

УДК 004.896

DOI: 10.35330/1991-6639-2021-1-99-5-14

MSC: 93A16; 93C85; 65K10

ЭФФЕКТИВНОЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ КОЛЛАБОРАТИВНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ЕДИНОМ ПРОСТРАНСТВЕ*

Р.Р. ГАЛИН, С.Б. КАМЕШЕВА

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65
E-mail: grr@ipu.ru

В представленной статье рассматриваются вопросы функционирования коллаборативной робототехнической системы, в состав которой входят как коллаборативные роботы (коботы), так и люди. Для решения задачи повышения эффективности взаимодействия человека и робота предлагается использовать методы и алгоритмы группового управления. В статье рассмотрены принципы формирования коллаборативной робототехнической системы и методы коллективного распределения задач среди ее участников. Предложена структурная схема системы управления коллаборативной робототехнической системой с учетом недетерминированности окружающей среды и недостатков обеспечения апостериорной информацией.

Ключевые слова: коллаборативная робототехническая система, коллаборативный робот, взаимодействие человека и робота, групповое управление.

Поступила в редакцию 10.02.2021 г.

Для цитирования. Галин Р.Р., Камешева С.Б. Эффективное функционирование коллаборативной робототехнической системы в едином пространстве // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2021. № 1(99). С. 5-14.

1. ВВЕДЕНИЕ

Применение роботов в различных сферах жизнедеятельности человека является актуальной тенденцией современного мира. В условиях деятельности человека, связанных с риском для жизни и здоровья, интеграция роботов является эффективным решением. Тем не менее достижение полной автоматизации рабочего места с использованием робота в настоящее время не представляется возможным. Это связано с такими ограничениями, как радиус рабочего пространства робота, его функциональные возможности, перенастройка и перепрограммирование для новых задач, неоднородность внешней среды и ограниченность энергоресурса. В то же время основным направлением достижения большей эффективности деятельности роботов является их применение в составе групп.

Групповое применение роботов расширяет их функциональные возможности и радиус рабочего пространства и как следствие повышает вероятность выполнения поставленных задач за счет возможности их перераспределения между роботами в группе. При решении единой глобальной целевой задачи для группы роботов необходимо выстроить взаимодействие между ними таким образом, чтобы как можно эффективнее решить локальные задачи в условиях неоднородности и детерминированности среды [1-2]. Возникает проблема группового управления роботами, которая может решаться в том числе с использованием теории многоагентных робототехнических систем (РТС).

В данной статье рассматриваются роботы, предназначенные специально для взаимодействия с человеком. Такое взаимодействие принято считать коллаборативным взаимо-

* Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 19-08-00331

действием, а класс роботов применительно к такому взаимодействию – коллаборативными роботами (коботами) [3-6]. Эксплуатация коботов не требует принятия дополнительных мер безопасности (например, в виде барьерных ограждений робота), а их функционирование в рабочем пространстве регламентировано техническими спецификациями и международными стандартами [7-9].

Человек и коботы, взаимодействуя в едином рабочем пространстве для выполнения единой глобальной целевой задачи, формируют коллаборативную робототехническую систему (КРТС). На основе получаемых при взаимодействии участников данных коботы должны выполнять поставленную задачу без рисков нанесения вреда человеку и снижения эффективности производственных процессов.

Таким образом, актуальной является научная проблема эффективного функционирования КРТС в едином рабочем пространстве, где действия роботов автономны в условиях сложной, недетерминированной и динамической среды. Решение поставленной проблемы позволит минимизировать затраты на время распределения работ для выполнения поставленных задач.

2. ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОЙ ГРУППОЙ УЧАСТНИКОВ КРТС

Взаимодействие человека и кобота (коботов) в рамках системы группового управления будет осуществляться в неоднородной группе участников КРТС [5]. Таким образом, человек и кобот входят в состав неоднородной группы \mathfrak{R} . Для простоты рассмотрения обозначим участников неоднородной группы как $U_j \in \mathfrak{R}$ ($j = 1, N$), где N – количество участников КРТС. Пусть дана некоторая среда E , в которой происходит процесс взаимодействия человека и кобота как участников КРТС. Описать состояние каждого участника группы в определенный момент времени t можно следующей вектор-функцией:

$$U_j(t) = [u_{1,j}(t), u_{2,j}(t), \dots, u_{k,j}(t)]^T, \quad (2.1)$$

где $u_{i,j}(t)$ ($i = \overline{1, k}$) – переменные состояния j -го участника группы, а состояние группы \mathfrak{R} в момент времени:

$$\mathfrak{R}(t) = \langle U_1(t), U_2(t), \dots, U_N(t) \rangle. \quad (2.2)$$

Состояние среды относительно каждого участника КРТС в принятой среде E (рабочего пространства) определяется следующей вектор-функцией:

$$E_j(t) = [e_{1,j}(t), e_{2,j}(t), \dots, e_{w,j}(t)]^T. \quad (2.3)$$

Значения переменных, описывающих состояние каждого участника группы в момент времени t , принимаем за их положение в среде, действия по выполнению работ участниками, скорость движения, угол поворота, энергоресурс коботов и т.д. Переменные состояния среды вокруг рабочего пространства участников КРТС обозначим как $e_{i,j}(t)$ ($i = \overline{1, w}$) в момент времени t при выполнении действия для достижения поставленной цели.

В классической постановке задачи системы группового управления роботами [2, 13] при взаимодействии робота(ов) и среды образуется система «робот (группа роботов) – среда». В данной статье рассматривается взаимодействие человека и коллаборативного робота в едином рабочем пространстве. В результате такого взаимодействия образуется система «человек – робот (или неоднородная группа) – среда», при этом состояние системы в момент времени t описывается парой $S_{\text{КРТС}} = \langle \mathfrak{R}, E \rangle$.

Множество различных состояний неоднородной группы участников КРТС описывается точками $N \cdot (k + w)$ -мерного пространства состояний $\{S_{\text{КРТС}}\}$. Начальное и конечное состояния системы «неоднородная группа – среда» в моменты времени t_0 и t_f соот-

ветственно определяются как $S_{\text{КРТС}}^0 = \langle \mathfrak{R}^0, E^0 \rangle$; $S_{\text{КРТС}}^f = \langle \mathfrak{R}^f, E^f \rangle$ и задаются вектор-функциями (2.4) и (2.5):

$$\mathfrak{R}^0 = \mathfrak{R}(t_0), \quad E^0 = E(t_0), \quad (2.4)$$

$$\mathfrak{R}^f = \mathfrak{R}(t_f), \quad E^f = E(t_f). \quad (2.5)$$

Предполагается, что каждый участник U_j из множества группы \mathfrak{R} способен выполнять действия по достижению поставленной цели, тогда выполняемые действия описываются непрерывными вектор-функциями:

$$A_j(t) = [a_{1,j}(t), a_{2,j}(t), \dots, a_{m,j}(t)]. \quad (2.6)$$

Множество действий участников группы \mathfrak{R} представлено точками m -мерного подпространства действий $\{A\}_j$. Объединение множеств действий всех участников КРТС дает множество действий группы \mathfrak{R} :

$$\{A_{\text{КРТС}}\} = \{A\}_1 \cup \{A\}_2 \cup \dots \cup \{A\}_N. \quad (2.7)$$

Действия, которые выполняются участниками КРТС в момент времени t , описываются непрерывной вектор-функцией $A_{\text{КРТС}}(t) = \langle A_1(t), A_2(t), \dots, A_N(t) \rangle$, следовательно, изменения состояния системы «человек – робот (или неоднородная группа) – среда» – системой дифференциальных уравнений следующего вида:

$$S_{\text{КРТС}} = f_{\text{КРТС}}(S_{\text{КРТС}}(t), A_{\text{КРТС}}(t), g(t), t), \quad (2.8)$$

где $g(t)$ – воздействие сторонних сил, оказывающих влияние на систему и изменяющих ее (среда является нестационарной), $f_{\text{КРТС}}$ – функция, описывающая изменение состояния участников КРТС и учитывающая изменение сторонних сил.

Для разграничения рабочих пространств каждого участника КРТС необходимо ввести ограничения на состояния группы и действия ее участников. Это обусловливается тем, что несколько участников, выполняя одно и то же действие, не могут находиться в одной и той же точке координат пространства одновременно. В общем случае ограничения могут задаваться в следующем виде:

$$S_{\text{КРТС}}(t) \in \{S_{\text{КРТС}}^p(t)\} \subset \{S_{\text{КРТС}}\}, \quad (2.9)$$

где $\{S_{\text{КРТС}}^p(t)\}$ – множество допустимых в момент времени t состояний КРТС.

Тогда вводимые ограничения по действиям, выполняемым участниками системы, будут представлены следующим образом:

$$A_{\text{КРТС}}(t) \in \{A_{\text{КРТС}}^p(t)\} \subset \{A_{\text{КРТС}}\}, \quad (2.10)$$

где $\{A_{\text{КРТС}}^p(t)\}$ – множество допустимых в момент времени t состояний действий группы участников.

Таким образом, на интервале времени от начального до конечного состояний $[t_0, t_f]$, при условии (2.4) и (2.5), системы связей (2.8) и ограничений (2.9) – (2.10), задача группового управления неоднородной группой участников КРТС заключается в определении действий $\bar{A}_j(t)$ каждого участника $U_j \in \mathfrak{R}$ и обеспечении экстремума функционала, что позволяет оценивать качество процесса управления неоднородной группой при достижении поставленной цели:

$$Y_{\text{КРТС}} = \Phi(S_{\text{КРТС}}^f, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} F(S_{\text{КРТС}}(t), A_{\text{КРТС}}(t), g(t), t) dt. \quad (2.11)$$

Важным является то, что при переходе из начального состояния в конечное нахождение эффективных действий участников неоднородной группы для достижения поставлен-

ной цели не является исчерпывающим решением задачи группового управления, что в первую очередь связано с динамическими недетерминированными средами.

3. ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ КРТС

Выделяют четыре основных типа проблем, которые возникают при управлении участниками РТС:

- выбор стратегии управления – общий принцип организации структуры управления участниками КРТС;
- глобальное планирование – декомпозиция глобальной задачи на простые и распределение задач между участниками КРТС;
- локальное планирование – выполнение поставленных/распределенных задач;
- обработка информации, получаемой от участников КРТС в процессе выполнения задач.

Прежде чем приступить к разработке системы группового управления роботами, необходимо выбрать стратегию группового управления и общие принципы его организации [2, 11, 14].

Выбор стратегии группового управления напрямую определяет и структурную организацию участников коллаборативной робототехнической системы. Стратегии группового управления в зависимости от процессов функционирования участников РТС подразделяются в основном на централизованные и децентрализованные. При использовании различных стратегий группового управления по отношению к поставленной глобальной цели следует учитывать рассматриваемое количество участников РТС. При небольшом количестве участников в группе использование централизованной стратегии является наиболее эффективным, но с ростом числа элементов РТС время для нахождения решения задачи группового управления растет линейно [12-13]. Однако в зависимости от условий функционирования систем лучшую эффективность могут показать смешанные (гибридные) стратегии управления, представляющие собой комбинацию двух вышеуказанных стратегий.

Проведенный сравнительный анализ, представленный в таблице 1, показал, что в случае рассмотрения функционирования неоднородных групп (как элементов КРТС) в динамической недетерминированной среде наиболее эффективно применять гибридный тип стратегии группового управления.

Таблица 1

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ОБЗОР СТРАТЕГИЙ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

Стратегия	Централизованная стратегия управления	Децентрализованная стратегия управления	Гибридная стратегия управления
Время принятия решения (быстродействие)	+-	-+	+
Надежность и живучесть системы	-	+	+
Простота организации и алгоритмизации группового управления	+	-	+-
Эффективное распределение задач	+-	+	+-
Требования вычислительных ресурсов (расход)	+	-	+

На рисунке 1 представлена комбинированная структура группового управления участников КРТС, в которую входит группа роботов, взаимодействующих с человеком.

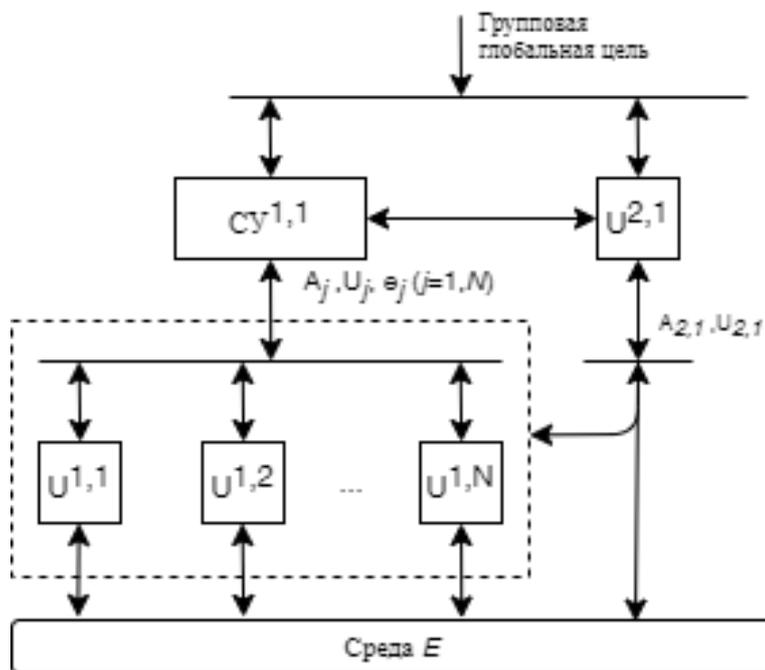


Рис. 1. Гибридная структура группового управления КРТС

Задача группового управления коллаборативной робототехнической системой является сложной с точки зрения непредсказуемости среды и разнообразия возможных принципов организации системы управления. Однако следует уточнить, что КРТС состоит из неоднородных участников, формируется коллективное управление неоднородной командой [5, 14, 15, 17]. Согласно [14, 16], рассматривают два этапа жизненного цикла команды – ее формирование и непосредственное функционирование.

Этап формирования неоднородной команды с формальной постановкой задачи применительно к КРТС был рассмотрен в работе [5]. При условии, что каждый из участников системы может выполнить неотрицательный объем работ каждого вида, а функции затрат аддитивны по различным видам работ, задача формирования неоднородной команды сводится к решению задачи оптимизации. Вышеуказанная задача рассматривалась на примере эффективных коллективных действий человеческих команд [14] с функциями затрат вида обобщенных производственных функций Кобба – Дугласа.

Авторами предлагается модульная система управления КРТС, построенная по иерархическому принципу распределенной системы. Модульность системы позволяет осуществлять модификацию отдельных ее частей без изменения остальных элементов. На рисунке 2 приведена структура предлагаемой системы управления КРТС.

На верхнем уровне (оператора КРТС) осуществляется постановка общей задачи подчиненным элементам системы и общий контроль ее функционирования. На нижних уровнях происходит декомпозиция глобальных задач и их распределение среди участников КРТС. Учитывая неоднородность команд, в предложенной гибридной системе управления предусмотрен как централизованный, так и децентрализованный подход к распределению задач (в зависимости от количества участников группы).

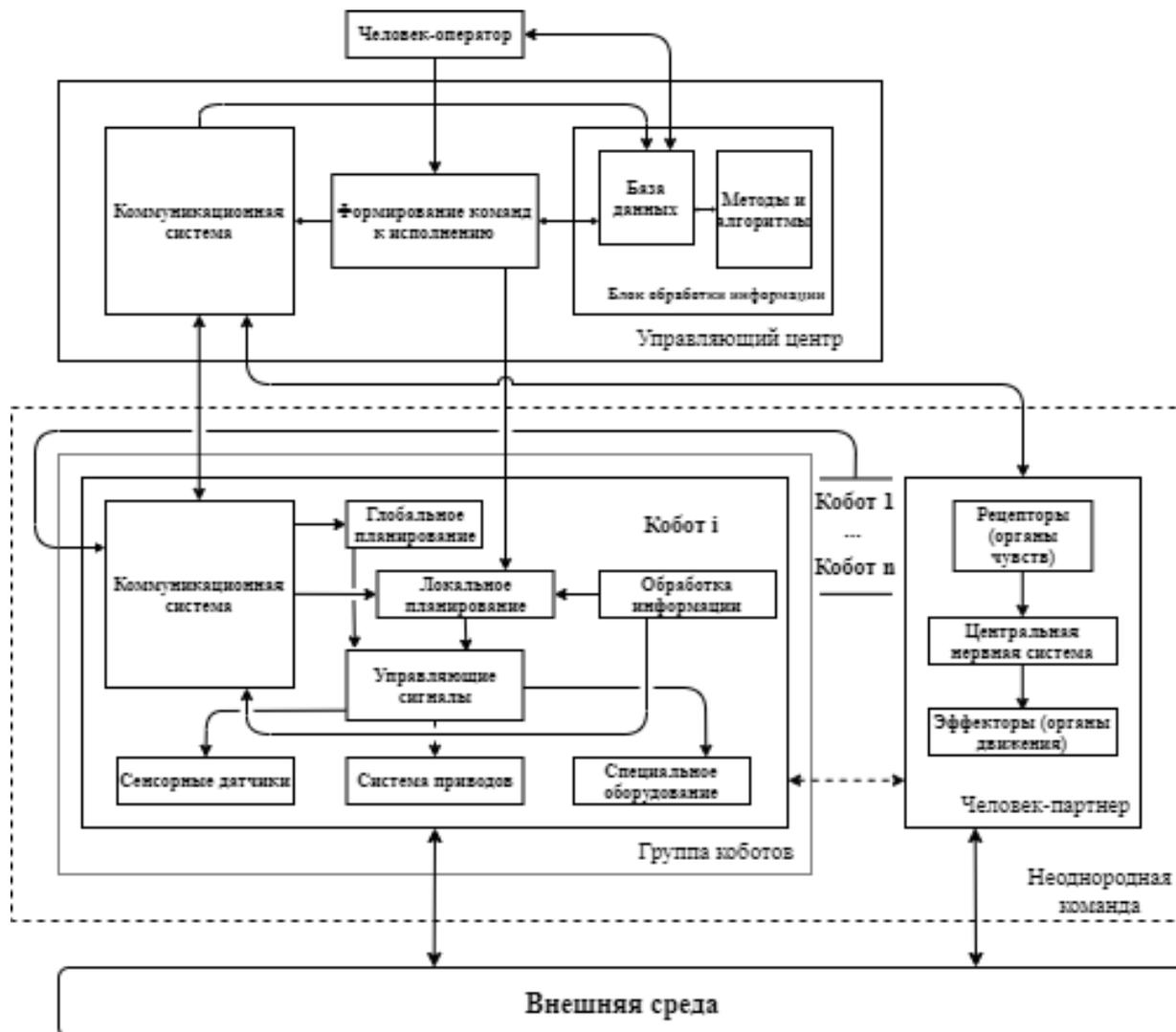


Рис. 2. Структура системы управления КРТС

Сформированная обобщенная структура системы управления КРТС позволяет перейти к выбору методов и разработке алгоритмов распределения задач в неоднородной команде, элементы которой выполняют совместные действия по решению глобальной задачи.

4. КОЛЛЕКТИВНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАДАЧ В НЕОДНОРОДНОЙ КОМАНДЕ КРТС

В неоднородной команде каждый участник действует в соответствии с принципами коллективного управления, которые можно изложить следующим образом:

- каждый участник определяет свои действия самостоятельно в текущей ситуации;
- выбор действий осуществляется на основе полученной информации о глобальной задаче команды;
- эффективными считаются действия участников, принесшие максимально возможное приращение целевого функционала в период перехода состояния системы от начального до конечного;
- возможно альтернативное действие, отличное от эффективного, если действие участника окажет наименьшее влияние на эффективность выполнения задачи всей командой.

Соблюдение вышеизложенных принципов характеризует коллективное управление, а метод управления неоднородной командой принимается как метод коллективного распре-

деления задач в КРТС. Согласно [2], методы коллективного управления ориентированы на распределенные и иерархические распределенные системы, к которым относится неоднородная команда коллаборативной РТС.

Постановка задачи управления неоднородной группой в параграфе 2 нацелена на поиск эффективных действий участников КРТС при переходе системы из начального в конечное состояние. Решение заключается в нахождении значения непрерывной вектор-функции действий $\overline{A_{\text{КРТС}}}(t)$. Учитывая то, что сенсорные данные, формируемые коботами, и цикличность вычислительных процессов обладают свойством дискретности, вектор-функция действий $\overline{A_{\text{КРТС}}}(t)$ также будет дискретной, т.е. разрывной в зависимости от рассматриваемого интервала времени Δt .

При условии, что воздействия как на участников команды, так и на среду не могут быть заранее определены, решение задачи коллективного распределения действий заключается в определении тех из них, которые обеспечивали бы максимизацию функционала при условии, что функционал превышает некое пороговое значение Y_{\min} :

$$\max Y_{\text{КРТС}} \geq Y_{\min}, \quad (4.1)$$

Таким образом, система и процессы в ней рассматриваются в дискретном виде. Решение подобных задач возможно с использованием алгоритмов с высоким априорным и малым апостериорным информационным обеспечением [18]. В этом случае целевую функцию можно представить следующим образом:

$$Y_{\text{КРТС}} = \sum_{t=t_0}^{t_f-1} F(\mathfrak{R}(t), E(t), A_{\text{КРТС}}(t), g(t)) \Delta t. \quad (4.2)$$

В рассматриваемой задаче авторы делают допущение на величину значений сторонних сил, которые могут повлиять на максимизацию целевой функции. Принимается, что воздействия на участников КРТС и на среду незначительны, следовательно, максимизацию целевого функционала можно представить как

$$Y_{\text{КРТС}} = Y_{\text{КРТС}}(t) \rightarrow Y_{\text{КРТС}}^{\max}. \quad (4.3)$$

Поставленная задача может быть решена с использованием методов динамического программирования или вариационного исчисления.

В силу нелинейности и недостаточности априорной информации для распределения задач в неоднородной команде КРТС предлагается использовать итерационный подход.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стремительное развитие коллаборативной робототехники и продолжающийся рост количества коботов, используемых как на производствах, так и в повседневной жизни, приводят к необходимости рассмотрения КРТС как сложных многоагентных социокиберфизических систем, в которых люди взаимодействуют с коботами для наиболее эффективного выполнения поставленных задач.

В статье предлагается использовать модульную структуру управления КРТС, построенную по иерархическому принципу распределенной системы, с использованием гибридного типа стратегии группового управления неоднородными командами. Эффективное распределение задач между участниками неоднородных команд предлагается реализовать с помощью итерационных методов, позволяющих решать оптимизационные задачи управления неоднородной командой КРТС.

Решение задачи группового управления элементами КРТС, функционирующими в динамической недетерминированной среде, заключается в определении действий каждого ее участника, обеспечивающих максимальный прирост функционала системы. Данную

задачу предлагается реализовать с использованием алгоритмов с высоким априорным и малым апостериорным информационным обеспечением, методов динамического программирования или вариационного исчисления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимофеев А.В. Мультиагентное и интеллектуальное управление сложными робототехническими системами // Теоретические основы и прикладные задачи интеллектуальных информационных технологий. СПб.: СПИИРАН, 1999. С. 71-81.
2. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов: монография. 2009. 280 с.
3. Galin R.R., Meshcheryakov R.V. Human-robot interaction efficiency and human-robot collaboration // Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms. Springer, Cham, 2020. С. 55-63.
4. Ермишин К.В., Ющенко А.С. Коллаборативные мобильные роботы – новый этап развития сервисной робототехники // Робототехника и техническая кибернетика. № 3(12). Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК, 2016. С. 3-9.
5. Галин Р.Р., Серебрянный В.В., Тевяшов Г.К., Широкий А.А. Взаимодействие человека и робота в коллаборативных робототехнических системах // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020. № 24(4). С. 180-199.
6. Mihelj M. et al. Collaborative Robots. Robotics. 2018. Pp. 173-187.
7. ISO/TC 299 Robotics – “ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices – Collaborative robots”.
8. ISO 10218-1, 2:2011 “Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 1, 2: Robot systems and integration”, Geneva, 2011.
9. Hoffman G. Evaluating Fluency in Human–Robot Collaboration // IEEE Transactions on Human-Machine Systems. Pp. 1-10.
10. Kaliaeв I., Kapustian S. Multiprocessor distributed control system of intelligent mobile robot // 14th Workshop on Distributed Control Systems. Seoul, Korea, July 1997.
11. 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.
12. Гайдук А.Р., Каляев И.А., Капустян С.Г. Управление коллективом интеллектуальных объектов на основе стайных принципов // Вестник ЮНЦ РАН. 2005. Т. 1. Выпуск 2. С. 20-27.
13. Юревич Е.И. Основы робототехники. 4-е изд. БХВ-Петербург, 2018. 304 с.
14. Новиков Д.А. Математические модели формирования и функционирования команд. М.: Издательство физико-математической литературы, 2008. 184 с.
15. Кулинич А.А. Модель поддержки принятия решений для образования коалиций в условиях неопределенности // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. № 2. С. 95-106.
16. Beer M. Organization Change and Development: A System View. London: Scott-Glenview: Foresman & Co, 1980.
17. Bruce J., Bowling M., Browning B., Veloso M. Multi-robot team response to a multi-robot opponent team // Proc. of ICRA’03, the 2003 IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Taiwan, May 2003.
18. Каляев И.А., Капустян С.Г., Усачев Л.Ж. Способ динамического целераспределения в задаче группового применения мобильных роботов специального назначения // Интеллекту-

альные многопроцессорные системы (ИМС-99): III Международная конференция. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. С. 70-72.

REFERENCES

1. Timofeev A.V. *Mul'tiagentnoe i intellektual'noe upravlenie slozhnymi robototekhnicheskimi sistemami* [Multi-agent and intelligent management of complex robotic systems] // *Teoreticheskie osnovy i prikladnye zadachi intellektual'nykh informacionnykh tekhnologij* [Theoretical foundations and applied problems of intelligent information technologies]. SPb.: SPIIRAS, 1999. Pp. 71-81.
2. Kaljaev I.A., Gaiduk A.R., Kapustian S.G. *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravlenija v gruppah robotov* [Models and algorithms of collective management in groups of robots]. Monography, 2009. 280 p.
3. Galin R.R., Meshcheryakov R.V. Human-robot interaction efficiency and human-robot collaboration // *Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms*. Springer, Cham, 2020. Pp. 55-63.
4. Ermishin K.V., Yuschenko A.S. *Kollaborativnyye mobil'nyye roboty – novyy etap razvitiya servisnoy robototekhniki* [Collaborative mobile robots - a new stage of development of service robotics]. *J. Robot. Tech. Cybern.* 2016. № 3(12). Pp. 3-9.
5. Galin R.R., Serebrennyj V.V., Tevyashov G.K., Shiroky A.A. *Vzaimodeystviye cheloveka i robota v kollaborativnykh robototekhnicheskikh sistemakh* [Human-robot Interaction in Collaborative Robotic Systems]. *Proceedings of the Southwest State University*. 2020. № 24(4). Pp. 180-199.
6. Mihelj M. et al. Collaborative Robots. *Robotics*. 2018. Pp. 173-187.
7. ISO/TC 299 Robotics – “ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices – Collaborative robots”.
8. ISO 10218-1, 2:2011 “Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 1, 2: Robot systems and integration”, Geneva, 2011.
9. Hoffman G. Evaluating Fluency in Human–Robot Collaboration // *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. Pp. 1-10.
10. Kaljaev I., Kapustian S. Multiprocessor distributed control system of intelligent mobile robot // *14th Workshop on Distributed Control Systems*. Seoul, Korea, July 1997.
11. 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.
12. Gaiduk A.R., Kalyaev I.A., Kapustyan S.G. *Upravlenie kollektivom intellektual'nykh ob'ektov na osnove stajnykh principov* [Managing a team of intelligent objects based on pack principles] // *Vestnik YUNC RAN* [Bulletin YNC RAS]. P. 1. Vol. 2. 2005. Pp. 20-27.
13. Yurevich E.I. *Osnovy robototekhniki* [Fundamentals of Robotics]. Vol. 4. BHV-Petersburg, 2018. 304 p.
14. Novikov D.A. *Matematicheskie modeli formirovaniya i funkcionirovaniya komand* [Mathematical models of formation and functioning of teams]. M.: Publishing house of physical and mathematical literature, 2008. 184 p.
15. Kulinich A.A. *Model' podderzhki prinyatiya resheniy dlya obrazovaniya koalitsiy v usloviyakh neopredelennosti* [Decision support model for coalition formation under conditions of uncertainty] // *Iskusstvennyy intellekt i prinyatiye resheniy* [Artificial intelligence and decision making]. 2012. No. 2. Pp. 95-106.
16. Beer M. *Organization Change and Development: A System View*. London: Scott-Glenview: Foresman & Co, 1980.
17. Bruce J., Bowling M., Browning B., Veloso M. Multi-robot team response to a multi-robot opponent team // *Proc. of ICRA'03, the 2003 IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*, Taiwan, May 2003.

18. Kaliaev I.A., Kapustian S.G., Usachev L.Zh. *Spocob dinamičeskogo celeraspredelenija celej v zadache gruppovogo primenenija mobil'nyh robotov special'nogo naznachenija* [Method of dynamic goal-distribution in the task of group application of mobile robots for special purposes] // *Intellektual'nye mnogoproceccornye cictemy (IMC-99): III Mezhdunarodnaya konferentsiya* [Intelligent multiprocessor systems (IMS-99): III International Conference]. Taganrog: TRTU, 1999. Pp. 70-72.

EFFECTIVE FUNCTIONING OF A COLLABORATIVE ROBOTIC SYSTEM IN A SHARED WORKSPACE*

R.R. GALIN, S.B. KAMESHEVA

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences
117997, Moscow, 65, Profsoyuznaya str.
E-mail: grr@ipu.ru

This paper discusses the functioning of a collaborative robotic system (CRS), which includes both collaborative robots (cobots) and humans. Group control methods and algorithms are proposed to solve the problem of increasing the efficiency of human-robot interaction. The paper examines the principles of the formation of a CRS and methods of tasks distribution among the elements of the system. The proposed structural scheme of the CRS control system takes into account both the indeterminacy of the environment and the lack of posteriori information.

Keywords: collaborative robotic system, collaborative robot, human-robot interaction, group control.

Received by the editors 10.02.2021 г.

For citation. Galin R.R., Kamesheva S.B. Effective functioning of a collaborative robotic system in a shered workspace // *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2021. No. 1 (99). Pp. 5-14.

Сведения об авторах:

Галин Ринат Романович, н.с. лаборатории № 80 «Киберфизические системы» Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук.
117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65.
E-mail: grr@ipu.ru

Камешева Сания Болаткызы, инженер лаборатории № 80 «Киберфизические системы» Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук.
117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65.
E-mail: ksb@ipu.ru

Information about the authors:

Galın Rinat Romanovich, Researcher of the Laboratory № 80 “Cyber-Physical Systems”, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences.
117997, Moscow, 65, Profsoyuznaya str.
E-mail: grr@ipu.ru

Kamesheva Saniya Bolatkyzy, Engineer of the Laboratory № 80 “Cyber-Physical Systems”, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences.
117997, Moscow, 65, Profsoyuznaya str.
E-mail: ksb@ipu.ru

* This work was carried out with partial support of the RFBR grant No. 19-08-00331