

Взаимодействие человека и работа в коллаборативных робототехнических системах

Р.Р. Галин¹ ✉, В.В. Серебряный², Г.К. Тевяшов¹, А.А. Широкий¹

¹ Лаборатория киберфизических систем, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук
ул. Профсоюзная 65, г. Москва 117997, Российская Федерация

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
ул. 2-я Бауманская 5, стр. 1, г. Москва 105005, Российская Федерация

✉ e-mail: grr@ipu.ru

Резюме

Цель исследования заключается в поиске разрешимых постановок задач повышения эффективности коллаборативного взаимодействия людей и роботов в эргатических робототехнических системах, или, по-другому, в коллаборативных робототехнических системах.

Методы. Для достижения поставленной цели проведён комплексный анализ работ, опубликованных в высорейтинговых рецензируемых научных изданиях с открытым доступом. В § 1 приведены основные термины и понятия коллаборативной робототехники и обсуждается их текущее понимание в исследовательском сообществе. Описана структура рабочих пространств в зоне взаимодействия человека и робота, перечислены критерии отнесения робота к классу коллаборативных. В § 2 описаны критерии безопасного взаимодействия человека и робота в едином рабочем пространстве. В § 3 обсуждаются различные основания классификаций взаимодействий человека и робота в коллаборативных РТС.

Результаты. Значительная часть опубликованных работ по коллаборативной робототехнике посвящена организации безопасного взаимодействия человека и робота, а вопросам повышения эффективности такого взаимодействия пока уделяется значительно меньше внимания. Весьма актуальной задачей в проблеме повышения эффективности коллаборативных робототехнических систем является идентификация задач, аналогичные которым уже решались в других предметных областях – в частности, в области управления организационными системами. В § 4 обоснована возможность использования термина «команда» для коллаборативных роботов в коллаборативной РТС. В § 5 предложена формальная постановка задачи оптимального распределения работ в команде коллаборативных роботов, аналогичная задаче формирования неоднородной команды в теории управления организационными системами.

Заключение. Предложенная постановка задачи оптимального распределения работ в команде коллаборативных роботов показывает возможность использования для управления коллаборативными робототехническими системами с целью повышения эффективности взаимодействия людей и роботов результатов, полученных в рамках группы математических моделей формирования и функционирования команд. Представляется перспективным продолжить поиск в направлении адаптации моделей и механизмов управления теории управления организационными системами и методологии комплексной деятельности.

Ключевые слова: коллаборативный робот; робототехническая система; интеллектуальный агент; распределение функций; эффективность; безопасное взаимодействие; взаимодействие человека и робота.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование. Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 19-01-00767.

Для цитирования: Взаимодействие человека и робота в коллаборативных робототехнических системах / Р.Р. Галин, В.В. Серебрянный, Г.К. Тевяшов, А.А. Широкий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 180-199. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-180-199>.

Поступила в редакцию 19.10.2020

Подписана в печать 25.11.2020

Опубликована 30.12.2020

Human-robot Interaction in Collaborative Robotic Systems

Rinat R. Galin ¹ ✉, Vladimir V. Serebrennyj ², Gleb K. Tevyashov ¹,
Alexander A. Shiroky ¹

¹ V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences
65 Profsoyuznaya st., Moscow 117997, Russian Federation

² Bauman Moscow State Technical University
5/1 2nd Baumanskaya st., Moscow 105005, Russian Federation

✉ e-mail: grr@ipu.ru

Abstract

Purpose or research is to find solvable tasks for increasing the effectiveness of collaborative interaction between people and robots in ergatic robotic systems, or, in other words, in collaborative robotic systems.

Methods. A comprehensive analysis of works published in highly rated peer-reviewed open-access scientific publications was carried out to achieve this goal. Main terms and concepts of collaborative robotics are described in § 1 and their current understanding in the research community is also described. The structure of workspaces in interaction zone of a person and robot is described. The criteria for assigning robot to the class of collaborative ones are also described. The criteria for safe interaction of a person and robot in a single workspace is described in § 2. Various grounds for classifying human-robot interactions in collaborative RTAs are described in § 3.

Results. A significant part of published works about collaborative robotics is devoted to the organization of safe man and robot interaction. Less attention is paid to the effectiveness improvement of such interaction. An up-to-date task in the problem of efficiency improvement of collaborative robotic systems is the identification of tasks that have already been solved in other areas - in particular, in the field of organizational systems management. The possibility of using the term "team" for collaborative robots in a collaborative PTC is stated in § 4. A formal problem setting of optimal distribution in teamwork of collaborative robots, similar to the problem of heterogeneous team formation in the theory of organizational systems management is proposed in § 5.

Conclusions. Proposed task setting of optimal distribution of works in collaborative robots' team shows possibility of using results obtained in group of mathematical models of commands formation and functioning for control of collaborative robotic systems in order to increase efficiency of people and robots interaction. It is prospectively to continue the search for adapting models and governance mechanisms to the theory of organizational system management and integrated activities methodology.

Keywords: collaborative robot; robotic system; intelligent agent; distribution of functions; efficiency; safe interaction; human-robot interaction.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The work was carried out with the partial support of RFFI, grant No. 19-01-00767.

For citation: Galin R. R., Serebrennyj V. V., Tevyashov G. K., Shiroky A. A. Human-robot Interaction in Collaborative Robotic Systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 180-199 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-180-199>.

Received 19.10.2020

Accepted 25.11.2020

Published 30.12.2020

Введение

Роботизация подразумевает освобождение человека от выполнения тяжелого и опасного труда, что приводит к повышению производительности процесса производства и снижения происшествий на промышленных объектах. Однако в связи с бурным развитием киберфизических систем и технологий к настоящему времени фокус внедрения роботов сместился от специальных производственных роботов к коллаборативным и социальным. Это значит, что уже сейчас приходится говорить не столько о роботизации производства, сколько о широком внедрении роботов во все сферы жизни и деятельности человека.

Традиционно среди всего разнообразия различных роботов принято выделять три основных класса — промышленных, коллаборативных и сервисных роботов. Некоторые исследователи включают класс коллаборативных роботов в класс промышленных роботов (как частный случай), что не является правильным ни с точки зрения классификации, ни с точки зрения их назначения. Кроме того, в настоящее время активное развитие получили так называемые социальные роботы — роботы (чаще антропоморфного или зооморфного типа), ориентированные на

социальное взаимодействие с человеком, которые имеют функции и черты, присущие как сервисным, так и коллаборативным роботам.

Несмотря на бурную роботизацию в рамках так называемой Индустрии 4.0 (4 промышленной революции), существует ряд видов деятельности, где полное замещение человеческого труда пока невозможно, но частичная его роботизация способна ускорить производственно-технологический процесс [1]. В связи с этим появилось и широко распространилось понятие взаимодействия человека и робота (human-robot interaction, HRI) или, как частный случай, коллаборативное взаимодействие (human-robot collaboration, HRC) — процесс совместной целенаправленной и безопасной деятельности человека и робота. Соответственно, роботы, используемые для этих целей, называются коллаборативными роботами или коботами.

В настоящей работе кратко описано текущее состояние коллаборативной робототехники и предлагается подход для решения задач повышения эффективности коллаборативных робототехнических систем (РТС). Этот аспект пока мало затрагивается исследовательским сообществом — основная масса работ посвящена организации и управлению безопасностью коллаборативных РТС.

Структура изложения материала в работе следующая. § 1 посвящён понятию «коллаборативный робот». Обсуждаются его трактовки в литературе, а также ключевые отличия от других классов робототехнических систем. В § 2 описаны критерии безопасного взаимодействия человека и робота в едином рабочем пространстве. В § 3 обсуждаются различные основания классификаций взаимодействий человека и робота в коллаборативных РТС. В § 4 обоснована возможность использования термина «команда» для коботов в коллаборативной РТС. В § 5 предложена формальная постановка задачи формирования неоднородной команды коботов, сводящаяся к решению задачи оптимизации.

Предложенная формальная постановка задачи открывает возможность использовать существующие методы решения задач оптимизации для повышения эффективности коллаборативных РТС.

Материалы и методы

1. Коллаборативные роботы и их отличительные особенности

Понятие «коллаборативное взаимодействие» обозначает процесс безопасного производственного сотрудничества человека и робота, а класс роботов, работающий таким образом – коллаборативными роботами (или коботами) [2, 3]. Термин «коллаборативный робот» претерпел ряд изменений за счет значи-

тельного прогресса в области робототехники. Первоначально термин «коллаборативный робот» использовался для обозначения промышленного манипулятора, и компания General Motors первая использовала его в рамках исследовательского проекта, в котором он означал «робота, работающего с человеком рука об руку» [4].

В зоне взаимодействия кобота и человека выделяют четыре вложенных пространства [5]:

- 1) максимальное — полный объем пространства с учётом объема деталей, который максимально может быть использован коботом;
- 2) запретное — часть максимального пространства, доступ к которому для человека ограничен при работе робота;
- 3) пространство операций — часть запретного пространства, которую кобот использует для совершения действий;
- 4) коллаборативное пространство — часть пространства операций, предназначенное для безопасного совместной деятельности человека и робота.

На сегодняшний день вектор развития области коллаборативных роботов направлен на управление множеством гетерогенных коботов в коллаборативном пространстве. Вследствие этого, к коботу – интеллектуальному агенту предъявляются требования активности, гибкой автономности, сетевой самоорганизации, прогнозирования запросов

пользователя, надёжности и некоторые другие [6].

При выполнении работ по проектированию коллаборативных РТС применяются следующие принципы (принципы HRC):

1. Операции, выполняемые коботом, должны быть безопасны по отношению к другим агентам при действии в совместном пространстве, и в первую очередь к человеку-оператору, а также к объектам внешней среды [7].

2. Робот должен приспосабливаться к человеку, а не наоборот (т. е., если коллаборативная система функционирует недостаточно эффективно, то необходимо дорабатывать именно робота, а не искать замену человеку-оператору).

3. Должны создаваться такие условия, в которых любой человек-оператор в рабочем пространстве мог бы максимально использовать возможности кобота.

4. При проектировании системы следует добиваться повышения производительности труда и снижения количества ошибок [8].

Из перечисленных принципов следуют ключевые отличия коботов от других классов робототехнических систем. Так, сервисные роботы, в отличие от коботов, не обязаны уметь работать с людьми в одном пространстве, так как могут функционировать автономно или под дистанционным управлением [9].

Промышленные роботы используются в производстве, но их эксплуата-

ция не подразумевает совместную работу с человеком. Они, по существу, являются автоматически управляемыми, перепрограммируемыми универсальными манипуляторами [10]. В то же время, коллаборативный робот предполагает обязательную интерактивную совместную работу с человеком, а сфера его применения значительно шире. Но, в отличие от промышленных роботов, коботы менее точны и более подвержены ошибкам, их движения медленнее из-за требований безопасности HRC, а их рабочее пространство меньше (табл. 1) [11].

Таким образом, для реализации принципов HRC, робот в человеко-машинном сотрудничестве должен быть безопасным, удобным в использовании, адаптивным и легко программируемым. Безопасность означает защиту людей от возможных травм при контакте с роботами во время совместной работы. Под удобством здесь понимается то, что действия робота должны соответствовать когнитивным привычкам людей, и люди смогут распознавать намерения робота. Адаптивность означает возможность робота понимать потребности людей и точно подстраиваться к движению людей и различным задачам. Простота программирования означает, что людям должно быть легко программировать, изучать методы работы и легко управлять роботом [3].

Таблица 1. Качественное сравнение коботов и промышленных роботов [11, 12]**Table 1.** Qualitative comparison of cobots and industrial robots [11, 12]

Характеристики / Specifications	Промышленные роботы / Industrial robots	Коботы / Cobots
Тип установки (обычно)	Фиксированный	Мобильный
Тип выполняемых задач	Только повторяемый	Повторяемый и неповторяющийся
Изменения задач	Редко	Часто
Взаимодействие с работником	Только во время программирования	Часто и безопасно
Выгода при мелкосерийном и односерийном производстве	Нет	Да
Доступные габаритные размеры	Маленькие или большие	Только маленькие
Скорость работы	От медленной до высокой	Медленная (ограничена в соответствии со стандартами безопасности)
Цена	Ниже	Выше
Точность работы	Ниже	Выше
Грузоподъемность	Выше	Ниже
Программируемость	Более сложная и трудоемкая	Проще и быстрее
Обслуживание (время и стоимость)	Больше	Меньше
Вес робота	Больше	Меньше
Датчики безопасности и внешних сил	Обычно отсутствует	Входит
Доступное рабочее пространство	Больше	Меньше

2. Безопасное взаимодействие человека и робота в едином рабочем пространстве

Безопасность людей-операторов в коллаборативных РТС в настоящее время рассматривается в трёх аспектах [13]:

– безопасность при столкновении должна быть обеспечена таким образом, чтобы столкновения между роботами, людьми и препятствиями были «безопасными», то есть контролируемыми. Главной целью тут является ограниче-

ние сил/воздействий, оказываемых на людей.

– активная безопасность для временного обнаружения неизбежных столкновений между людьми и оборудованием и контролируемого прекращения эксплуатации. Для этого могут быть использованы датчики приближения, системы наблюдения и датчики силы/контакта.

– адаптивная безопасность для вмешательства в работу аппаратного оборудования и применения корректирующих действий, приводящих к предотвращению столкновений без остановки работы устройства.

Обеспечение безопасности регулируется национальными и международными стандартами [13, 14]. Поскольку коллаборативное пространство (или, иначе, ячейка) включает в себя не только человека и робота, но и другие вспомогательные устройства (например, электрические отвертки, электрические зажимные устройства и т. д.), каждая ячейка содержит уникальные риски, которые необходимо снижать.

Коллаборативные роботы имеют дополнительные функции^{1,2} [14–15] (см. также рис. 1), которые регламентиру-

ются в стандартах робототехнических решений, в том числе и специально для вопросов безопасности:

«Безопасная контролируемая остановка» – робот останавливается, когда человек-оператор входит в совместное рабочее пространство, и продолжает работу, когда рабочее пространство свободно (позволяет оператору напрямую взаимодействовать с роботизированной системой при определенных обстоятельствах);

«Ручное управление» — движения робота контролируются человеком-оператором (оператор использует ручное устройство для передачи команд движения);

«Контроль скорости и разделения» – оператор и роботизированная система могут одновременно перемещаться в совместном рабочем пространстве;

«Ограничение мощности и силы» – контактные силы между человеком-оператором и движущимся роботом технически ограничены безопасным уровнем (физический контакт между системой робота и человеком-оператором может происходить как намеренно, так и непреднамеренно).

Анализ работы [16] позволяет выделить две группы методов, обеспечивающих требуемый уровень безопасности во всех обозначенных выше аспектах. Во-первых, это методы управления в технических системах, к которым отнесены следующие [16]:

Управление движением – до контакта с человеком и после. Прекол-

¹ ISO/TC 299 Robotics – “ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices – Collaborative robots”. Homepage: <https://www.iso.org/standard/62996.html>, last accessed 2020/10/20.

² ISO 10218-1, 2:2011 “Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 1, 2: Robot systems and integration”, Geneva. 2011.

лизионные методы заключаются в ограничении основных параметров робота (скорость, энергия, и т. п.) или в предотвращении столкновений с помощью ме-

тодов, включающих определение зон безопасности, отслеживание расстояния разделения и направление движения робота в сторону от людей.

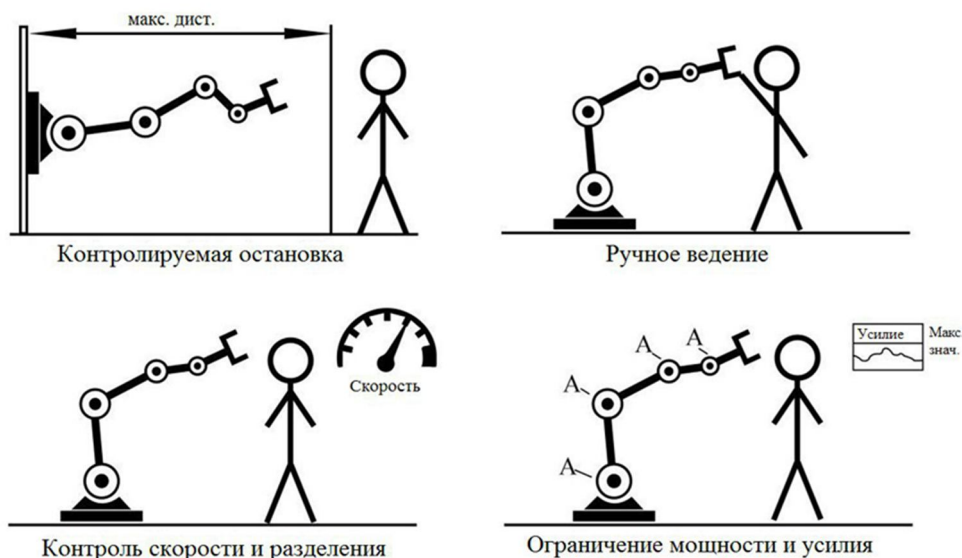


Рис. 1. Дополнительные функции коллаборативных роботов, направленные на обеспечение безопасности человека-оператора

Fig 1. Additional functions of collaborative robots aimed at ensuring the safety of the human operator

Пост-коллизийные методы включают в себя различные способы минимизации травм путем переключения между различными методами управления при обнаружении столкновения. Кроме того, для эффективного сотрудничества различают намеренный и ненамеренный контакт и допускают безопасный физический контакт.

Планирование движения. Цель — планирование безопасных траекторий движения робота для избегания потенциальных столкновений. Для этого учитываются различные параметры, связанные с человеком (расстояние между роботом и человеком, направление взгляда при формировании планов движения и др.).

Предсказание движений человека.

Такой прогноз включает в себя возможные действия и движения человека и строится с помощью различных методов, включая сопоставление последовательностей, вероятностное распознавание плана и анализ характеристик движения. Необходимо учитывать предсказуемость робота, поскольку при много-агентном взаимодействии роль робота так же важна, как роль оператора.

Во-вторых, это методы организационного управления. В [16] предлагается проводить анализ психологических характеристик операторов с помощью физиологического зондирования, вопросников и поведенческих показателей, идентификации. Авторы отмечают, что

важно понимать психофизиологическое состояние человека во время взаимодействия с роботом, которое могло бы предотвратить возможный вред. Например, такие факторы, как боязнь работы с роботом, усталость, плохой опыт взаимодействия и другие.

3. Взаимодействие человека и робота

Концептуально, взаимодействие человека и робота и рабочий процесс в коллаборативно РТС можно разбить на следующие классы [17, 18]:

- сосуществование;
- кооперация;
- коллаборация.

При этом класс взаимодействий определяется четырьмя атрибутами [17, 18]:

- рабочее время;
- рабочее пространство;
- общая цель;
- физический контакт.

Соотношение классов и атрибутов взаимодействия показано на рис. 2.

В представленной концепции классификации взаимодействий рабочее время определяется как время, в течение которого человек и робот взаимодействуют в рабочем пространстве. Если существует общее время в одном рабочем пространстве, то данное взаимодействие представляет собой сосуществование человека и робота.

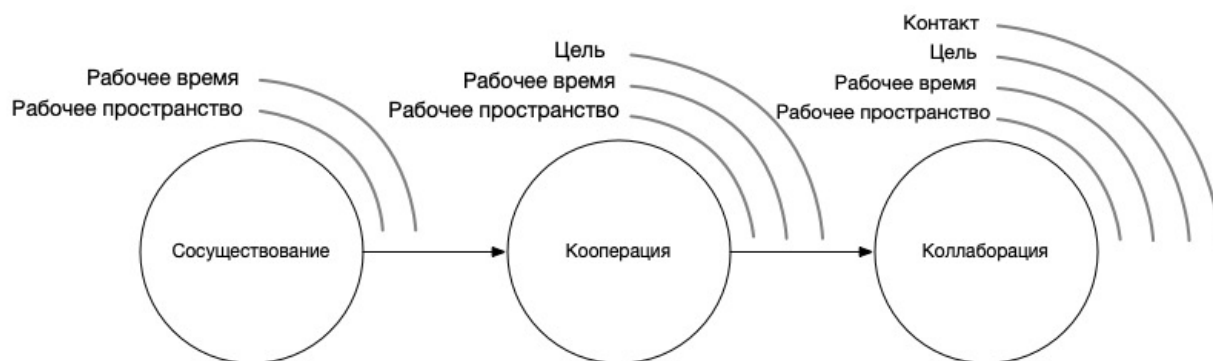


Рис. 2. Классификация взаимодействия человека и робота

Fig. 1. Human-robot interaction classification

При условии единой цели взаимодействия, человек и робот могут иметь различные задачи (сотрудничество), а если происходит прямой контакт (например, тактильный или слуховой), то взаимодействие может быть обозначено как коллаборация человека и робота.

Другие основания классификаций взаимодействий человека и робота представлены в табл. 2 [19].

В работе [24] предложено дополнительное основание классификации взаимодействий — автономность участников коллаборативной РТС. Выстроенные отношения лидер — последователь выражают, насколько действия робота непосредственно определяются со стороны человека-оператора, или какой участник берет на себя ведущую роль в данной задаче.

Таблица 2. Основания классификации взаимодействий человека и робота**Table 2.** Grounds for classifying human-robot interactions

Категория / Category	Описание / Description
По типу задач	В зависимости от поставленной задачи, проектируется и используется система. Таким образом, задача должна быть идентифицирована как часть классификации системы. Тип задачи позволяет неявно представить среду робота
По уровню критичности задачи	Критичность задачи измеряет важность правильного выполнения задачи с точки зрения ее негативных последствий в случае возникновения проблем. Ошибки в работе коллаборативного робота могут привести к летальному исходу при взаимодействии человека и робота. Поэтому, критичность задачи определяется мерой субъективной в рамках коллаборативной робототехники
Морфология робота	Внешний вид роботов может быть различен, в зависимости от задачи, для которой робот был создан или среды его применения. Форма и структура робота способствуют установке социальных ожиданий
Отношение людей к роботу	Отношение людей к роботам напрямую влияет на взаимодействие человека и робота в системе. Эта классификация таксономии не измеряет взаимодействие между операторами и роботами, просто отражает число каждого из них и представляется в нередуцированном дробном выражении
По составу команды	Состав может иметь значения однородные или разнородные. Гетерогенность может быть дополнительно уточнена с помощью списка, содержащего типы роботов в команде и количество каждого типа роботов, используемых в команде
По уровню совместного взаимодействия между командами	В зависимости от состава команды возможны различные сценарии взаимодействия
Роль взаимодействия	Согласно [20], распределение ролей со стороны человека при взаимодействии с роботом может быть на следующих позициях: супервайзер, оператор, член команды, программист и наблюдатель
По типу физической близости человека и робота	Согласно [21], рассматривают пять типов физической близости человека и робота при взаимодействии: избегание, прохождение, следование, приближение и прикосновение
Принятие решений	При проектировании интерфейса для взаимодействия человека и робота важным значением является информация о наличии типов датчиков на роботе и обработки информации, получаемой с датчиков

Категория / Category	Описание / Description
Пространство и время	Пространственно-временная таксономия [22] делит взаимодействие человека и робота на четыре категории в зависимости от того, используют ли люди и роботы вычислительные системы одновременно (синхронно) или в разное время (асинхронно) и находясь в одном и том же месте (совместно) или в разных местах (несогласованно)
Уровень автономности или степень вмешательства	Автономность или степень вмешательства при взаимодействии человека и робота может быть измерена тем, насколько человек может пренебречь системой [23]

Разделение по автономии или инициативе может варьироваться в зависимости от области применения. По типу

активности в коллаборативной РТС можно выделить классы, представленные на рис. 3.

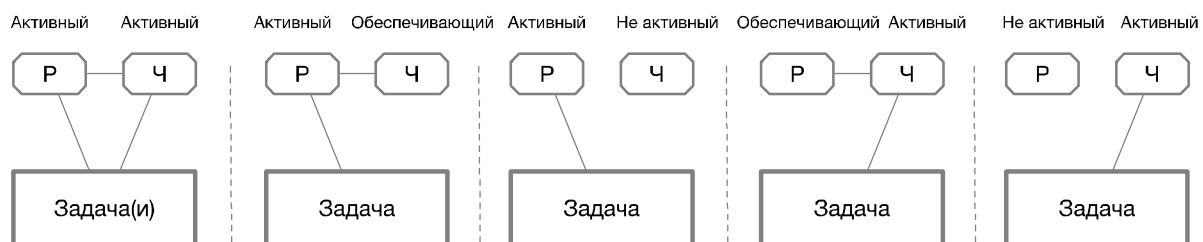


Рис. 3. Классы взаимодействия человека и робота по инициативности

Fig. 3. Classes of human-robot interaction by initiative

Следует понимать, что распределение ролей назначается до выполнения задач. В некоторых случаях могут рассматриваться адаптивные агенты, отвечающие за назначение активных или обеспечивающих участников системы.

Результат и их обсуждение

4. Многоагентные коллаборативные РТС и команды роботов

При взаимодействии участников в коллаборативной РТС необходимо учитывать два аспекта. Первый аспект – общность цели участников, второй –

автономность и согласованность действий участников в различных ситуациях при достижении цели.

Многоагентные системы представляют собой некоторое множество интеллектуальных агентов, взаимодействующих друг с другом, учитывая взаимное влияние со стороны внешней среды [25, 26]. В коллаборативных РТС в качестве интеллектуальных агентов выступают коботы. Ключевыми свойствами таких агентов являются целенаправленность и автономность, связанная с действиями на основе целена-

правленных проблемно-ориентированных рассуждений. Более подробно понятие интеллектуального агента раскрыто в работах [6, 27–29].

С другой стороны, множество коботов в коллаборативной РТС обладает характеристиками, свойственными понятию «команда» [30]:

- единство цели;
- совместная деятельность;
- непротиворечивость интересов;
- автономность деятельности;
- специализация и взаимодополняемость ролей.

Согласно [30–32], следует рассматривать два периода жизненного цикла команды — этап ее формирования и этап функционирования. По отношению к рассматриваемому классу коллаборативных РТС этап формирования разделен на определение состава участников команды и ее адаптацию в соответствии с решаемой задачей. Этап функционирования рассматривается в рамках коллаборативного пространства, стационарного функционирования.

Отметим, что большинство исследований в области коллаборативной робототехники сосредоточены на изучении последнего этапа. В то же время, на практике часто возникают задачи, относящиеся к этапу формирования команды. Всё более распространённым является формат производства, при котором требуется производить большое количество маленьких партий (или даже уникальных) изделий. Для таких производств организация коллаборативных

РТС является хорошей возможностью оптимизировать затраты и повысить качество продукции. Можно с уверенностью утверждать, что в дальнейшем таких производств будет всё больше, а специфические для них задачи — всё более актуальными [33 – 35].

Ниже предложена общая постановка задачи формирования неоднородной команды коботов для выполнения заданного объёма работ различных видов (по аналогии с [31]).

5. Формирование неоднородной команды в коллаборативной РТС

Рассмотрим коллаборативную РТС, для успешного функционирования которой необходимо выполнять q различных функций (видов работ) из множества $U = \{u_k\}_{k=1}^q$. Для простоты будем предполагать, что в системе присутствует q человек-операторов, причём k -й оператор компетентен в выполнении функции $u_k \in U, k \in [1, q]$.

Для повышения эффективности операторов будем назначать им коллаборативных роботов из множества $B = \{b_i\}_{i=1}^m$. Считаем, что коботы могут выполнять любые функции, но с разной эффективностью (в том числе, возможно, нулевой). Обозначим $0 \leq r_{ik} \leq 1$ эффективность выполнения i -м коботом k -го вида работ. При этом один кобот может вначале «помогать» одному человеку-оператору, а потом — другому. Иными словами, назначенных к выполнению видов работ для каждого кобота в общем случае может быть больше одного.

Матрица $r = \|r_{ik}\|$ характеризует потенциальные возможности команды коботов по выполнению заданного набора функций / видов работ. При этом для каждого из них можно (по аналогии с [31]) ввести характеристики универсальности

$$s_i = \sum_{k=1}^q I(i, k), i \in [1, m], I(i, k) = \begin{cases} 0, & \text{если } r_{ik} = 0 \\ 1, & \text{если } r_{ik} > 0 \end{cases} \quad (1)$$

– средней эффективности

$$\bar{r}_i = \frac{1}{q} \sum_{k=1}^q r_{ik}, i \in [1, m], \quad (2)$$

– специализированности

$$d_i = \sqrt{\frac{1}{q-1} \sum_{k=1}^q (\bar{r}_i - r_{ik})^2}, i \in [1, m]. \quad (3)$$

Для команды в целом можно посчитать характеристики средней эффективности выполнения каждого вида работ

$$R_k = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r_{ik}, k \in [1, q], \quad (4)$$

а также неоднородности

$$D = \frac{1}{2mq(m-1)} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^q |r_{ik} - r_{jk}|. \quad (5)$$

Предположим, что требуемые к выполнению объемы работ заданы вектором $V = (V^1, \dots, V^q)$, $V^k \geq 0, k \in [1, q]$. Будем считать, что выполнение коботами тех или иных объемов работ приводит к появлению некоторых затрат, зависящих от объемов назначенных работ каждого вида и соответствующего значения эффективности данного кобота (содержательно их можно интерпретировать, например, как время выполне-

ния). Пусть эти зависимости описаны неотрицательными, монотонно возрастающими по первому аргументу и монотонно убывающими — по второму, функциями $c_i(x_i, r_i)$, где x_i — назначенный объем работ некоторого вида, а r_i — соответствующее данному виду работ значение эффективности i -го кобота. При этом установим, что $c_i(0, \cdot) = 0$.

Если выполнены условия

– любой кобот может выполнить любой неотрицательный объем работ каждого вида;

– функции затрат аддитивны по различным видам работ,

– то можно поставить задачу оптимального в смысле минимизации затрат коллаборативной РТС распределения работ между коботами:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^q c_i(x_{ik}, r_{ik}) \rightarrow \min_{\{x_{ik} \geq 0\}}, \\ \sum_{i=1}^m x_{ik} = V^k, k \in [1, q]. \end{cases} \quad (6)$$

Данная задача рассматривалась в [31] для случая человеческих команд с функциями затрат вида обобщённых производственных функций Кобба-Дугласа:

$$c_i(x_i, r_i) = \sum_{k=1}^q r_{ik} \varphi\left(\frac{x_{ik}}{r_{ik}}\right), i \in [1, m], \quad (7)$$

где $\varphi(\cdot)$ — возрастающая выпуклая гладкая функция, $\varphi(0) = 0$. На рис. 4 показано сравнение функций затрат со значениями эффективности 0,7 и 1.

В то же время, специфика коллаборативных команд требует рассмотрения постановок с учётом дополнительных факторов и ограничений, в том числе несвойственных человеческим командам.

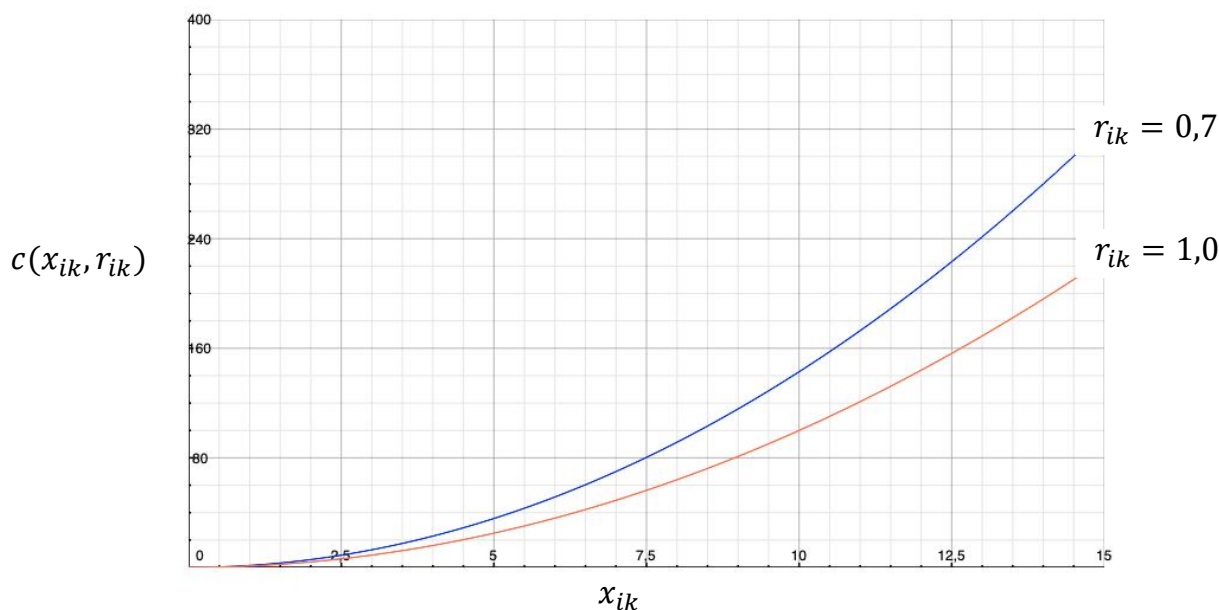


Рис. 4. Сравнение функций затрат вида (7) с $\varphi\left(\frac{x_{ik}}{r_{ik}}\right) = \left(\frac{x_{ik}}{r_{ik}}\right)^2$ на выполнение i -м коботом двух видов работ

Fig. 4. Comparison of cost functions (7) and $\varphi\left(\frac{x_{ik}}{r_{ik}}\right) = \left(\frac{x_{ik}}{r_{ik}}\right)^2$ to perform two types of work by i -th cobot

Перечислим некоторые из них:

- зависимость затрат коботов от числа роботов, назначенных на выполнение одного и того же объема работ;
- зависимость эффективности кобота от того, с каким человеком-оператором он взаимодействует;
- неаддитивность затрат по видам работ (например, появление дополнительных затрат при переходе от одного вида к другому).

Отметим, что предложенная выше общая постановка может быть модифицирована для учёта всех перечисленных факторов и ограничений. Решать такие задачи можно, применяя методы теории оптимизации.

Выводы

Значительная часть опубликованных работ по коллаборативной робото-

технике посвящена организации безопасного взаимодействия человека и робота. В то же время, вопросам повышения эффективности такого взаимодействия уделяется значительно меньше внимания. В настоящей работе предложен подход к повышению эффективности коллаборативных робототехнических систем через управление их составом на основе выполняемых ими функций и объемов работ. Для этого обоснована возможность использования термина «команда» для участников коллаборативной РТС и предложена формальная постановка задачи формирования неоднородной команды в коллаборативной РТС, сводящаяся к решению задачи оптимизации.

Список литературы

1. Galin R., Meshcheryakov R. Review on Human–Robot Interaction During Collaboration in a Shared Workspace. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) Interactive Collaborative Robotics // ICR 2019. Lecture Notes in Computer Science. 2019. Vol 11659. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-26118-4_7.
2. Ермишин К.В., Ющенко А.С. Коллаборативные мобильные роботы – новый этап развития сервисной робототехники // Робототехника и техническая кибернетика. 2016. №3(12). С. 3-9.
3. Galin R., Meshcheryakov R. Collaborative Robots: Development of Robotic Perception System, Safety Issues, and Integration of AI to Imitate Human Behavior. In: Ronzhin A., Shishlakov V. (eds) // Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". Smart Innovation, Systems and Technologies, 2020. Vol 187. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-15-5580-0_14.
4. Robot or cobot: The five key differences. Hannover Messe, 18 October 2016. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.hannovermesse.de/en/news/robot-or-cobot-the-five-key-differences.xhtml>. (Дата обращения 20.10.2020).
5. Mihelj M., et al. (2018). Collaborative Robots. Robotics. P. 173–187. DOI:10.1007/978-3-319-72911-4_12.
6. Sycara K., Pannu A., Williamson M. Distributed Intelligent Agents // IEEE Expert: Intelligent Systems and Their Applications. 1996. Vol. 11. № 6. P. 36–46.
7. Franklin C. S. et al. Collaborative robotics: New era of human–robot cooperation in the workplace // Journal of Safety Research. 2020. Vol. 73. P. 1-8. Elsevier Ltd., Amsterdam, Netherlands.
8. Konz S. Work design: industrial ergonomics. Third Edition. Scottsdale, Arizona: Publishing Horizons, Inc., 1990.
9. Paluch S., Wirtz J., Kunz W.H. Service Robots and the Future of Services. In: Bruhn M., Burmann C., Kirchgeorg M. (eds) Marketing Weiterdenken. Springer Gabler, Wiesbaden. 2020. DOI: 10.1007/978-3-658-31563-4_21.
10. Конюховская А., Цыпленкова В. Рынок робототехники: угрозы и возможности для России. М., 2020.
11. Matúšová M., Bučányová M., Hrušková E. The future of industry with collaborative robots // MATEC Web of Conferences. Vol. 299. P. 1-6. EDP Sciences, Les Ulis, France (2019).
12. Knudsen M., Kaivo-oja J. Collaborative Robots: Frontiers of Current Literature. In: Taşkın, H., Erden, C., Uygun, Ö. (eds.) // Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications. 2020. Vol. 3(2). P. 13-20. Harun Taşkın, Turkey.
13. Michalos G., et al. Design Considerations for Safe Human-robot Collaborative Workplaces // Procedia CIRP. 2015. №37. P. 248–253. DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.014.

14. Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications / V. Villani, F. Pini, F. Leali, C. Secchi // *Mechatronics* 55. 2018. P. 248–266. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2018.02.009.
15. Galin R.R., Meshcheryakov R.V. Human-Robot Interaction Efficiency and Human-Robot Collaboration. In: Kravets A. (eds) *Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms. Studies in Systems, Decision and Control*, 2020. Vol 272. Springer, Cham.
16. Lasota P., Shah J. Analyzing the effects of human-aware motion planning on close-proximity human-robot collaboration // *Human Factors*. 2015. №57(1). P. 21-33.
17. Schmidtler A., et al. Human Centered Assistance Applications for the working environment of the future // *Occupational Ergonomics*. 2015. № 12(3). P. 83-95.
18. Hoffman G. Evaluating Fluency in Human–Robot Collaboration // *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. 2019. P. 1–10. DOI:10.1109/THMS.2019.2904558.
19. Holly A., Yanko Jill, D. Classifying human-robot interaction: an updated taxonomy // *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. 2004. P. 2841-2846.
20. Scholtz J. Theory and Evaluation of Human Robot Interactions.” *Hawaii International Conference on System Science* 36 (HICSS 36). Hawaii, January 2003.
21. Huttenrauch H., Eklundb K. S. Investigating socially interactive robots that give the right cues and make their presence felt // *Proceedings of the CHI 2004 Workshop on Shaping Human-Robot Interaction*, 2004. P 17 - 20.
22. Ellis C. A., Gibbs S. J., Rein G. L. Groupware: some issues and experiences” // *Communications of the ACM*. 1991. № 34(1). P. 39 - 58.
23. Goodrich M. A., Crandall J. W., Stimpson J.L. Neglect tolerant teaming: issues and dilemmas // *Proceedings of the 2003 AAAI Spring Symposium on Human Interaction with Autonomous Systems in Complex Environments*. 2003.
24. Wang X. V., et al. Human–robot collaborative assembly in cyber-physical production: Classification framework and implementation // *CIRP Annals*. 2017. № 66(1). P. 5–8. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.101.
25. Wooldridge, M., Jennings, N. Agent Theories, Architectures and Languages: a Survey // *Intelligent Agents: ECAI-94 Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages* (Amsterdam, The Netherlands, August 8-9, 1994)/ Ed. by M.Wooldridge, N.Jennings. Berlin: Springer Verlag, 1995. P.1-22.
26. Wooldridge M., Jennings N. Intelligent Agents: Theory and Practice // *The Knowledge Engineering Review*. 1995. Vol.10, №2. P.115-152.
27. Тимофеев А.В. Мультиагентное и интеллектуальное управление сложными робототехническими системами // *Теоретические основы и прикладные задачи интеллектуальных информационных технологий*. СПб.: СПИИ РАН, 1999. С. 71-81.
28. Multi-agent Robotic Sys-tems in Collaborative Robotics. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) / S. Vorotnikov, K. Ermishin, A. Nazarova, A. Yuschenko // *Interactive Collaborative Robotics. ICR 2018. Lecture Notes in Computer Science*, 2001. Vol 11097. Springer, Cham.

29. Гайдук А.Р., Каляев И.А., Капустян С.Г. Управление коллективом интеллектуальных объектов на основе стайных принципов // Вестник ЮНЦ РАН. 2005. Т. 1, вып. 2. С. 20-27.
30. Beer M. Organization Change and Development: A System View. London: Scott-Glenview: Foresman & Co, 1980.
31. Новиков Д.А. Математические модели формирования и функционирования команд. М.: Изд-во физико-математической литературы. 2008. 184 с.
32. Бронштейн М. Управление командами для «чайников». М.: Вильямс, 2004.
33. Осипов О.Ю., Мещеряков Р.В., Шепеленко М.Г. Проектирование цифровых моделей элементов электромашинной части электромехатронных модулей робототехнических систем // Экстремальная робототехника. 2017. № 1. С. 160-164.
34. Консон Ю.А., Ронжин А.Л. Оптимизация производства для современной работы робота и человека. // Современные информационные технологии. Теория и практика. Чита: ЧГУ, 2017. С. 23-29.
35. Городецкий В.И. Теория, модели, инфраструктуры и языки спецификации командного поведения автономных агентов. Обзор (Часть 2) // Искусственный интеллект и принятие решений. 2011. №3. С. 34-47.

References

1. Galin R., Meshcheryakov R. Review on Human–Robot Interaction During Collaboration in a Shared Workspace. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) Interactive Collaborative Robotics. *ICR 2019. Lecture Notes in Computer Science*, 2019, vol 11659. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-26118-4_7.
2. Ermishin K., Yuschenko A. Kollaborativnye mobil'nye roboty – novyi etap razvitiya servisnoi robototekhniki [Collaborative mobile robots - a new stage of development of service robotics]. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika = J. Robot. Tech. Cybern*, 2016, no. 3(12), pp. 3–9 (In Russ.).
3. Galin, R. Meshcheryakov R. Collaborative Robots: Development of Robotic Perception System, Safety Issues, and Integration of AI to Imitate Human Behavior. In: Ronzhin A., Shishlakov V. (eds). *Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2020, vol 187. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-15-5580-0_14.
4. Robot or cobot: The five key differences. Hannover Messe, 18 October 2016. [Electronic resource]. Available at: <http://www.hannovermesse.de/en/news/robot-or-cobot-the-five-key-differences.xhtml>. (accessed 20.10.2020).
5. Mihelj M., et al. Collaborative Robots. *Robotics*, 2018, pp. 173–187. DOI:10.1007/978-3-319-72911-4_12.
6. Sycara K., Pannu A., M. Williamson. Distributed Intelligent Agents. *IEEE Expert: Intelligent Systems and Their Applications*, 1996, vol. 11, no 6, pp. 36–46.

7. Franklin C. S. et al. Collaborative robotics: New era of human–robot cooperation in the workplace. *In: Journal of Safety Research*, 2020, vol. 73, pp. 1-8. Elsevier Ltd., Amsterdam, Netherlands.
8. Konz S. Work design: industrial ergonomics. Third Edition. Scottsdale, Arizona: Publishing Horizons, Inc., 1990.
9. Paluch, S., Wirtz, J., Kunz, W.H. (2020) Service Robots and the Future of Services. *In: Bruhn M., Burmann C., Kirchgeorg M. (eds) Marketing Weiterdenken*. Springer Gabler, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-31563-4_21.
10. Konyuhovskaya A., Cyplenkova V. *Rynok robototekhniki: ugrozy i vozmozhnosti dlya Rossii* [The Robotics Market: Threats and Opportunities for Russia]. Moscow, 2020 (In Russ.)
11. Matúšová M., Bučányová M., Hrušková E. The future of industry with collaborative robots. *In: MATEC Web of Conferences*, 2019, vol. 299, pp. 1-6. EDP Sciences, Les Ulis, France.
12. Knudsen, M., Kaivo-oja, J. Collaborative Robots: Frontiers of Current Literature. *In: Taşkın, H., Erden, C., Uygun, Ö. (eds.). Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications*, 2020, vol. 3(2), pp. 13-20. Harun Taşkın, Turkey.
13. Michalos G., et al. Design Considerations for Safe Human-robot Collaborative Workplaces. *Procedia CIRP*, 2015, no. 37, pp. 248–253. DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.014.
14. Villani V., Pini F., Leali F., Secchi C. Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics*, 2018, 55, pp. 248–266. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2018.02.009.
15. Galin R.R., Meshcheryakov R.V. Human-Robot Interaction Efficiency and Human-Robot Collaboration. *In: Kravets A. (eds) Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms*. Studies in Systems, Decision and Control, 2020, vol 272. Springer, Cham.
16. Lasota P., Shah J. Analyzing the effects of human-aware motion planning on close-proximity human-robot collaboration. *Human Factors*, 2015, no. 57(1), pp. 21-33.
17. Schmidtler A., et al. Human Centered Assistance Applications for the working environment of the future. *Occupational Ergonomics*, 2015, no. 12(3), pp. 83-95.
18. Hoffman G. Evaluating Fluency in Human–Robot Collaboration. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2019, 1–10. DOI:10.1109/THMS.2019.2904558.
19. Holly, A. Yanko, Jill D. Classifying human-robot interaction: an updated taxonomy. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2004, pp. 2841-2846.
20. Scholtz J. Theory and Evaluation of Human Robot Interactions.” Hawaii International Conference on System Science 36 (HICSS 36). Hawaii, January 2003.
21. Huttenrauch H., Eklundb K. S. Investigating socially interactive robots that give the right cues and make their presence felt. *Proceedings of the CHI 2004 Workshop on Shaping Human-Robot Interaction*, 2004, pp. 17 - 20.
22. Ellis C. A., Gibbs S. J., Rein G. L. Groupware: some issues and experiences.” *Communications of the ACM*, 1991, no. 34(1), pp. 39 - 58.

23. Goodrich M. A., Crandall J. W., Stimpson J.L. Neglect tolerant teaming: issues and dilemmas." *In Proceedings of the 2003 AAAI Spring Symposium on Human Interaction with Autonomous Systems in Complex Environments*. 2003.
24. Wang X. V., et al. Human–robot collaborative assembly in cyber-physical production: Classification framework and implementation. *CIRP Annals*, 2017, no. 66(1), pp. 5–8. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.101.
25. Wooldridge M., Jennings N. Agent Theories, Architectures and Languages: a Survey. *Intelligent Agents: ECAI-94 Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages* (Amsterdam, The Netherlands, August 8-9, 1994); ed. by M.Wooldridge, N.Jennings. Berlin, Springer Verlag, 1995, pp.1-22.
26. Wooldridge M., Jennings N. Intelligent Agents: Theory and Practice. *The Knowledge Engineering Review*, 1995. vol.10, no.2, pp.115-152.
27. Timofeev A.V. [Multi-agent and intelligent management of complex robotic systems]. *Teoreticheskie osnovy i prikladnye zadachi intel-lektual'nykh informatsionnykh tekhnologii* [Theoretical foundations and applied problems of intelligent information technologies]. Saint Petersburg, SPIIRAS Publ., 1999, pp. 71-81 (In Russ.).
28. Vorotnikov S., Ermishin K., Nazarova A., Yuschenko A. Multi-agent Robotic Systems in Collaborative Robotics. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) *Interactive Collaborative Robotics. ICR 2018. Lecture Notes in Computer Science*, 2018, vol. 11097. Springer, Cham.
29. Gajduk A.R., Kalyaev I.A., Kapustyan S.G. Upravlenie kollektivom intellektual'nykh ob"ektov na osnove stainykh printsipov [Managing a team of intelligent objects based on pack principles]. *Vestnik YuNTs RAN = Bulletin YNC RAS*, 2005, vol. 1, is. 2, pp. 20-27 (In Russ.).
30. Beer M. *Organization Change and Development: A System View*. London: Scott-Glenview: Foresman & Co, 1980.
31. Novikov D. A. *Matematicheskie modeli formirovaniya i funktsionirovaniya komand* [Mathematical models of formation and functioning of teams]. Moscow, 2008. 184 p. (In Russ.)
32. Bronshtejn M. *Upravlenie komandami dlya «chainikov»* [Team management for dummies]. Moscow, Vil'yams Publ., 2004 (In Russ.).
33. Osipov O. Yu., Meshcheryakov R. V., Shepelenko M. G. Proektirovanie tsifrovyykh modelei elementov elektromashinnoi chasti elektromekhatronnykh modulei robototekhnicheskikh sistem [Design of digital models of elements of the electric machine part of Electromechanical modules of robotic systems]. *Ekstremal'naya robototekhnika = Extreme Robotics*, 2017, no. 1, pp. 160-164 (In Russ.).
34. Konson Yu.A., Ronzhin A.L. [Production optimization for modern robot and human operation]. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii. Teoriya i praktika* [Modern information technologies. Theory and practice]. Tchita, 2017, pp. 23-29 (In Russ.).
35. Gorodeckij V.I. Teoriya, modeli, infrastruktury i yazyki spetsifikatsii komandnogo povedeniya avtonomnykh agentov. Obzor (Chast' 2) [Theory, models, infrastructures, and

languages of specification of command behavior of Autonomous agents. Overview (Part 2)]. *Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii = Artificial Intelligence and Decision Making*, 2011, no.3, pp. 34–47 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Галин Ринат Романович, научный сотрудник лаборатории киберфизических систем, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук. Москва, Российская Федерация, e-mail: grr@ipu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6429-7868>

Rinat R. Galin, Researcher, Cyberphysical Systems Lab., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences. Moscow, Russian Federation, e-mail: grr@ipu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6429-7868>

Серебрянный Владимир Владимирович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой СМ-7 «Робототехнические системы и мехатроника», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: vsereb@bmstu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1182-2117>

Vladimir V. Serebrennyj, Cand. of Sci. (Engineering), Head of SM-7 Robotic systems and mechatronics Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation, e-mail: vsereb@bmstu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1182-2117>

Тевяшов Глеб Константинович, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории киберфизических систем, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: tgk@ipu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3949-4936>

Gleb K. Tevyashov, Post-Graduate Student, Junior Researcher, Cyberphysical Systems Lab., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: tgk@ipu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3949-4936>

Широкий Александр Александрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории киберфизических систем Института проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: shiroky@ipu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9130-5541>

Alexander A. Shiroky, Cand. of Sci. (mathematics), Senior Researcher, Cyberphysical Systems Lab., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: shiroky@ipu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9130-5541>