

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №6 (156). С.36-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №6 (156). P. 36-48.

Научная статья

УДК 621.7

doi: 10.30987/2223-4608-2024-36-48

Адаптивное оборудование и технологическая оснастка для автоматической сборки

Михаил Владимирович Вартанов¹, д.т.н.

Нгуен Ван Линь², аспирант

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

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

² nguyenlinh.hvktqs@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4754-1632>

Аннотация. В настоящее время промышленные роботы широко применяются для выполнения задач с контролем положения с минимальным контактом, таких как точечная сварка, покраска распылением, упаковка и погрузочно-разгрузочные работы. Однако выполнение задач сборки с высокими допусками по-прежнему представляет большую проблему для роботов из-за различных неопределенностей в отношении собираемых деталей, таких как крепления, исполнительные инструменты. Для корректировки этих погрешностей необходимо выполнение точного движения, которое называется адаптацией положения детали. Адаптации движения можно достичь путем активных или пассивных средств, а также их комбинации. Методы пассивной адаптации основаны на применении упругих и демпфирующих элементов. Конструкции спроектированы таким образом, что силы, возникающие в точках контакта деталей, корректировали ошибки их положения. Методы активной адаптации основаны на адаптивном управлении с обратной связью, когда процесс сборки и положение деталей регулируются автоматически путем измерения положения и контактных усилий. С этой точки зрения, развитие исследований и разработок привело к появлению передовых роботизированных технологий для промышленного применения. Проанализированы современные технологии роботизированной сборки, чтобы понять технологические тенденции развития промышленных роботов, выявить ограничения технологий и уточнить направления будущих исследований в этой области. В данной статье особый интерес представляют типовые операции «вал – втулка». Стратегии контроля сборки классифицируются на основе типа соединения. Подробно обсуждаются стратегии управления роботизированной сборкой и ограничения существующих технологий с целью определения будущих направлений исследований по адаптивному управлению роботизированной сборкой.

Ключевые слова: роботизированная сборка; соединение «вал-втулка»; стратегия управления; пассивная адаптация; активная адаптация

Для цитирования: 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: 10.30987/2223-4608-2023-36-48

Adaptable system of equipment and jiggling for automatic assembly

Mikhail V. Vartanov¹, D. Eng.

Nguyen V. Lin², PhD student

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

¹ m.v.vartanov@mospolytech.ru

² nguyenlinh.hvktqs@gmail.com

Abstract. Currently, industrial robots are widely used to perform position checking tasks through minimum contact, that is spot welding, spray painting, packaging and loading and unloading operations. However, performing assembly tasks with high tolerances is still a big problem for robots due to various uncertainties about assembled parts, i.e. clamp

holdings, slave tools. To correct these errors, it is necessary to have positive mobility, which is called adaptation of part position. Mobility adaptation can be achieved through active or passive means, as well as a combination of them. Passive adaptation methods are based on the use of elastic and damping elements. The structures are designed in such a way that the forces arising at the points of contact of the parts correct the errors of their position. Active adaptation methods are based on adaptive feedback control, when the assembly process and the position of the parts are adjusted automatically by measuring the position and due to contact forces. From this perspective, the expanding of research and development has led to the high robotic technologies for industrial applications. Modern technologies of robotic assembly are analyzed for better understanding of technological trends in the development of industrial robots, constraint recognition of production methods and specifying the lines of future research in this area. In this article, the typical "shaft-spacer" operations are of particular interest. Assembly control strategies are classified based on the assembly pattern. Robotic assembly management strategies and existing technologies boundary conditions are discussed in detail specifying the lines of future research in adaptable control of robotic assembly.

Keywords: robotic assembly; shaft-spacer connection; control strategy; passive adaptation; active adaptation.

For citation: Vartanov M.V., Lin N.V. Adaptable system of equipment and jiggling for automatic assembly / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 6 (156). P. 36–48. doi: 10.30987/2223-4608-2024-36-48

Введение

Сборка считается важным этапом жизненного цикла изделия. Производственная статистика показывает, что время, затрачиваемое на сборку, обычно занимает 20...50 % от общего времени производства, а затраты на сборку составляют около 20...30 % от общей стоимости конкретного изделия [1]. Процесс является трудоемким из-за специфики окружающей среды и жестких требований к качеству. Роботы представляют собой идеальное решение для сборочных операций и широко используются для высокоэффективного промышленного производства. Однако из-за неструктурированной и динамичной среды сборочных работ роботу-сборщику по-прежнему необходимо решить множество проблем, таких как: низкая чувствительность, высокие требования к среде сборки, плохая адаптируемость к сборке, низкая эффективность сборки и неспособность завершить сложную сборку в сложных условиях. В результате сборочный робот все еще не в состоянии полностью заменить человека при сборке. Как одна из ключевых технологий сборочных роботов, стратегия управления играет решающую роль в процессе автоматизированной сборки.

Разработка технологии совместимого управления создала условия для задач

роботизированной сборки, при которых робот может корректировать положение на определенной траектории планирования для достижения соответствия окружающей среде. Развитие технологий сенсорного обнаружения и управления также улучшило интеллектуальное распознавание сборочными роботами. Таким образом, была улучшена не только точность управления положением, но и визуальное восприятие роботов и восприятие силы, что позволило роботам лучше воспринимать внешнюю среду и адаптироваться к ней, а также улучшить процесс сборки в ходе промышленного производства. Технологические возможности сборочных роботов по-прежнему быстро развиваются. В настоящее время различные исследователи по всему миру изучают стратегии управления сборочными роботами с целью сделать сборочные роботы более гибкими, интеллектуальными и производительными.

В настоящее время сборка соединений типа «вал – втулка» (ВВ) является наиболее типовой задачей в процессах сборки, на ее долю приходится примерно 40 % от общего объема работ при сборке. Сборка ВВ характеризуется повторяемостью и монотонностью операций. Кроме того, все еще существуют проблемы контроля усилия и положения, вызванные поверхностным контактом «вал – втулка». Многие исследователи

изучали сборку валов. Кроме того, исследования по сборке ВВ важны для разработки технологии сборки роботами, что является важным и критичным. Таким образом, в данном обзоре рассматриваются стратегии управления сборкой ВВ, а также обсуждаются существующие проблемы и будущие тенденции развития технологии сборки роботами.

Анализ технологических требований к изделию и выявление сборочных задач

Процесс роботизированной сборки делится на четыре этапа: приближения, поиска,

перемещения и ориентации, как показано на рис. 1. ВВ собирается роботом в соответствии с определенными стратегиями управления. Робот оснащен датчиками изображений, усилий и состояний контакта, а обратная связь, полученная датчиками, обрабатывается и используется в замкнутом цикле роботизированного управления. Затем робот уточняет свое положение и ориентацию на основе обратной связи датчиком до тех пор, пока сборка ВВ не будет завершена. Однако трудности, с которыми сталкиваются при сборке ВВ, зависят от формы сопряжений, которые можно классифицировать на простую, сложную, микросборку, кольцевую и сборку с изгибом.



Рис. 1. Схема процесса роботизированной сборки и геометрическая классификация

Fig. 1. Diagram of the robotic assembly process and geometric classification

Применение метода пассивной адаптации

В пассивном податливом механизме робот полагается на дополнительный механизм, который генерирует естественное соответствие внешним силам, когда конечный инструмент контактирует с объектом в

окружающей среде [2, 3]. Однако устройство соответствия является пассивным. Это означает, что оно не адаптируется и не обладает способностью к самообучению. Алгоритмы искусственного интеллекта (AI) могут быть использованы вместе с пассивными устройствами соответствия для повышения адаптивности сборочного робота [4, 5].

Yun S.K. [4] предложил использовать алгоритм градиентного спуска для пассивных податливых шарниров. Каждый податливый шарнир в манипуляторе был оснащен последовательным упругим приводом, чтобы он мог пассивно адаптироваться к окружающей среде. Ошибки позиционирования и силы оценивались с помощью функции стоимости в алгоритме градиентного спуска. Park и др. [2] усовершенствовали устройство соответствия, заменив оборудование для соответствия с удаленным центром (УЦ) на программируемое оборудование для соответствия, в котором пружины и демпферы могут быть запрограммированы. Такое усовершенствование позволило решить некоторые проблемы двуплечих узлов ВВ, связанные с ограниченным разрешением или точностью обнаружения помех или разрывов в неструктурированной среде.

В работе [6], представлены результаты анализа процесса сборки, включающего в себя применение физико-технических эффектов с целью обеспечения технологической надежности сборочных операций. Расширение технологических возможностей роботизированной сборки представляется возможным благодаря совместному применению низкочастотной вибрации и вращательного движения. Присутствие вибрации способствует исключению вероятности заклинивания в случае наличия перекоса деталей. Экспериментально доказано, что применение эффекта вращения и низкочастотных колебаний существенно расширяет технологические зоны сборки без заклиниваний. Полученные результаты позволяют утверждать, что при использовании рациональных технологических режимов процесса на основе эффекта вращения и низкочастотных колебаний, полностью исключается вероятность заклинивания и значительно снижаются сборочные силы.

Quek Z.F. и др. [3] разработали тактильное устройство с шестью степенями

свободы (DOF). Оно имитировало деформацию человеческого пальца с помощью режимов деформации кожи на подушечках пальцев. Сила и крутящий момент устройства передавались посредством перемещения и вращения кожи. Результаты показали, что участники могут использовать тактильные датчики для уменьшения силы и момента взаимодействия. Примечательно, что участники использовали тактильные сигналы силы для снижения силы взаимодействия больше, чем тактильные сигналы крутящего момента для снижения крутящего момента взаимодействия. Основная причина такого результата заключается в том, что информация о моменте деформации кожи может быть менее интуитивной, чем информация о силе деформации кожи [3].

Имитировать человеческое прикосновение сложно. Кроме того, выбор параметров управления, даже если прикосновение может быть имитировано устройством, представляет собой сложную задачу. Поэтому значение и точность параметров управления будут в значительной степени зависеть от датчиков и устройств. Ранее также была разработана антропоморфная рука робота без дополнительных датчиков и устройств [7]. Для сборки ВВ в эксперименте был предложен робот-сборщик с тремя пальцами, а также «интуитивная стратегия вал со втулкой». Fukukawa T. и др. [5] стремились повысить точность сборки деталей кольцевого типа и разработали манипулятор с тремя параллельными пальцами, чтобы максимизировать замкнутый объем рабочего пространства. Используя предложенную стратегию управления, роботы могли выполнять точную сборку деталей кольцевого типа в режиме управления с открытым контуром. Геометрия и механические условия сборки кольца были оптимизированы для получения поллой формы. В табл. 1 представлены существующие работы с пассивными податливыми механизмами, известными к настоящему времени.

1. Методы сборки на основе пассивных податливых механизмов

1. Assembly methods based on passive compliant mechanisms

Издание, год	Характеристики	Схематическая диаграмма	Схема процесса сборки
Park и др. [2], 2014	<ul style="list-style-type: none"> – виртуальное программирование пружин; – оптимизирует оригинальное оборудование УЦ; – возможность решения задачи сборки ВВ в крошечной среде. 		
Quek и др. [3], 2015	<ul style="list-style-type: none"> – тактильное устройство с шестью степенями свободы; – устройство может имитировать деформацию человеческого пальца; – применение сигналов деформации кожи. 		
Fukukawa и др. [5], 2016	<ul style="list-style-type: none"> – максимизирует замкнутую область в интерференционный граф; – параллельный манипулятор в форме трех пальцев; – стратегия сборки кольца; – без обратной связи с датчиком. 		<p>Параллельный 3-пальцевый захват</p>
Yun [4], 2008	<ul style="list-style-type: none"> – метод градиентного спуска; -пассивный манипулятор (серия упругих приводов); – функция отражает ошибку положения и силы; – быстрые и стабильные условия обучения. 		<p>Пружина кручения</p>
Чан Чунг Та [6], 2022	<ul style="list-style-type: none"> – метод роботизированной сборки цилиндрических соединений с зазором при наличии вращательного движения и низкочастотных колебаний; – математическая модель динамики движения центра масс вала по отношению к неинерциальной системе координат, жёстко связанной со втулкой; – результаты компьютерного моделирования процесса роботизированной сборки 	<p>1 – промышленный робот; 2 – схват с силомоментным датчиком; 3 и 4 – экспериментальные образцы; 5 – виброопора</p>	<p>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</p>
Park и др. [7], 2015	<ul style="list-style-type: none"> – интуитивная стратегия «вал в отверстие»; – антропоморфный робот; – антропоморфный процесс сборки 		

Метод активной адаптации

Метод активной адаптации измеряет контактную силу или момент и передает их значения контроллеру для формирования траектории движения выходного звена робота [8]. Активное управление помогает преодолеть недостатки пассивного управления и имеет очень широкие перспективы применения. По особенностям реализации активные стратегии управления можно разделить на две категории: стратегии управления импедансом и гибридные стратегии управления силой/положением.

Управление импедансом

Для успешного выполнения сборки ВВ применяется импедансное управление настраиваемыми параметрами, относящимися к

положениям, скоростям и их динамическим связям в режиме реального времени.

Совместная задача человека и робота включает в себя задачу переноса и задачу корректировки. Управление с переменным импедансом и компенсационное управление, основанные на позиционном управлении и управлении моментом, соответственно, для собственного веса и трения робота, представлены в работе Mol N. и др. [8]. Авторы разработали стратегию управления со вложенным импедансом и датчиком силы, чтобы смягчить некоторые недостатки чисто импедансного управления. Архитектура импедансного управления с датчиком силы показана на рис. 2. Результаты показали, что максимально допустимый угол смещения был в 13 раз выше, а ограничения и крутящий момент – в пять раз ниже, чем у чисто импедансного управления.

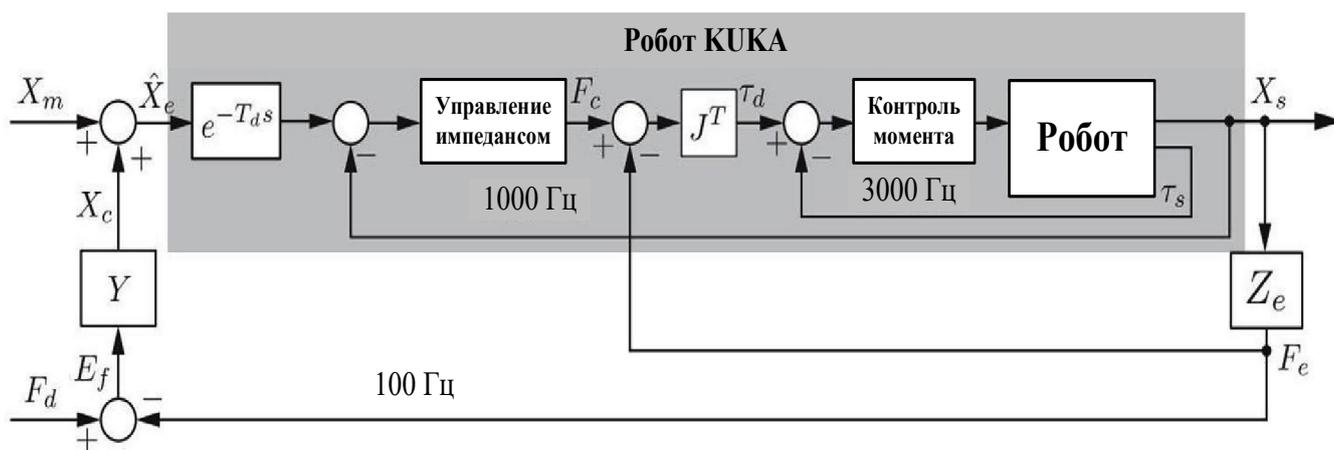


Рис. 2. Архитектура управления импедансом с внешним контуром управления допуском с задержкой [8]:

Z_e – окружающая среда; τ_d – требуемый крутящий момент; τ_s – измеренный крутящий момент во внутреннем контуре управления крутящим моментом ведомого робота; X_s – выходное положение робота

Fig. 2. Impedance control architecture with an external control circuit with a delay tolerance [8]:

Z_e – the environment; τ_d – the required torque; τ_s – a measured torque in the internal torque control circuit of the slave robot; X_s – robot advantageous position

Импедансное управление является эффективным методом управления силой робота и широко изучается благодаря низкой вычислительной сложности и высокой надежности [9 – 12]. Его можно

комбинировать с алгоритмами и устройствами для сборки деталей сложной формы. Song H.C. и др. [9] использовали модель сложной детали, созданную с помощью автоматизированного проектирования (CAD), для

управления силой и положением робота. Аналогично, для работы с гибкими резиновыми объектами Jasim и др. [10] предложили интегрированный метод, названный стратегией робастного адаптивного управления без модели (MFRAC), основанный на адаптивной нечеткой системе управления в скользящем режиме и общих функциях Ляпунова. Эксперименты показали, что стратегия MFRAC была эффективна для сборки гибких прищепок даже при неопределенности параметров модели и импеданса. Korpela С. и др. [11] исследовали возможность выполнения сборки ВВ для деталей самолета. Они разработали кинематические и динамические модели роботов, реализующие управление импедансом. Cho и др. [12] разработали наблюдатель возмущений для измерения и оценки возмущений крутящего момента в суставе, подверженном воздействию внешних сил.

Гибридное управление силой/положением

К настоящему времени гибридное управление силой и положением продемонстрировало большой потенциал для управления усилием робота. Очевидной особенностью является то, что сила и положение учитываются одновременно. Потенциал гибридного управления силой и положением был доказан теоретически, однако его практическое применение все еще сталкивается с некоторыми трудностями. Для улучшения результатов управления исследователи приложили большие усилия, чтобы объединить генетические алгоритмы, адаптивные алгоритмы и нечеткие системы управления с гибридными системами управления силой и положением [13, 14].

Wang и др. [14] предложили гибридную стратегию управления силой и

положением для замены соответствующих систем управления силой и положением. При их реализации нечеткий контроллер совместного импеданса со скользящим режимом (FSMJIC) был применен для объединения обратной связи по зрению и силе, чтобы улучшить управление роботом. Lee D.H. и др. [13] провели исследование, посвященное реализации роботизированной сборки ВВ, имитирующей действия человека, а именно с использованием двойных манипуляторов и роботизированных рук. Стратегия сборки вала со втулкой в данном исследовании состоит в основном из двух частей: стратегии захвата и стратегии сборки. Для фактической реализации предложена схема управления силой с обратной связью. Также рассматривается гибридное управление силой и положением для реализации стратегии сборки. Разработка гибридного контроллера силы/положения – непростая задача, поскольку управление силой должно быть интегрировано с алгоритмом поиска отверстия. Vdiwi и др. [15] исследовали решение, в котором зарядный штекер был задействован в нескольких зарядных интерфейсах.

Для сборки на микроуровне Jain R.K. [16] разработал систему микроманипулирования с использованием гибридного управления силой/положением композита «ионный полимер-металл» (ИПМС), в которой сборка на микроуровне характеризовалась большим смещением, неопределенной величиной силы и необходимостью компенсации смещения. Все эти аспекты были решены в предложенной системе. На рис. 3 показана схема системы микроманипулирования для сборки ВВ. Кроме того, в табл. 2 приведен обзор известных работ по активному управлению податливостью на основе временной последовательности

2. Методы сборки на основе активной адаптации

2. Assembly methods based on active adaptation

Тип управления	Издание, год	Стратегия и подход	Основной вклад
Управление импедансом	Mol и др. [8], 2016	– стратегия управления вложенным адмиттансом/импедансом	– вложенный регулятор адмиттанса-импеданса; – активно оценивает и минимизирует влияние геометрического смещения; – возможность регулировки вращательного смещения (максимально допустимое смещение 20°); – стратегия управления вложенным адмиттансом/импедансом на основе датчика силы в замкнутом контуре; – повышение надежности и производительности задачи ВВ.
	Song и др. [9], 2014	– управление силой на основе визуально получаемой геометрической информации и CAD-моделей модели	– геометрически сложная стратегия сборки ВВ; – компенсирует ошибки положения и ориентации в сложных ВВ.
	Cho и др. [12], 2014	– наблюдатель возмущений; – преобразование матрицы Якоби в силу и момент в декартовом пространстве; – импедансный регулятор, спроектированный в декартовом пространстве.	– уменьшение трения при чувствительности роботов; – алгоритм управления силой без датчиков для промышленных роботов; – наблюдатели измеряют и оценивают возмущающий момент.
	Korpela и др. [11], 2013	– моделирование кинематики и динамики; – обратная связь по усилию; – контроль импеданса; – открытая виртуальная среда для робототехники.	– изучение сборки самолетов; – генерируемые кинематические решения и траектории движения робота; – анализ различий между ВВ и другими ассамблеями.
	Jasim и др. [10], 2015	– робастное адаптивное управление без модели (MFRAC)	– гибкая стратегия сборки; – может применяться для динамического управления произвольным импедансом.
Гибридное управление силой/положением	Wang [14], 2016	– гибридное управление силой и положением с помощью визуальной информации; – нечеткое управление импедансом сустава в скользящем режиме.	– визуальная информация повышает способность к соблюдению; – интегрированная визуальная и силовая информация; – эффективное снижение влияния экологических ограничений; – решена проблема вибрации контроллера привода.
	Bdiwi и др. [15], 2015	– стратегия позиционирования на основе визуальной и инфракрасной информации; – силовое управление в сочетании со спиральным алгоритмом.	– сокращение ошибок при сборке, вызванных визуальными датчиками; – выполнена сборка 5-контактного промышленного штекера зарядного устройства.
	Farrugia [13], 2015	– транзьютерная сеть (производительность параллельной обработки данных на шести компьютерах).	– построение общего датчика силы; – предложен общий контроллер для гибкой сборки.
	Jain [16], 2013	– манипулятор из ионного полимерного металлокомпозита (IPMC).	– разработан мультимикрооперационная система; – стратегия сборки Micro ВВ.
	Нгуен Ван Зунг [17], 2023	– идентификатор контактных состояний на различных этапах процесса сопряжения; – создание алгоритма управления промышленным роботом при роботизированной сборке на основе силомоментного оцувствления.	– разработка математических моделей контактных состояний при роботизированной сборке цилиндрических соединений; – применение позиционно-силового управления позволяет идентифицировать положение вала и втулки.

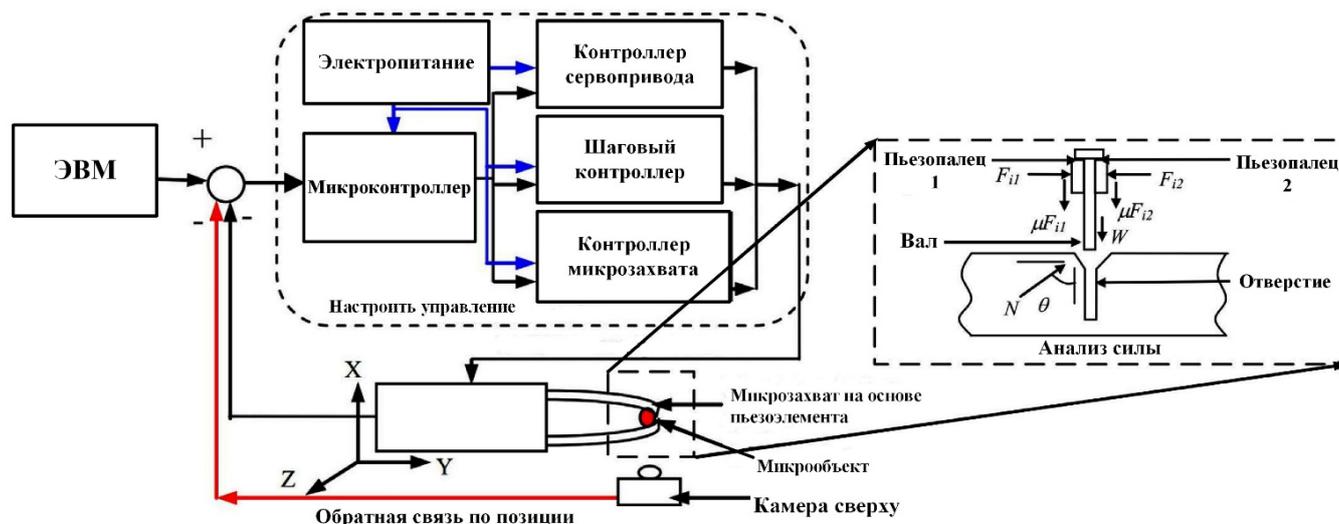


Рис. 3. Схема управления микроманипулятором [16]

Fig. 3. Micromanipulator control scheme [16]

В работе [17] был исследован метод активной адаптации на основе управления с обратной связью, использующий силомоментный датчик. Было определено положение точки контакта жесткого вала и втулки при сопряжении с помощью сигналов силомоментного датчика. Полученная информация о положении точки контакта позволяет вносить корректировки в движение рабочего органа робота во время выполнения операции сборки. Разработанный метод сборки, основанный на активной адаптации и использовании силомоментного датчика, обеспечивает высокую технологическую надежность процессов сопряжения цилиндрических соединений с малым зазором.

В рамках формирования навыков робота для распознавания контактных ситуаций в окружающей среде, основанных на сигналах силомоментного датчика, распознавание контактных состояний представляется одним из важнейших элементов реализации концепции программирования при активной адаптации робота. В работе [18] предложен метод машинного обучения для распознавания состояний контакта нежесткой цилиндрической детали, сопрягаемой с жесткой втулкой при роботизированной сборке на основе метода машины опорных векторов. Построена модель определения состояния контакта на основе данных о усилиях с силомоментного датчика и координатах положения из

системы промышленного робота. Результаты исследования являются основой для разработки алгоритма позиционно-силового управления при роботизированной сборке нежестких деталей.

Методы управления с использованием вспомогательных операций

Для повышения гибкости робота, позволяющей ему справляться со сложными операциями сборки, в него могут быть интегрированы вспомогательные технологии. Однако классические стратегии управления по-прежнему играют важную роль в процессе выполнения задач сборки роботами [20]. Существующие методы управления были усовершенствованы с помощью вспомогательных устройств, что еще больше расширяет область применения вышеупомянутых методов управления. В данной работе под вспомогательной технологией понимаются стратегии и методы управления, используемые при сборке ВВ путем внедрения вспомогательных устройств.

Для повышения гибкости сборочных роботов было разработано множество вспомогательных устройств. Например, система Леар-движение была использована для восприятия поз человеческих рук, чтобы робот мог имитировать движения рук [19]. Новый наблюдатель без датчиков был предложен в качестве вспомогательного устройства для помощи

роботу в выполнении процессов сборки [20]. Takahashi J. и др. [21]. предложили метод управления для сборки деталей типа колец. Для решения проблемы деформации во время сборки деталей была предложена новая техника сопряжения, основанная на принципе пассивного выравнивания (PAP). PAP позволяет корректировать положение кольца и минимизировать его деформацию до наноразмеров. Упругость деталей типа «кольцо» также была проанализирована Alrizar и др. [19]. Они предложили новую стратегию работы с деформируемым объектом, когда он вставляется двуручным роботом. Для определения траектории движения робота на основе улавливаемого движения человеческой руки использовался контроллер шагового движения (рис. 4, а).

Поведение пьезоэлектрического микрозахвата и микрооперационной системы анализируется путем использования визуальных датчиков. Эти датчики способны обеспечить высокую точность позиционирования цели во время выполнения микрозахватов роботом, что позволяет ему точно находиться и перемещаться между различными положениями отверстий в рабочем пространстве. Однако пьезоэлектрический привод имеет нелинейные характеристики, являющиеся единственным ограничением данной технологии [22]. Рис. 4, б представляет собой САПР-модель микрооперационной системы, основанной на пьезоэлектрических приводах, и схему управления каждым микроманипулятором.

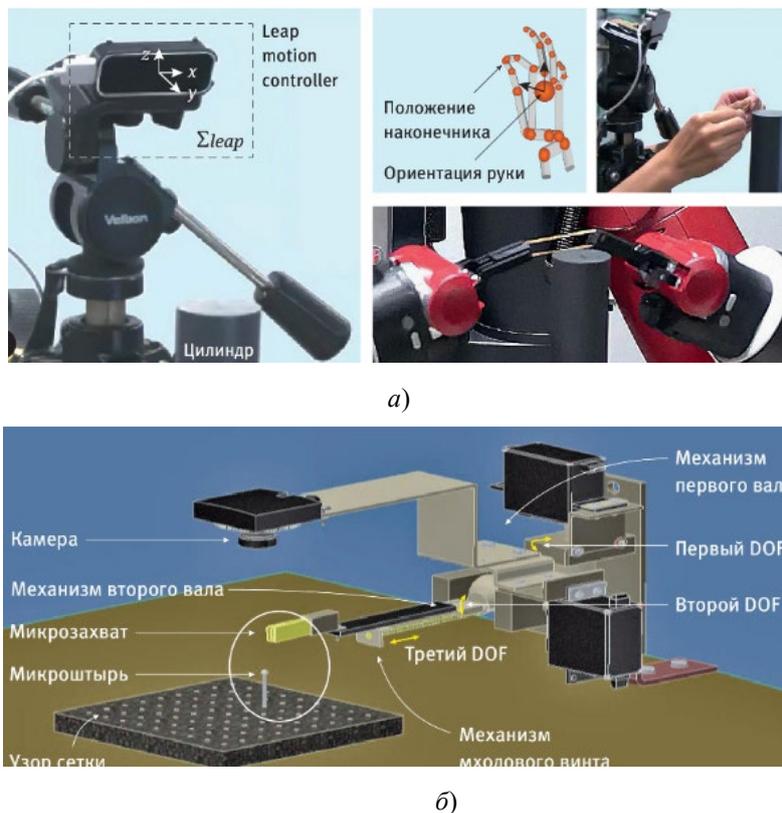


Рис. 4. Стратегия контроля сборки с использованием вспомогательной технологии:

а – стратегия поиска гибкой сборки на основе «контроллер шагового движения» [18]; б – стратегия поиска микро-нано на основе двухчипового пьезоэлектрического драйвера и микрооперационной системы [22]

Fig. 4. Assembly control strategy using auxiliary technology:

а – flexible assembly search strategy based on the «step motion controller» [18]; б – micro-nano search strategy based on a two-chip piezo-electric driver and a micro-operation system [22]

Savarimuthu и др. [23] использовали дистанционный подход для проведения экспериментов по сборке ВВ с различными

начальными конфигурациями для получения точных данных в среде сборки. Согласно анализу данных захвата, генерируемых

операторами, была предложена стратегия сборки с целью получения стратегии выполнения действий операторов роботом. В работе

использована роботизированная рука с шестью степенями свободы и гибкий трехпальцевый схват SDH-2 (рис. 5).

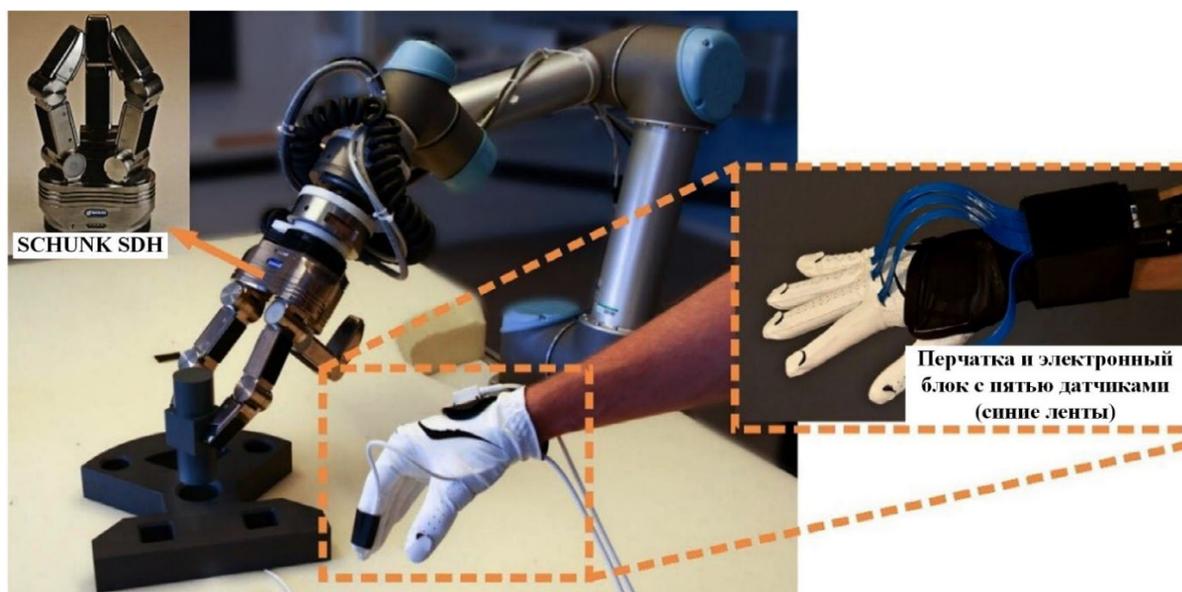


Рис. 5. Телеоперационная установка с датчиком, закрепленным на руке и манипулятором Universal робот [23]

Fig. 5. Teleoperation installation with a sensor mounted on the arm and The Universal robot manipulator [23]

Заключение

По сравнению с ручной сборкой, роботизированная имеет целый ряд преимуществ, а стратегии управления показали свой потенциал в замене человека-оператора для полной автоматизации процессов сборки. В представленной работе классифицированы и обобщены последние исследования, основные методологии и ограничения.

Соответствующие стратегии управления делятся на активные и пассивные. Пассивные механизмы подчинения менее эффективны, но в нескольких недавних исследованиях были сделаны некоторые улучшения для повышения адаптивности роботизированной сборки. Улучшения в основном касались интеграции тактильных характеристик человеческих рук и оптимизации конструкции роботов для повышения эффективности процессов сборки. Активные податливые механизмы могут быть использованы для преодоления недостатков пассивных податливых

механизмов, и исследования активных податливых механизмов привлекают большое внимание. Ожидается, что активные стратегии управления позволят решить большинство проблем, возникающих при сборке роботами. Хотя не все активные податливые механизмы достигли ожидаемых результатов, необходимы дальнейшие усилия для улучшения адаптивности и надежности существующих податливых стратегий сборки.

Стратегии вспомогательной сборки используют вспомогательные устройства, программное обеспечение и алгоритмы для облегчения процессов сборки. Вспомогательные устройства сложны и дороги, а циклы их разработки отнимают много времени. Были предприняты усилия по использованию некоторых распространенных устройств, таких как Leap- движение и системы визуализации. Для роботизированной сборки отсутствует доступное вспомогательное сборочное оборудование.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Xu L.D.** et al. AutoAssem: an automated assembly planning system for complex products // Proceedings of the IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2012. V. 8. Iss. 3. P. 669–678, DOI: doi.org/10.1109/TII.2012.2188901.
2. **Park H.** et al. Dual arm peg in-hole assembly with a programmed compliant system // Proceedings of the Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). 2014. P. 431–433. DOI: doi.org/10.1109/URAI.2014.7057477.
3. **Quek Z.F.** et al. Sensory substitution of force and torque using 6-DOF tangential and normal skin deformation feedback // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE. 2015. P. 264–271. DOI: doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139010.
4. **Yun S.K.** Compliant manipulation for peg-in-hole: is passive compliance a key to learn contact motion? // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE. 2008. P. 1647–1652. DOI: doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543437.
5. **Fukukawa T., Park J., Fukuda T.** Precise assembly of ring part with optimized hollowed finger // ROBOMECH Journal. 2016. V. 16. P. 13–15. DOI: doi.org/10.1186/s40648-016-0055-1.
6. **Tran, C.T.** Increasing the technological reliability of automatic assembly of cylindrical joints based on rotational motion and low-frequency vibrations: dis. ...cand. those. Sciences: 02/05/08 / Tran Chung Ta. Moscow, 2021. 155 p.
7. **Park H.** et al. Robotic peg-in hole assembly by hand arm coordination // The Journal of Korea Robotics Society. 2015. V. 10. P. 42–51. DOI: doi.org/10.7746/jkros.2015.10.1.042
8. **Mol N.** et al. Nested compliant admittance control for robotic mechanical assembly of misaligned and tightly toleranced parts // Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), IEEE. 2017. P. 2717–2722. DOI: //doi.org/10.1109/SMC.2016.7844650.
9. **Song H.C., Kim Y.L., Song J.B.** Automated guidance of peg-in-hole assembly tasks for complex-shaped parts // Proceedings of the IEEE/RSInternational Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2014. P. 4517–4522. DOI: //doi.org/10.1109/IROS.2014.6943202.
10. **Jasim I.F., Plapper P.W., Voos H.** Model-free robust adaptive control for flexible rubber objects manipulation // Proceedings of the Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE. 2015. P. 1–8. DOI: doi.org/10.1109/ETFA.2015.7301500.
11. **Korpela C.** et al. Towards the realization of mobile manipulating unmanned aerial vehicles (MM-UAV): peg-in-hole insertion tasks // Proceedings of the IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications, IEEE. 2013. P. 1–6. DOI: //doi.org/10.1109/TePRA.2013.6556353.
12. **Cho H.** et al. Cartesian sensor less force control for industrial robots // Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE. 2014. P. 4497–4502. DOI: //doi.org/10.1109/IROS.2014.6943199
13. **Lee D.H.** et al. Peg-in-hole assembly with dual-arm robot and dexterous robot hands // Proceedings of the IEEE Robotics and Automation Letters, IEEE. 2022. V. 7. Iss. 4. P. 8566–8573. DOI: //doi.org/10.1109/LRA.2022.3187497.
14. **Wang K.J.** Fuzzy sliding mode joint impedance control for a tendon-driven robot hand performing peg-in-hole assembly // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE. 2017. P. 2087–2092. DOI: //doi.org/10.1109/ROBIO.2016.7866637.
15. **Bdiwi M., Winkler A., Such J.** Improved peg-in hole (5-pin plug) task: intended for charging electric vehicles by robot system automatically // Proceedings of the International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, IEEE. 2015. P. 1–5. DOI: //doi.org/10.1109/SSD.2015.7348200.
16. **Jain R.K., Saha S., Majumder S.** Development of piezoelectric actuator based compliant micro gripper for robotic peg-in-hole assembly // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE. 2013. P. 1562–1567. DOI: //doi.org/10.1109/ROBIO.2013.6739689.
17. **Nguyen Van Dung.** Increasing the technological reliability of a robotic assembly based on the development of a robot control algorithm // Izvestia of Tula State University, 2022, no. 4, pp. 518–528. DOI:10.24412/2071-6168-2022-4-518-528.
18. **Vartanov M.V., Nguyen Van Linh.** Recognition of contact states of non-rigid cylindrical parts during robotic assembly based on the support vector machine // Assembly in mechanical engineering, instrument making, 2024, no. 1, pp. 3–10. DOI: //doi.org/10.36652/0202-3350-2024-25-1-3-10.
19. **Ramirez-Alpizar I.G., Harada K., Yoshida E.** Human-based framework for the assembly of elastic objects by a dual-arm robot // ROBOMECH Journal 4. 2017. V. 20. P. 902. DOI:// doi.org/10.1186/s40648-017-0088-0.
20. **Cho H.** et al. Cartesian sensor-less force control for industrial robots // Proceedings of the IEEE/RSJ

International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE. 2014. P. 4497–4502. DOI: //doi.org/10.1109/IROS.2014.6943199.

21. **Takahashi J., Fukukawa T., Fukuda T.** Passive alignment principle for robotic assembly between a ring and a shaft with extremely narrow clearance // IEEE/ASME Trans. Mechatron. 2016. V. 21. Iss. 1. P. 196–204. DOI: //doi.org/10.1109/TMECH.2015.2448639.

22. **Jain R.K., Saha S., Majumder S.** Development of piezoelectric actuator based compliant micro gripper

for robotic peg-in-hole assembly // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Shenzhen. 2013. P. 1562–1567. DOI: //doi.org/10.1109/ROBIO.2013.6739689.

23. **Savarimuthu T.R., Liljekrans D., Ellekilde L.P.** Analysis of human peg-in hole executions in a robotic embodiment using uncertain grasps // Proceedings of the 9th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo), IEEE. 2013. P. 233–239. DOI: //doi.org/10.1109/RoMoCo.2013.6614614.

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 07.02.2024; одобрена после рецензирования 26.02.2024; принята к публикации 27.02.2024.

The article was submitted 07.02.2024; approved after reviewing 26.02.2024; accepted for publication 27.02.2024.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка Н.А. Лукашов. Редактор Е.В. Лукашова. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.06.2024. Выход в свет 28.06.2024.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Брянский государственный технический университет» 241035,

Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

