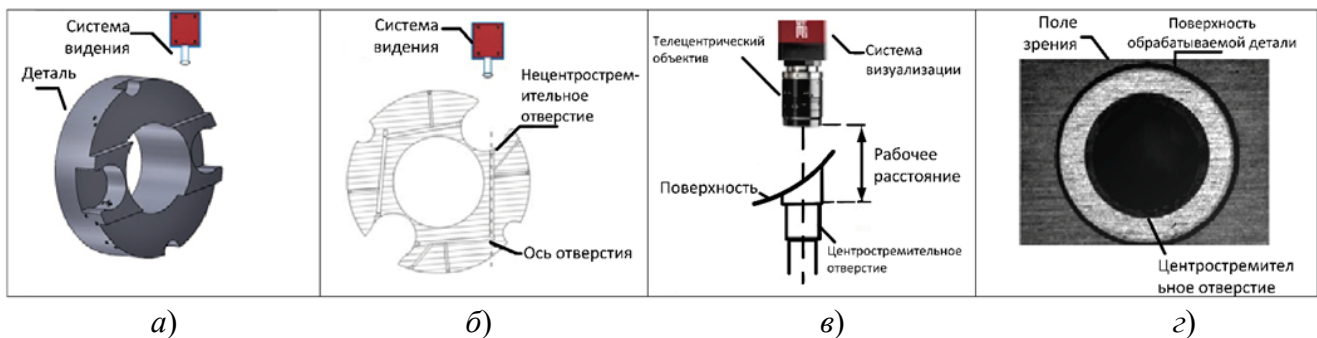


Рис. 1. Стратегия поиска типа 2D:

а – оптическая система и крупногабаритная деталь сложной формы; б – процесс совмещения отверстия со смещенным центром с оптической системой; в – фаза коаксиального оптического совмещения; г – изображение, полученное системой коаксиального оптического совмещения

Fig. 1. 2D type search strategy:

а – an optical system and a large-sized part of complex shape; б – the process of aligning a hole with an offset center of the optical system; в – the phase of coaxial optical alignment; г – the image obtained by the coaxial optical alignment system

– Методы 3D. Обеспечивают более детальную трехмерную пространственную информацию, позволяя роботу выполнять более точные корректировки положения (рис. 2) [2, 3]. Кроме того, такие технологии, как маркеры ArUco, используются для отслеживания объектов и измерения расстояний в реальном времени, что способствует реализации приложений точного позиционирования и навигации [6].

– Силомоментные датчики (Force, Torque Sensors). При наличии физического контакта, обратная связь по усилию и моменту становится критически важной для выполнения малых корректировок. Эти датчики позволяют роботу определять силу взаимодействия и регулировать движение. Распространенные шаблоны поиска включают сканирование по Архимедовой спирали, сканирование по квадратной спирали и растровое сканирование [1].

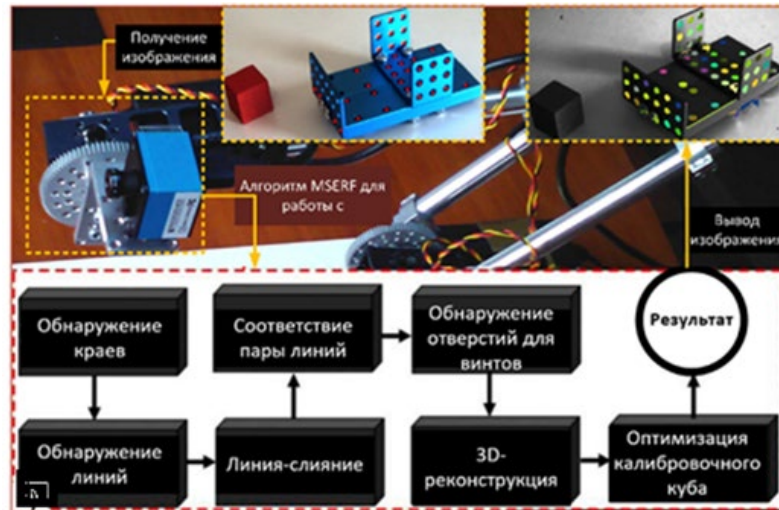


Рис. 2. Стратегия поиска для сборки деталей типа 3D

Fig. 2. Search strategy for assembling 3D parts

Применение одного датчика имеет ряд существенных ограничений. Системы машинного зрения могут сталкиваться с недостаточным освещением или наличием помех и не способны воспринимать контактные усилия. В свою очередь, силомоментные датчики эффективны лишь при контакте, а сам процесс поиска может занимать значительное время. Эти недостатки обусловили закономерное развитие систем мультисенсорной интеграции.

Стратегии на основе мультисенсорной интеграции

Переход к мультисенсорным системам – важный шаг в области робототехнической сборки. Ключевым преимуществом такого подхода является возможность объединения преимуществ различных типов датчиков.

Например, система может использовать машинное зрение для позиционирования на дальнем расстоянии, а затем переключиться на силомоментные датчики для точного центрирования при физическом контакте деталей.

Многочисленные исследования доказали эффективность данного подхода. Некоторые системы сочетают визуальный сервопривод с силовым управлением с обратной связью (рис. 3) [7]. Двурукые роботы, оснащенные как камерами, так и силомоментными датчиками, также используются для сложных сборочных задач, требующих точной координации двух манипуляторов (рис. 4) [8]. Такая интеграция не только повышает точность, но и улучшает устойчивость системы к отказам и неопределенным условиям.

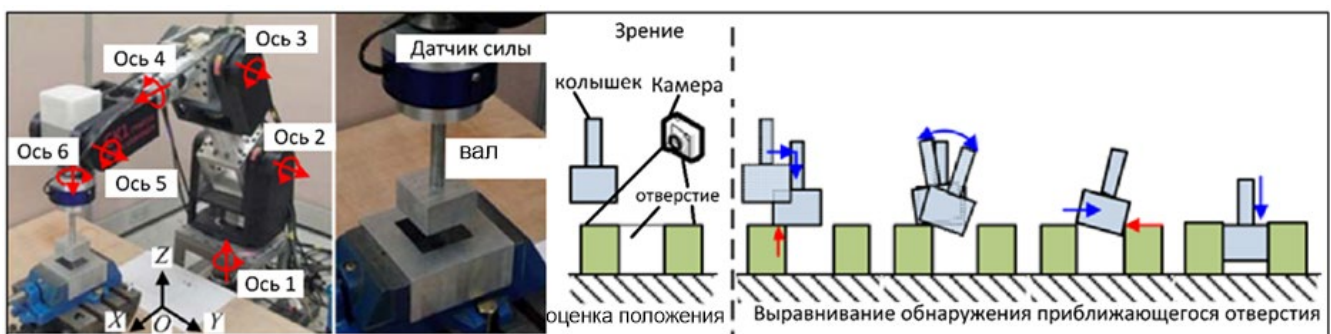


Рис. 3. Стратегия поиска при сборке, основанная на датчиках зрения и силы

Fig. 3. Assembly search strategy based on vision and force sensors

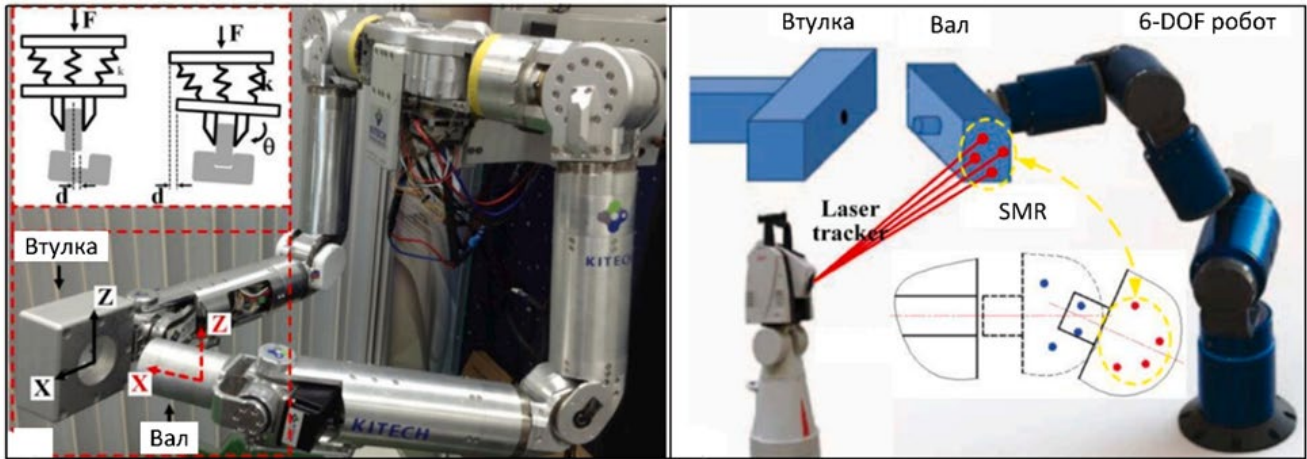


Рис. 4. Стратегия поиска, использующая дополнительные внешние датчики:
а – робот с двумя рычагами и пассивной оснасткой; б – система поиска с лазерным наведением

Fig. 4. A search strategy using additional external sensors:
a – robot with two levers and passive equipment; b – laser-guided search system

Из анализа стратегий поиска ясно, что сенсорные данные – это часть решения: необходимы также алгоритмы управления.

Методы адаптивного управления для прецизионной сборки

Методы управления позволяют корректировать положение, чтобы реагировать на неопределенности: отклонения положения и допуски.

Метод пассивной адаптации. Пассивная адаптация предполагает использование податливых механизмов для компенсации отклонений и контактных сил без корректировки управления в реальном времени (рис. 5). Эти механизмы действуют как амортизаторы, обеспечивая роботу определённую степень «податливости» при взаимодействии с окружающей средой.

– Механическая податливость (Mechanical Compliance). Данный метод использует податливые элементы, такие как пружины и демпферы. Характерным примером являются устройства с удалённым центром жесткости (Remote Center Compliance – RCC). Это механические конструкции, спроектированные так, чтобы быть жёсткими к поступательным воздействиям, но податливыми к моментам, что позволяет им автоматически корректировать угловые и позиционные отклонения.

– Программируемая податливость (Programmable Compliance). Шагом вперед по сравнению с фиксированной механической жесткостью являются устройства, программируемые для изменения жёсткости. Это обеспечивает большую гибкость, позволяя роботу адаптироваться к различным сборочным задачам без изменения аппаратной части [9].

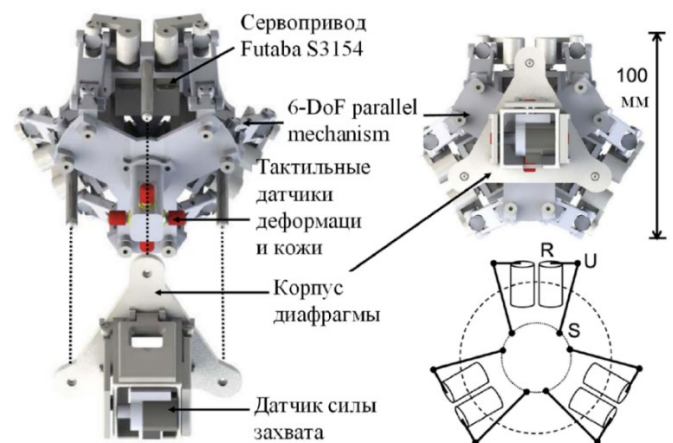


Рис. 5. Тактильное устройство с шестью степенями свободы

Fig. 5. Tactile sensor with six DOFs

Несмотря на простоту реализации, пассивные методы фундаментально ограничены по характеристикам, что делает их неспособными адаптироваться к изменениям требований задачи. Это серьёзный недостаток

при большом разнообразии продукции и малых партиях.

Методы активной адаптации. Активная адаптация предполагает использование обратной связи в реальном времени для автоматической корректировки траектории и усилия робота. Этот метод обеспечивает значительно более высокий уровень гибкости и точности по сравнению с пассивными решениями.

– Импедансное управление (Impedance Control). Данная стратегия регулирует динамику взаимодействия робота с деталью. Решение является программируемой пружинно-демпферной системой. Настраивая параметры импеданса (жесткость и демпфирование), робот взаимодействует со средой в условиях контактной задачи [10].

– Гибридное позиционно-силовое управление. Метод подходит для задач, в которых роботу необходимо одновременно перемещаться вдоль поверхности и прикладывать усилие. Обеспечивается возможность одновременного управления положением робота по одному направлению и усилиями по другим.

Классические методы адаптивного управления заложили прочный фундамент. Однако современные подходы на основе искусственного интеллекта преобразуют эту область, открывая новые возможности, выходящие за рамки ранее достигнутого.

Новые технологии и роль искусственного интеллекта

Современные достижения в области искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения вызывают смену парадигмы в роботизированной сборке. На смену позиционному программированию приходит адаптивное поведение на основе онлайн управления. В данном разделе анализируются перспективные технологии и их эффективность.

Машинное обучение для освоения навыков. Обучение демонстрацией (Learning from Demonstration). Одним из наиболее эффективных методов является обучение робота путём демонстрации. Оператор может перемещать манипулятор робота вручную (кинестетическое обучение) для обучения сборочной задаче. Данные о траектории и усилиях фиксируются. Различные модели, как Гауссовы смеси

(Gaussian Mixture Models, GMM) и регрессия на их основе (Gaussian Mixture Regression, GMR), используются для анализа данных и генерации оптимальной траектории, которую робот может выполнить автономно [11]. Обучение с подкреплением и имитационное обучение (Reinforcement and Imitation Learning). Эти подходы позволяют роботу разрабатывать стратегии управления для сложных задач. При обучении с подкреплением (Reinforcement Learning, RL) робот обучается методом проб и ошибок. При имитационном обучении (Imitation Learning) робот учится, подражая действиям учителя [12].

Современные роботизированные сборочные системы всё чаще интегрируются в более широкие цифровые производства. Такие технологии, как Интернет вещей (IoT) и Цифровые двойники (Digital Twins), используются для создания интеллектуальных взаимосвязанных производственных систем. Цифровые двойники позволяют моделировать и оптимизировать сборочный процесс до его физической реализации, в то время как IoT обеспечивает мониторинг и управление в реальном времени.

Примером такой интеграционной платформы является Фреймворк E2APR. Эта платформа разработана для поддержки динамического взаимодействия человека и робота при планировании сборки. Она автоматически обрабатывает данные из CAD-моделей и инструкций, оценивает исполнимость задач человеком или роботом и генерирует оптимальные последовательности сборки, поддерживая различные режимы взаимодействия, такие как синхронизация, кооперация и коллаборация [13].

Исследования

В Московском политехническом университете проводятся исследования, охватывающие как пассивные системы, так и активные адаптивные стратегии.

Научным коллективом разработан метод, сочетающий вращательное движение схвата робота с низкочастотными колебаниями опоры (рис. 6). Авторами доказано, что такая комбинация улучшает условия сборки, снижает сборочные силы и значительно повышает технологическую надёжность операции.

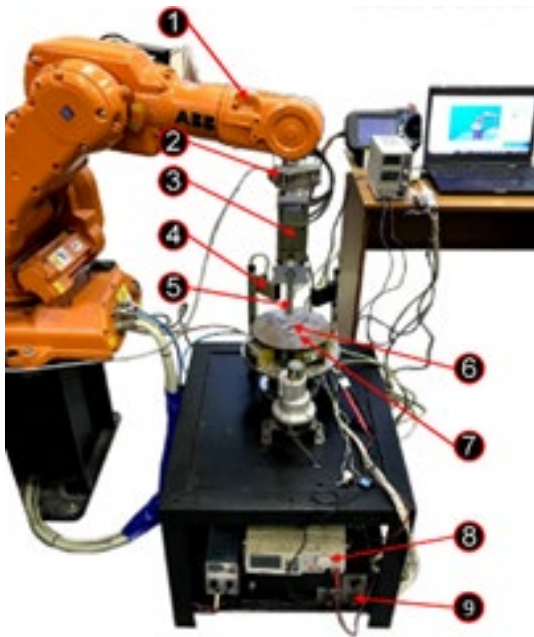


Рис. 6. Экспериментальная установка:

1 – промышленный робот ABB IRB 140; 2 – силомоментный датчик; 3 – схват; 4 – лазерные датчики; 5 – вал (экспериментальные образцы); 6 – втулка; 7 – виброопора; 8 – электронный частотомер; 9 – генератор низкочастотных колебаний

Fig. 6. Pilot installation:

1 – industrial robot ABB IRB 140; 2 – power-torque sensor; 3 – gripper; 4 – laser sensors; 5 – shaft (experimental samples); 6 – sleeve; 7 - vibration support; 8 – electronic frequency counter; 9 – low frequency oscillator

Разработаны алгоритмы интеллектуального управления на основе обратной связи от силомоментных датчиков. Алгоритмы позволяют системе управления корректировать траекторию для компенсации начальных погрешностей на всех этапах сопряжения. Одной из сложных задач является сборка нежестких деталей. Разработка алгоритма позиционно-силового управления для предотвращения заклиниваний представляет собой практическую реализацию принципов, рассмотренных в разделе «Методы активной адаптации». В системе используется машина опорных векторов для классификации контактных состояний, что демонстрирует интеграцию методов машинного обучения для решения сложных производственных задач (рис. 7, 8).

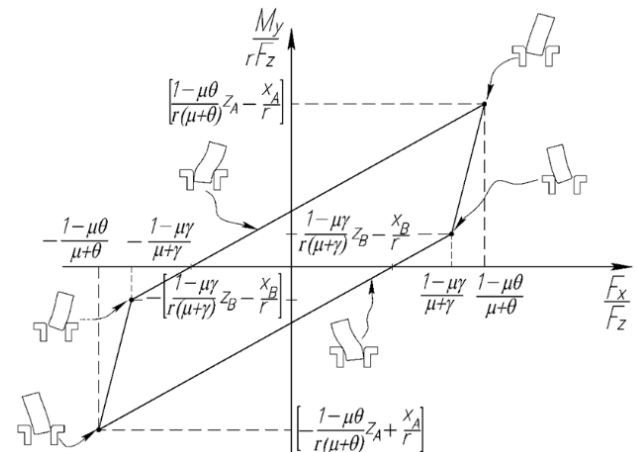


Рис. 7. Диаграмма условий заклинивания нежесткого вала и жесткой втулки

Fig. 7. Diagram of jamming-up conditions for a non-rigid shaft and a rigid sleeve

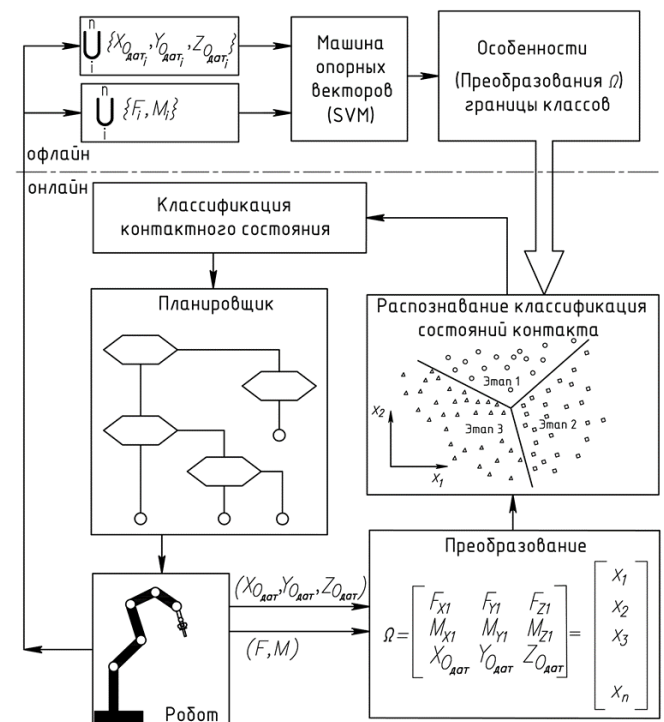


Рис. 8. Архитектура модели машины опорных векторов для идентификации состояния контакта

Fig. 8. Architecture of the support vector machine model for identifying the contact function

В настоящее время кафедра «Технологии и оборудование машиностроения» Московского Политеха ведёт разработку стратегии сборки зубчатых передач. Робот IRB 140T дооснащён силомоментным датчиком FTN-AXIA 80 SI500-20, установленным на запястье робота, что

позволяет в реальном времени измерять шесть компонент усилий и моментов, возникающих в процессе сопряжения. Кроме того, интегрирована камера Cognex In-Sight, обеспечивающая машинное зрение для определения положения и ориентации деталей в процессе сопряжения. Камера откалибрована в системе координат робота для точного наведения (робот с управлением по зрению). Система управляется контроллером IRC5 в сочетании с персональным компьютером, на котором работают алгоритмы сбора и обработки данных с датчиков.

Проводимые исследования направлены на применение передовых концепций адаптивного управления и сенсорных систем, а также на повышение эффективности решения практических задач в промышленности.

Заключение и перспективные направления

Интеграция различных сенсорных систем стала неизбежным трендом в области роботизированной сборки. Современные исследования и практические применения показывают, что одновременное использование нескольких типов датчиков не только повышает точность и надёжность операции, но и расширяет сферу применения роботов в сложных и неструктурированных средах. Этот тренд демонстрирует явный переход от простой автоматизации к интеллектуальным, управляемым системам. Информация с множества датчиков в сочетании с методами активного адаптивного управления и машинного обучения является ключом к созданию гибких и устойчивых роботизированных сборочных систем, способных соответствовать растущим требованиям промышленного производства.

В будущем данная область продолжит сталкиваться с многочисленными проблемами и возможностями. Одна из главных задач – преодоление «пропасти между симуляцией и реальностью» (sim-to-real gap), то есть обеспечение эффективной работы систем управления, обученных в виртуальной среде на физических роботах. Ещё одно направление – интеграция больших языковых моделей (Large Language Models, LLM) для понимания роботами семантики сборочных задач из инструкций на естественном языке, что улучшит взаимодействие

человека и машины. Наконец, долгосрочной целью является разработка полностью автономных систем в рамках интернета вещей (IoT) и цифровых двойников (Digital Twins), где роботы не только выполняют задачи, но и способны к самодиагностике, оптимизации и координации в рамках интеллектуальной производственной экосистемы.

Синергия передовых сенсорных технологий, искусственного интеллекта и цифровых платформ продолжит развитие роботизированной сборки, приближая ее к созданию следующего поколения интеллектуальных, автономных и устойчивых производственных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вартанов М.В., Зунг Д. М.** Интеграция мульти-сенсорных систем в задачах роботизированной сборки: проблемы и решения // «Сборка в машиностроении, приборостроении». 2025. Т. 26. № 8. С. 339–351. DOI: 10.36652/0202-3350-2025-26-8-339-351.
2. **Вартанов М.В., Линь Н.В., Зунг Н.В.** Оценка эффективности стратегий поиска при роботизированной сборке // «Станкоинструмент». 2022. Том 28. № 3. С. 46–56. DOI: 10.22184/2499-9407.2022.28.3.46.56.
3. **Вартанов М.В., Линь Н.В.** Адаптивное оборудование и технологическая оснастка для автоматической сборки // «Научноёмкие технологии в машиностроении». 2024. № 6 (156). С. 36–48. DOI: 10.30987/2223-4608-2024-36-48.
4. **Fang Xu, Shuai Wang, Bangyu Li.** Industrial robot base assembly based on improved Hough transform of circle detection algorithm. In: Proceedings of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation. 2014. P. 2446–2450. <https://doi.org/10.1109/WCICA.2014.7053106>.
5. **Mei B., Zhu W., Yan G., Ke Y.** A new elliptic contour extraction method for reference hole detection in robotic drilling. Pattern Anal Applic. 2015. Vol. 18. no. 3. P. 695–712. <https://doi.org/10.1007/s10044-014-0394-6>.
6. **Shuja Ali.** Sardar Real-Time Tracking and Distance Measurement of Opencv Aruco Marker Using Webcam. IJLTEMAS. 2025. Vol. 14. no. 1. P. 313–321. <https://doi.org/10.51583/IJLTEMAS.2025.1401034>.
7. **Jain R.K., Saha S., Majumder S.** Development of piezoelectric actuator based compliant micro gripper for robotic peg-in-hole assembly. In: IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). 2013. P. 1562–1567. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2013.6739689>.
8. **Zheng Y., Zhang X., Chen Y., Huang Y.** Peg-in-hole assembly based on hybrid vision/force guidance and dual-arm coordination. In: IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). 2017. P. 418–423. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2017.8324453>.
9. **Park H.** Dual arm peg-in-hole assembly with a programmed compliant system. In: 11th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence

(URAI). 2014. P. 431–433. <https://doi.org/10.1109/URAI.2014.7057477>.

10. Mol N. Nested compliant admittance control for robotic mechanical assembly of misaligned and tightly tolerated parts. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), IEEE. 2017. P. 2717–2722. <https://doi.org/10.1109/SMC.2016.7844650>.

11. Song H.-C., Kim Y.-L., Song J.-B. Guidance algorithm for complex-shape peg-in-hole strategy based on geometrical information and force control. Advanced Robotics. 2016. Vol. 30, no. 8. P. 552–563. <https://doi.org/10.1080/01691864.2015.1130172>.

12. Ota K. Autonomous Robotic Assembly: From Part Singulation to Precise Assembly. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2024. P. 13525–13532. <https://doi.org/10.1109/IROS58592.2024.1080242>.

13. Schirmer F. Towards Dynamic Human–Robot Collaboration: A Holistic Framework for Assembly Planning. Electronics. 2025. Vol. 14, no. 1. P. 190. <https://doi.org/10.3390/electronics14010190>.

REFERENCES

1. Vartanov M.V., Dung D.M. Integration of multisensory systems in the tasks of robotic assembly: problems and solutions // «Assembly in mechanical engineering, instrumentation». 2025. Vol. 26. No. 8. pp. 339–351. DOI: 10.36652/0202-3350-2025-26-8-339-351.

2. Vartanov M.V., Lin N.V., Zung N.V. Evaluation of the effectiveness of search strategies in robotic assembly // Stankoinstrument. 2022. Vol. 28, No. 3. pp. 46–56. DOI: 10.22184/2499-407.2022.28.3.46.56.

3. Vartanov M.V., Lin N.V. Adaptive equipment and jig for automatic assembly // «Science-intensive technologies in mechanical engineering». 2024. No. 6 (156). pp. 36–48. DOI: 10.30987/2223-4608-2024-36-48.

4. Fang Xu, Shuai Wang, Bangyu Li. Industrial robot base assembly based on improved Hough transform of circle detection algorithm. In: Proceedings of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation. 2014. P. 2446–2450. <https://doi.org/10.1109/WCICA.2014.7053106>.

5. Mei B., Zhu W., Yan G., Ke Y. A new elliptic contour extraction method for reference hole detection in robotic drilling. Pattern Anal Applic. 2015. Vol. 18, no. 3. P. 695–712. <https://doi.org/10.1007/s10044-014-0394-6>.

6. Shuja Ali. Sardar Real-Time Tracking and Distance Measurement of Opencv Aruco Marker Using Webcam. IJLTEMAS. 2025. Vol. 14, no. 1. P. 313–321. <https://doi.org/10.51583/IJLTEMAS.2025.1401034>.

7. Jain R.K., Saha S., Majumder S. Development of piezoelectric actuator based compliant micro gripper for robotic peg-in-hole assembly. In: IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). 2013. P. 1562–1567. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2013.6739689>.

8. Zheng Y., Zhang X., Chen Y., Huang Y. Peg-in-hole assembly based on hybrid vision/force guidance and dual-arm coordination. In: IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). 2017. P. 418–423. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2017.8324453>.

9. Park H. Dual arm peg-in-hole assembly with a programmed compliant system. In: 11th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). 2014. P. 431–433. <https://doi.org/10.1109/URAI.2014.7057477>.

10. Mol N. Nested compliant admittance control for robotic mechanical assembly of misaligned and tightly tolerated parts. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), IEEE. 2017. P. 2717–2722. <https://doi.org/10.1109/SMC.2016.7844650>.

11. Song H. C., Kim Y.-L., Song J.-B. Guidance algorithm for complex-shape peg-in-hole strategy based on geometrical information and force control. Advanced Robotics. 2016. Vol. 30, no. 8. P. 552–563. <https://doi.org/10.1080/01691864.2015.1130172>.

12. Ota K. Autonomous Robotic Assembly: From Part Singulation to Precise Assembly. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2024. P. 13525–13532. <https://doi.org/10.1109/IROS58592.2024.1080242>.

13. Schirmer F. Towards Dynamic Human–Robot Collaboration: A Holistic Framework for Assembly Planning. Electronics. 2025. Vol. 14, no. 1. P. 190. <https://doi.org/10.3390/electronics14010190>.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.02.2026; одобрена после рецензирования 26.02.2026; принята к публикации 20.03.2026.

The article was submitted 15.02.2026; approved after reviewing 26.02.2026; accepted for publication 20.03.2026.