

Научная статья

УДК 004.896

Вестник МГТУ «Станкин». 2025. № 1 (72). С. 8–15.

Vestnik MSUT “Stankin”. 2025. No. 1 (72). P. 8–15.

М. А. Шережев¹, Г. У², В. В. Серебренный²

¹ ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»; ² МГТУ им. Н.Э. Баумана

✉ Автор для корреспонденции

ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ КОЛЛАБОРАТИВНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ ДЛЯ СБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация

При разработке колаборативных робототехнических ячеек необходимо учитывать целый ряд вопросов. Целью данной работы является разработка технического решения для колаборативной производственной ячейки, предназначенной для сборки выводных компонентов печатных плат в отверстия. Для достижения данной цели предложен метод, включающий декомпозицию и распределение задач в соответствии с возможностями человека и робота, а также использование онтологической базы знаний для динамического распределения задач. Также рассмотрены вопросы проектирования и интеграции системы технического зрения, способной распознавать человека и выводные компоненты.

В рамках работы представлена архитектура системы управления сотрудничеством человека и робота, которая была протестирована в симуляционной среде CoppeliaSim. Процесс выполнения задач подтвердил эффективность предложенных методов и технологий, а также продемонстрировал потенциал применения данной системы управления в сфере промышленного производства.

Ключевые слова: сотрудничество человека и робота, система управления, распределение задач, онтология, система технического зрения.

Для цитирования: Шережев М.А., У Г., Серебренный В. В. Вопросы разработки колаборативной робототехнической ячейки для сборочного производства // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 1 (72). – С. 8–15.

M.A. Shereuzhev¹, G. Wu², V.V. Serebrenny²

¹ MSUT “STANKIN”; ² Bauman Moscow State Technical University

✉ Corresponding author

ISSUES OF DEVELOPING A ROBOTIC CELL FOR ASSEMBLY PRODUCTION

Abstract

There is a number of issues to consider when developing collaborative robotic cells. The goal of this work is to develop a technical solution for a collaborative production cell designed for assembling through-hole components of printed circuit boards into their respective holes. To achieve this goal, a method has been proposed that includes task decomposition and allocation based on the capabilities of humans and robots, as well as the use of an ontological knowledge base for dynamic task allocation. Additionally, the design and integration of a vision system capable of recognizing humans and through-hole components have been examined. This work presents the architecture of a human-robot collaboration control system, which was tested in the CoppeliaSim simulation environment. The task execution process confirmed the effectiveness of the proposed methods and technologies, as well as demonstrated the potential for applying this control system in industrial production.

Keywords: human-robot collaboration, control system, task allocation, ontology, vision system.

For citation: Shereuzhev M.A., G. Wu, Serebrenny V.V. Issues of developing a robotic cell for assembly production. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2025. No 1 (72). P. 8–15. (In Russian)

Введение

В последние годы наблюдается значительное увеличение количества коллаборативных рабочих ячеек, используемых в промышленности. Однако, проектирование и внедрение систем управления, учитывающих участие человека, остаются недостаточно проработанными. В производственных ячейках человек рассматривается как фактор неопределенности, вследствие этого, в процессе сотрудничества требуется учитывать вопросы безопасности [1]. При возникновении непредвиденных ситуаций система управления должна своевременно реагировать и принимать решения. Это подчеркивает актуальность задач, связанных с созданием новых и совершенствованием существующих технологий, обеспечивающих более активное внедрение сотрудничества человека и робота в производственные процессы.

Данное исследование направлено на оценку возможности создания коллаборативной производственной ячейки для установки выводных компонентов в отверстия печатной платы. При сборке печатной платы, представленной на *рис. 1*, коллаборативный робот, оснащенный специализированным оборудованием, автоматически выполняет установку и пайку компонентов для поверхностного монтажа [2]. Однако, компоненты должны вручную размещаться в отверстия, а затем передаваться на конвейер для выборочной пайки. Сотрудничество человека и робота способствует повышению производительности, следовательно, требуется разработка эффективного метода распределения задач [3]. В некоторых исследованиях предполагается, что человек также может рассматриваться как интеллектуальный агент, в связи с этим в мультиагентных системах распределение и перераспределение задач может осуществляться с использованием методов,



Рис. 1. Сборка печатной платы при помощи специальных автоматизированных установок

основанных на оптимизации [4], алгоритмах аукциона [5] или методах машинного обучения [6]. Во всех вышеуказанных методах учитывается гетерогенность человека и робота, такая как различия в способностях и разное время выполнения задач. Однако, в промышленных процессах способности могут изменяться [7], поэтому целесообразно осуществлять динамическое распределение задач.

Целью данного исследования является разработка колаборативной робототехнической ячейки, предназначенной для сборочной линии печатных плат, с учетом присутствия человека и связанных с этим неопределенностей. Задачи, решаемые в данной работе:

- разработка декомпозиции задачи и распределения задачи по возможностям человека и робота;
- разработка алгоритма динамического распределения задачи с помощью онтологической базы знаний;
- разработка алгоритма обнаружения человека и компонентов печатной платы с использованием системы технического зрения;
- проведение симуляционных экспериментов на базе разработанной программной архитектуры.

Материалы и методы выполнения исследований

Общая структура системы управления сотрудничеством человека и робота представлена на *рис. 2* и состоит из модулей разбиения задач, онтологической базы знаний, планирования движения робота и сенсорного восприятия. Эти модули обеспечивают эффективное сотрудничество роботов и человека в сложных рабочих условиях.

Модуль декомпозиции задач преобразует сложные задачи в последовательность выполнимых подзадач. Онтологическая база знаний описывает типы операций, которые могут выполняться агентами, их ограничения, требования задач, а также фиксирует ключевые элементы рабочего пространства и их топологические взаимосвязи. Кроме того, база знаний взаимодействует с другими модулями, поддерживая проверку выполнимости задач и динамическое обновление состояний системы.

Модуль планирования движения робота создает оптимальные планы движения для каждого робота на основе результатов распределения задач и актуальной информации о рабочей среде. Сенсоры собирают данные о состоянии окружающей среды и системы, включая обнаружение выводных компонентов и отслеживание движений человека. Сен-



Рис. 2. Структурная схема системы управления сотрудничеством робота и человека

сорные данные, полученные в реальном времени, используются для обновления состояния системы и предоставления информации, необходимой для динамической корректировки планирования траекторий робота.

Формализация задачи планирования

В промышленной среде предпочтение отдается методам, основанным на графах, для представления и декомпозиции сложных задач. В частности, широко используется ориентированный ациклический граф, который позволяет визуализировать последовательность и взаимозависимость задач. Кроме того, он поддерживает параллельное выполнение задач, что делает его подходящим для сценариев сотрудничества человека и робота.

Рассмотрим задачу установки выводных компонентов в отверстия печатной платы, которая может быть разложена на n подзадач: T_1 – установка подставки для печатной платы; T_2 – размещение платы на подставке; T_3, T_4, \dots, T_{n-2} – установка всех разъемов; T_{n-1} – проверка качества установок всех разъемов; T_n – перенос платы на конвейер. T_3, T_4, \dots, T_{n-2} должны быть выполнены после завершения T_2 , а T_{n-1} зависит от завершения T_3, T_4, \dots, T_{n-2} .

Участниками являются оператор и коллaborативный робот. С учетом различий в возможностях робота и человека, подзадачи могут быть распределены следующим образом: T_1 назначается роботу, T_2 – человеку. Разъемы меньшего размера, такие как T_3 и T_4 , устанавливаются роботом. Разъем T_5 имеет сложную форму, как и используемый для его монтажа инструмент, поэтому его установка на плату возможна только человеком. Остальные

разъемы могут быть установлены либо человеком, либо роботом. Требуется разработка системы динамического распределения задач, которая будет определять, какому агенту поручить установку оставшихся разъемов, на основе текущего поведения человека. Качество установки всех разъемов T_{n-1} и передача печатной платы на конвейер T_n могут выполняться только человеком. Результат можно представить в виде графа, показанного на рис. 3.

Представление параметров системы с помощью онтологии

Для отслеживания выполнения задач в реальном времени и их динамического распределения необходимо разработать онтологическую базу знаний, которая предоставляет структурированную и машинно интерпретируемую модель данных. Онтология представляет собой формализованное описание знаний, состоящее из набора концепций определенной предметной области, отношений между этими концепциями, а также набора аксиом и правил, которые определяют эти концепции и их взаимосвязи.

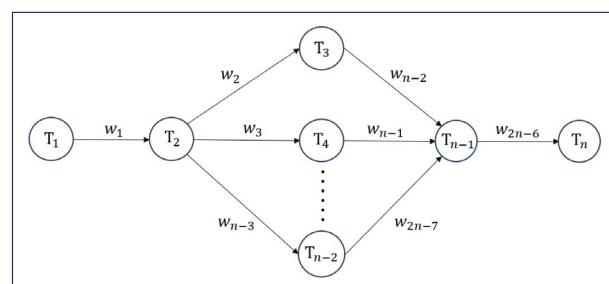


Рис. 3. Пример декомпозиции задачи в виде графа

Среда описания ресурсов используется как логический язык для представления знаний, где концепции и их отношения описываются с помощью триплетов «субъект-предикат-объект». Онтология позволяет систематизировать сущности коллаборативной производственной ячейки [8]. Типичная сущность среды может быть представлена следующим образом:

РАЗЪЕМ \equiv Компонент \wedge Доступный \wedge ОбъектДляЗахвата \wedge имеетРазмер $\in [0.02, 0.03]$ \wedge имеетПозицию $\in [0.5, 0.1, 1]$ (1)

База знаний, основанная на онтологиях, позволяет агентам проводить логические рассуждения на основе доступной в их базе данных информации. Процесс рассуждений может быть выражен по формуле:

$$\mathcal{F} = \{f \mid \mathcal{K} \cup \mathcal{R} \models f \cap f \in \mathcal{Q}\}, \quad (2)$$

где \mathcal{K} – набор фактов, \mathcal{R} – набор правил вывода, \mathcal{F} – вывод результатов, удовлетворяющих запросу \mathcal{Q} , \mathcal{Q} – условия запроса, f – логическое заключение, выведенное из базы фактов \mathcal{K} и набора правил \mathcal{R} , которое удовлетворяет условиям запроса \mathcal{Q} .

Разделение знаний на три онтологии – онтологию среды, онтологию робота и онтологию задач – способствует чёткой формализации знаний в отдельных предметных областях, облегчает их независимое обновление и обеспечивает обмен знаниями между областями с использованием семантических связей. Общая структура онтологической базы знаний представлена на *рис. 4*.

Помимо определения свойств типа данных, таких как местоположение и размеры различных сущностей, необходимо также определить свойства объектов, включая «видно_кому», «доступно_для», «держит_в_руке», «расположен_над» и «назначен_кому».

Обнаружение человека и компонентов печатной платы

Система технического зрения предоставляет коллаборативной производственной ячейке возможность воспринимать изменения в окружающей среде и управлять процессом сотрудничества человека и робота. Функциональность всех модулей системы технического зрения представлена на *рис. 2*.

Для использования в разрабатываемой системе технического зрения была выбрана камера Kinect Xbox 360. Коллаборативная ячейка оснащена двумя камерами: одна используется для обнаружения и распознавания человека, другая – для обнаружения и распознавания выводных компонентов. В дан-

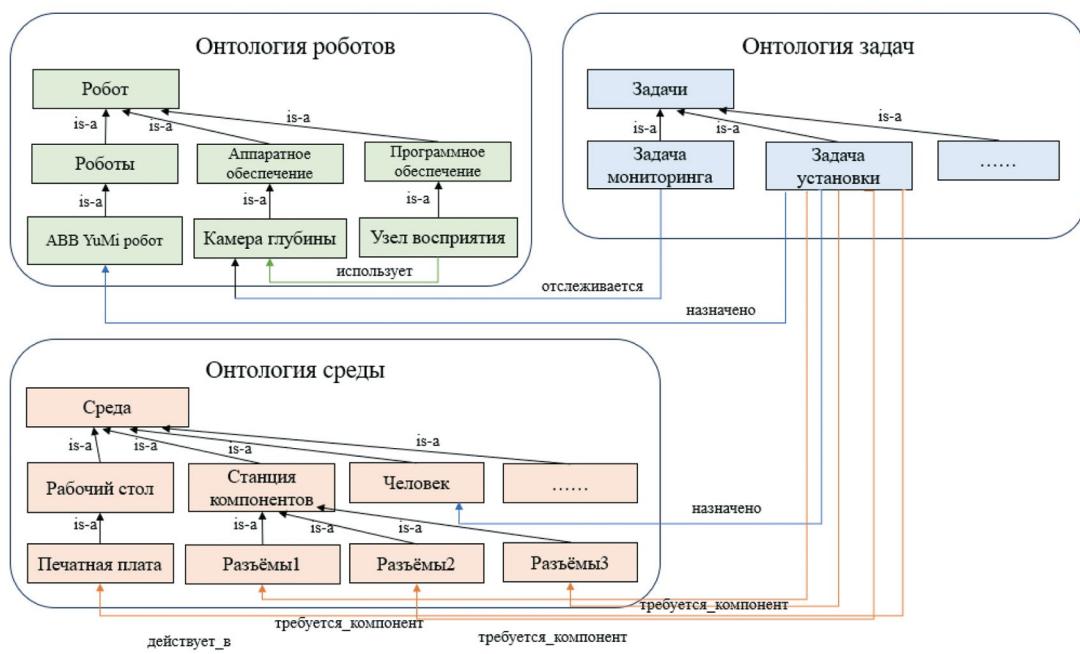


Рис. 4. Общая структурная схема онтологической базы знаний

ной работе для распознавания человека и выводных компонентов применяется детектор YOLOv5 [9], а для идентификации личности человека используется детектор OpenFace [10], выполняющий распознавание лиц. Только после обнаружения человека и подтверждения его личности робот начинает выполнять операции. Если необходимый разъём не обнаружен, робот переходит в режим ожидания до устранения проблемы.

Методология проведения эксперимента и результаты

Эксперимент проводился в симуляционной среде CoppeliaSim. Конфигурация колаборативной роботизированной производственной ячейки и расположение всех деталей, которые необходимо собрать на рабочем столе, представлены на *рис. 5*. Для эксперимента использовалась модель робота ABB IRB14000 YuMi. Разъёмы 1 и 2 устанавливаются на плату роботом, а разъём 4 устанавливается на плату человеком. Установка разъёма 3 назначается либо человеку, либо роботу.

Для реализации работы элементов системы управления колаборативной производственной ячейки были разработаны программные модули, которые взаимодействуют как отдельные блоки. Программная архитектура колаборативной производственной ячейки представлена на *рис. 6*.

Онтологическая база знаний была разработана в программном обеспечении для редактирования онтологий Protégé и преобразована в формат “owl” с помощью библиотеки Owlready для обеспечения доступа, запросов и вывода заключений в среде Python 3. Сценарий в симуляционной среде CoppeliaSim вызывают и управляют роботом в среде Python 3 через удаленный API. Контроллер распределения задач выполняет распределение за-

дач, запрашивая состояния элементов в онтологиях задач и среды. Контроллер планирования движения использует информацию о состоянии человека и других элементов из онтологии для планирования пути робота, чтобы гарантировать отсутствие риска столкновений в процессе сотрудничества.

Перед распределением задач выполняется запрос к онтологии для идентификации выводных компонентов, необходимых для сборки печатной платы:

$$\begin{aligned} & \text{find}(\text{?obj type Component}) \\ & \Rightarrow \text{?obj} = [\text{Connector1, Connector2, Connector3}] \end{aligned} \quad (3)$$

Модуль вывода правила из общих знаний, например, используя информацию о том, что человек виден, а у него нет выводных компонентов в руках, чтобы сделать вывод, что человек не работает:

$$\begin{aligned} & (\text{isVisible}(\text{?ag}) \wedge \text{not}(\text{hasInHand}(\text{?ag}, \text{?obj}))) \\ & \rightarrow \text{not}(\text{isWorking}(\text{?ag})) \end{aligned} \quad (4)$$

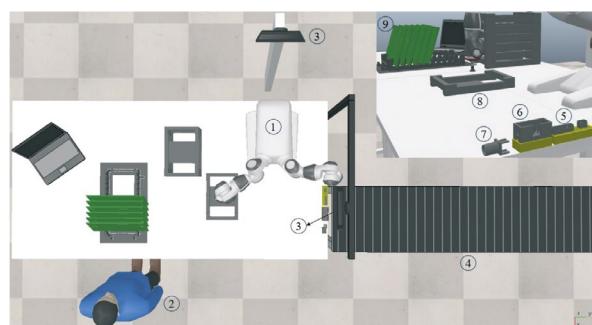


Рис. 5. Конфигурация колаборативной ячейки:
1 – колаборативный робот; 2 – человек;
3 – две камеры глубины; 4 – конвейер;
5 – разъёмы 1 и 2; 6 – разъём 3; 7 – разъём 4;
8 – подставка печатной платы; 9 – печатная плата

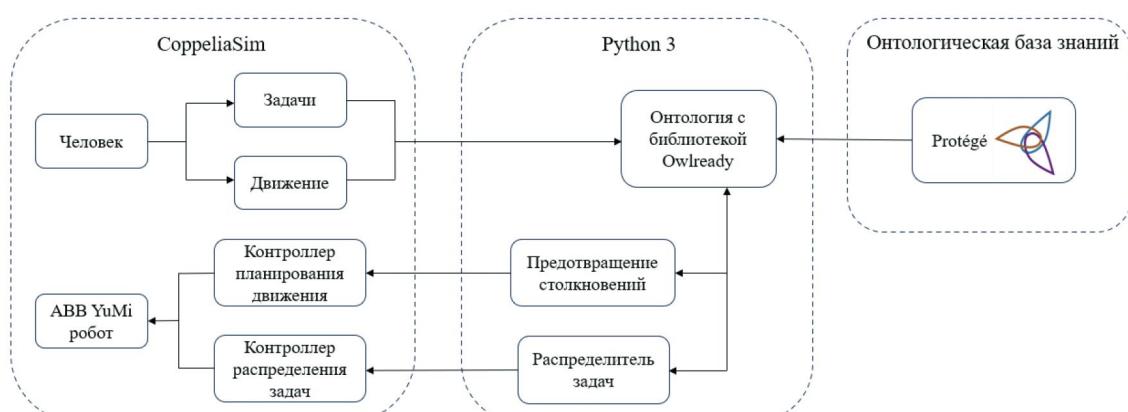


Рис. 6. Программная архитектура колаборативной производственной ячейки

При запросе информация может быть объединена для устранения двусмыслинности:

$$\begin{aligned} & \text{find}(\text{?obj type Component; Human hasInHand ?obj}) \\ \Rightarrow & \text{?obj} = [\text{Connector4}] \end{aligned} \quad (5)$$

Поскольку в онтологии определены свойства типа данных, робот может запрашивать местопо-

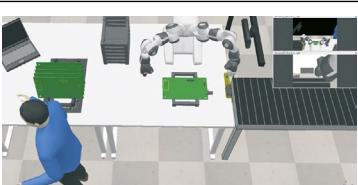
ложение выводных компонентов при планировании движения:

$$\text{find}(\text{Connector1 isAt ?loc}) \quad (6)$$

В таблице представлен процесс совместной работы человека и робота при выполнении всей подзадачи. В момент времени t_1 система технического зрения воспринимает, что подставка для печатной

Таблица

Процесс совместной работы человека и робота при выполнении всей подзадачи

| Время | Сценарий | Запрос онтологии | Действие |
|-------|---|---|--------------------------|
| t_1 |  | <i>Stand isVisible true Stand isReachable true Stand isOn Table Human isVisible true Human hasInHand PCB</i> | Установка подставки |
| t_2 |  | <i>PCB isVisible true Connector1 isVisible true Connector1 isReachable true Connector2 isVisible true Connector2 isReachable true</i> | Установка разъемов 1 и 2 |
| t_3 |  | <i>Connector3 isVisible false Connector3 isReachable false</i> | Ожидание |
| t_4 |  | <i>Human isVisible false Connector3 isVisible true Connector3 isReachable true</i> | Ожидание |
| t_5 |  | <i>Connector3 isVisible true Connector3 isReachable true Human isVisible true Human isWorking false</i> | Установка разъема 3 |
| t_6 |  | <i>Human isVisible false PCB isVisible false Stand isVisible false</i> | Конец работы |

платы видна и доступна на рабочем столе, человек виден и держит печатную плату, после чего вызывается планировщик задач для выполнения задачи по установке подставки. В момент времени t_2 печатная плата и разъемы 1 и 2 видны и доступны, робот выполняет установку разъемов 1 и 2. В момент времени t_3 разъем 3 не виден и недоступен, робот переходит в режим ожидания. В момент времени t_4 разъем 3 виден и доступен, но человек не виден, робот снова переходит в режим ожидания. В момент времени t_5 разъем 3 виден и доступен, человек виден, но не работает, робот выполняет установку разъема 3. В момент времени t_6 человек, печатная плата и подставка не видны, что указывает на то, что собранная печатная плата была передана на конвейер, цель считается достигнутой, робот завершает работу.

Заключение

В рамках данного исследования была разработана и протестирована система управления колаборативной роботизированной производственной ячейкой, предназначенной для сборки выводных компонентов печатных плат в отверстия.

На основании результатов данного исследования сделаны следующие выводы:

- метод динамического распределения задач с использованием онтологической базы знаний повысил адаптивность колаборативной производственной ячейки к изменяющимся условиям;
- система технического зрения в ходе тестов корректно распознавала целевые объекты, что обеспечило выполнение функцией управления задач восприятия окружающей среды;
- эксперименты и тестирования, проведённые в симуляционной среде CoppeliaSim, подтвердили эффективность предложенных методов и технологий.

В дальнейшем предполагается разработка системы управления для колаборативных производственных ячеек, которые смогут применяться в большем количестве промышленных производственных сценариев.

Исследование выполнено на базе МГТУ «СТАНКИН» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (проект № FSFS-2024-0012).

The study was carried out at MSUT “STANKIN” with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment (project No. FSFS-2024-0012).

Библиографический список

1. *Shereuzhev M.A., Serebrenny V.V. Industrial collaborative multi-agent systems: Main challenge // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2020. – Vol. 154. – P. 423–429.*
2. *Филатов С.Е. Разработка модели и метода подготовки управляющей программы станка для монтажа печатных узлов с широкой номенклатурой отечественной элементной базы // Вестник МГТУ «Станкин». – 2021. – № 2 (57). – С. 25–30. – EDN: XCDONP.*
3. *Serebrenny V.V., Lapin D., Mokaeva A.A. The concept of an aircraft hull structures assembly process robotization // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2171. – P. 170007.*
4. *Guo D. Fast scheduling of human-robot team’s collaboration on synchronized production-logistics tasks in aircraft assembly // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2024. – Vol. 85. – P. 102620.*
5. *Wu X., Gao Z., Yuan S., Hu Q., Dang Z. A dynamic task allocation algorithm for heterogeneous UUV swarms // Sensors, 2022. – Vol. 22. – No. 6. – P. 2122.*
6. *Goarin M., Loianno, G. Graph Neural Network for Decentralized Multi-Robot Goal Assignment // EEE Robotics and Automation Letters, 2024. – Vol. 9, no. 5. – P. 4051–4058.*
7. *Галин Р.Р., Широкий А.А., Магид Е.А., Мещеряков Р.В., Мамченко М.В. Эффективное функционирование смешанной неоднородной команды в колаборативной робототехнической системе // Информатика и автоматизация. – 2021. – Vol. 20. – № 6. – С. 1224–1253.*
8. *Шереметев М. А., Девяткин Ф.В., Арабаджиев Д.И. Моделирование группового управления сельскохозяйственными роботами с использованием конечных автоматов и онтологий // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2023. – Т. 6. – № 116. – С. 247–263.*
9. *Го У, Серебренный В.В., Шереметев М.А., Шэнь С., Чжан С. Распознавание и отслеживание механических инструментов в колаборативной робототехнической ячейке с применением механизма внимания // Вестник МГТУ «Станкин». – 2023. – № 4 (67). – С. 8–18. – DOI: 10.47617/2072-3172_2023_4_8. – EDN: SSEOGS.*
10. *Baltrusaitis T., Robinson P., Morency L.P. Openface: an open-source facial behavior analysis toolkit // IEEE winter conference on applications of computer vision. – 2016. – P. 1–10.*

References

- Shereuzhev M.A., Serebrenny V.V. Industrial collaborative multi-agent systems: Main challenge, *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2020, vol. 154, pp. 423 – 429.
- Filatov S.E. Development of a model and method for preparing a control program for a machine for assembling printed circuit boards with a wide range of domestic element base. *Vestnik MSUT "Stankin"*. 2021. No. 2 (57). P. 25–30. EDN: XCDONP.
- Serebrenny V.V., Lapin D., Mokaeva A.A. The concept of an aircraft hull structures assembly process robotization, *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2171, pp. 170007.
- Guo D. Fast scheduling of human-robot team's collaboration on synchronized production-logistics tasks in aircraft assembly. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2024, vol. 85, pp. 102620.
- Wu X., Gao Z., Yuan S., Hu Q., Dang Z. A dynamic task allocation algorithm for heterogeneous UUV swarms. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 6, pp. 2122.
- Goarin M., Loianno, G. Graph Neural Network for Decentralized Multi-Robot Goal Assignment. *IEEE Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2024, vol. 9, no. 5, pp. 4051–4058.
- Galin R.R., Shirokiy A.A., Magid E.A., Meshcheryakov R.V., Mamchenko M.V. Effective functioning of a mixed heterogeneous team in a collaborative robotic system. *Computer Science and Automation*, 2021, vol. 20, no. 6, pp. 1224–1253.
- Shereuzhev M.A., Devyatkin F.V., Arabadzhiev D.I. Modeling group control of agricultural robots using finite automata and ontologies. *Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2023. Vol. 6, No. 116. P. 247–263.
- Guo Wu, Serebrenyi V.V., Shereuzhev M.A., Shen X., Zhang X. Recognition and tracking of mechanical tools in a collaborative robotic cell using the attention mechanism. *Vestnik MSUT "Stankin"*, 2023. No. 4 (67). P. 8–18. DOI: 10.47617/2072-3172_2023_4_8. EDN: SSEOGS.
- Baltrusaitis T., Robinson P., Morency L.P. Openface: an open-source facial behavior analysis toolkit. *IEEE winter conference on applications of computer vision*, 2016, pp. 1-10.

Информация об авторах

Шеруजев Мадин Артурович – кандидат технических наук, младший научный сотрудник Центра когнитивных технологий и машинного зрения, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
m.shereuzhev@stankin.ru

У Го – аспирант кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана
ug@student.bmstu.ru

Серебренный Владимир Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана
vsereb@bmstu.ru

Information about the authors

Shereuzhev Madin Arturovich – cand. Sc. of Engineering, research assistant at the center of “Cognitive Technologies and Machine Vision”, MSUT “STANKIN”
m.shereuzhev@stankin.ru

Wu Guo – postgraduate student at the department of “Robotic Systems and Mechatronics”, Bauman Moscow State Technical University
ug@student.bmstu.ru

Serebrenny Vladimir Valerievich – cand. Sc. of Engineering, docent, Head of the department of “Robotic Systems and Mechatronics”, Bauman Moscow State Technical University
vsereb@bmstu.ru

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации и заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors made equivalent contributions to the publication and declare no conflict of interest.