



DOI: 10.18721/JCSTCS.10409

УДК 004.896

УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ АВТОНОМНЫХ РОБОТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛЯРНЫХ КООРДИНАТ

В.А. Онуфриев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрена проблема координирования группы автономных роботов с целью перемещения из произвольных позиций в определенную точку. Предложен подход, в рамках которого статичный лидер группы на основе дальномеров вычисляет полярные координаты каждого робота, которые затем передаются по беспроводной сети и используются для вычисления направления и пути перемещения к определенной цели. Приведена алгоритмическая модель, применяемая для вычисления и сохранения координат роботов ведущим. Описан предлагаемый способ коммуникации между роботами на базе сетей Wi-Fi и стека протоколов TCP/IP. Определен требуемый набор бортового оборудования для каждого робота.

Ключевые слова: подвижные роботы; групповое управление; сетевая система; интеллектуальные системы; киберфизические системы.

Ссылка при цитировании: Онуфриев В.А. Управление группой автономных роботов с использованием полярных координат // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2017. Т. 10. № 4. С. 97–106. DOI: 10.18721/JCSTCS.10409

AUTONOMOUS ROBOTS GROUP CONTROL USING POLAR COORDINATES

V.A. Onufriev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

Autonomous robots group coordination in order to move from arbitrary position to specific point is considered in this paper. The author proposes the approach where the static group's leader computes each robot's polar coordinates based on the distance sensor's measures. Then it transmits these coordinates via a wireless network to be used for direction and disposition computations. The algorithmic model of this process, which is used for computation and saving the robots' coordinates is presented. The paper also describes the proposed methods of the robots' communication based on Wi-Fi networks and TCP/IP stack. In the conclusion a minimal set of on-board equipment is defined.

Keywords: mobile robots; group control; network-centric system; intelligent systems; cyber-physical system.

Citation: Onufriev V.A. Autonomous robots group control using polar coordinates. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2017, Vol. 10, No. 4, Pp. 97–106. DOI: 10.18721/JCSTCS.10409

Введение. Известно, что в настоящее время роботы используют в различных областях науки и техники. Чаще всего это связано с работой в опасных либо вредных

для человека условиях [7, 8]. Эти направления развиваются давно и успешно, но для многих задач не может привлекаться только один робот ввиду того, что его возмож-

ности всегда будут ограничены имеющимся на борту оборудованием, зарядом батарей, ограниченным радиусом действия и т. д. Для снятия этого ограничения следует использовать сразу несколько роботов, которые могут выполнять разные действия, но связаны при этом общей целью.

Несмотря на то что существуют исследования, в которых каждый робот следует заложенному в него алгоритму «без оглядки» на остальных [14], групповое управление с взаимодействием между роботами видится более перспективным, т. к. в этом случае здесь может быть организована сетцентрическая система управления [3], подразумевающая принятие решений внутри системы, ее общую открытость и постановку целей самой системой. Возможность коммуникации между роботами (т. е. частями системы) позволяет лучше оценивать имеющиеся ресурсы и принимать решения в условиях неопределенности. Кроме того, коммуникация между автономными устройствами отвечает современному тренду кибер-физических систем [12, 15]. С повышением общего уровня неопределенности эффективность систем, не способных адаптироваться и перестраиваться, заметно падает [1].

Управление группой роботов несет в себе множество дополнительных задач и сложностей, однако главная из них – определение местоположения каждого отдельного робота [4]. Решению этой задачи и посвящена статья.

Задача определения местоположения сводится к определению вектора координат для любого робота, достаточным образом описывающего его нахождение.

Основная проблема состоит в том, что не существует более-менее универсального решения этой задачи, она решается для каждой конкретной ситуации. Современное «state of arts» координирования роботов подразумевает для каждого конкретного случая разработку частного решения, которое затем уже нельзя применить для других, более общих, задач [5, 10].

Для универсализации решения данной задачи можно было бы использовать бор-

товое оборудование с мощными процессорами и встроенными GPS-модулями, как в работах [13, 16], однако подобные решения удорожают стоимость каждого робота в отдельности, что в пересчете на их группу делает затраты на проект необоснованно высокими. Сюда же относится и применение видеокамер с последующей обработкой изображения.

Таким образом, основная проблема – отсутствие универсального способа определения местоположений – будет решаться в данной статье с учетом главного ограничения: стоимости бортового оборудования роботов.

Постановка задачи. Имеем группу из N роботов, в начальный момент времени находящихся в заранее неизвестных точках пространства любой геометрической формы. Другие предметы в этом пространстве отсутствуют либо имеют размеры намного меньше размеров роботов.

Перед нами две задачи:

1) создание алгоритма определения точного местоположения каждого робота. При этом алгоритм должен быть применим в указанных выше условиях (т. е. в общем случае);

2) определение набора бортовых устройств, достаточного для вычисления местоположения робота. Количество устройств должно быть минимальным, т. к. они увеличивают стоимость робота, потребляют электрическое питание и усложняют схему подключения.

Решение этих задач позволит создать децентрализованную систему из роботов, которые по сигналу любого из них способны перемещаться к роботу, подавшему сигнал. При этом все роботы подвижны и каждый из них в момент сигнала может находиться в произвольной точке. Автономность роботов подразумевает отсутствие сигналов управления с удаленного компьютера. Кроме того, должна быть организована возможность получения на компьютере информации о текущем положении роботов. Такая система может применяться для создания поисковой группы роботов, перемещающейся к участнику, нашедшему искомым предмет, который может быть

найден в любой точке пространства заранее неизвестного размера и формы.

Существующие способы определения местоположения. Проблема определения местоположения роботов в условиях неопределенности не является тривиальной. В отличие от описанной в [4] системе, где роботы перемещаются исключительно вдоль линий с координатными метками на ней, в более общем случае, очевидно, невозможно предусмотреть заранее заданной координатной сети. Использование роботами статичных объектов в качестве «ориентиров», как в [11] (система позиционирования на основе двух неподвижных ИК-маяков), также не может претендовать на роль более общего решения ввиду неподвижности маяков и необходимости их установки в заранее определенных точках, является лишь узкоспециализированным способом решения проблемы координации.

Обратим внимание на то, что функция определения координат робота может, в самом общем случае, выполняться *либо самим роботом, либо каким-то внешним устройством*. Изучим обе эти группы подходов.

Первый способ координации можно отнести к первой группе подходов. Он принципиально похож на рассмотренный в работе [11], где робот измеряет своё расстояние до статичных ИК-маяков и на основе этого вычисляет свои координаты.

Рассмотрим прямоугольную комнату неизвестных заранее размеров (рис. 1).

Находящийся в произвольной точке робот должен совершить множество измерений, чтобы однозначно определить свое местоположение, т. к. ему нужно определить кратчайшие расстояния до двух стен. Однако робот может занять четыре различных положения с одинаковыми расстояниями a и b : расстояниями до левой и правой стен соответственно. Для решения этой задачи необходимо ввести еще измерения углов 1 и 2, показанных на рис. 1, а также угол 3 (направляющий к одной из стен либо к полюсу Земли), для чего должен быть использован магнитометр.

Роботы свободно перемещаются по пространству в поисках определенного предмета, самостоятельно определяя свои координаты.

Преимущество данного способа – простота алгоритма, а недостатки – требование отсутствия посторонних предметов в комнате, ограничение объема комнаты расстоянием, равным радиусу действия дальномеров, и ограничение на форму комнаты и стен.

Таким образом, данный способ не подходит для решения задачи при использовании комнаты произвольной формы и с возможностью нахождения посторонних предметов.

Принципиально иным является второй способ ориентировки в пространстве, который можно использовать для децентрализованной поисковой системы. Он относится

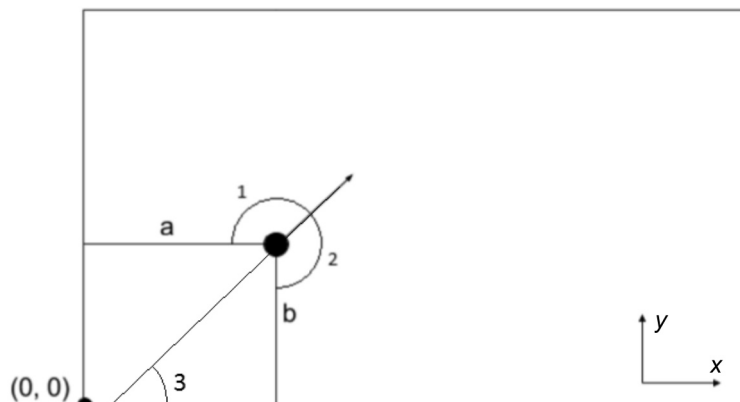


Рис. 1. Первый подход к определению местоположения робота

Fig. 1. The first approach to define the robot's position

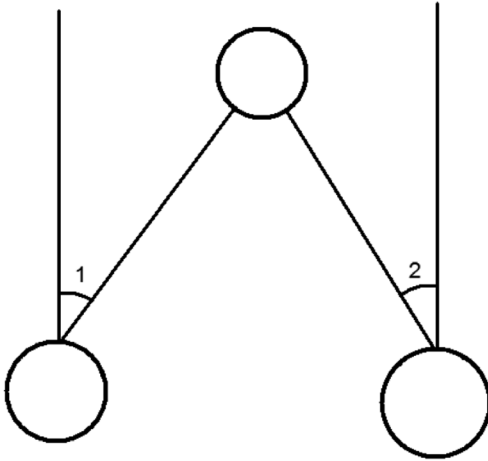


Рис. 2. Второй подход к определению местоположения робота

Fig. 2. The second approach to define the robot's position

ко второй группе методов и похож на представленный в работе [18], где группа роботов следует за «лидером», опираясь только на свое расположение относительно него. В этом случае у роботов нет необходимости вычислять свои координаты. Для применения данного подхода, например, в задаче поиска объектов, каждый робот должен быть способен одновременно отслеживать местоположение ведущего и сканировать территорию в поисках предмета, а ведущий должен «вести» всю группу в определенном направлении.

На рис. 2 находящиеся сзади роботы должны поддерживать значение углов 1 и 2 и расстояние до ведущего в определенном интервале.

Главным преимуществом данного подхода является то, что ведомым роботам не требуется вычислять свои координаты, а для слежения за ведущим используются относительно простые алгоритмы и дешевые датчики.

Вместе с тем здесь имеются и недостатки. Каждый робот должен постоянно тратить ресурсы для слежения за ведущим, для чего требуется либо дополнительное процессорное время, либо дополнительное оборудование. Также остается нерешенным вопрос о том, каким образом должен координироваться уже сам ведущий.

Предлагаемый способ определения местоположений и алгоритмы. На базе двух описанных подходов мы предлагаем новый, основанный на постулате, что координаты робота должны вычисляться не самим роботом, а другим, внешним по отношению к нему устройством. Так, в работе [17] для этого используются внешние по отношению к роботам программные агенты. В нашем подходе эта задача ложится на ведущего робота (хотя эту роль может играть любой из роботов группы), что обеспечивает децентрализованность и автономность системы.

Ведущий с момента начала решения задачи поиска будет оставаться статичным. Благодаря этому его неизменную позицию можно считать началом координат для всех других роботов. Он обозначен черным ромбом на рис. 3, и его местоположение определено координатами $(0, 0)$. Вместе с тем остальные роботы подвижны. На рисунке два из них обозначены как a и b .

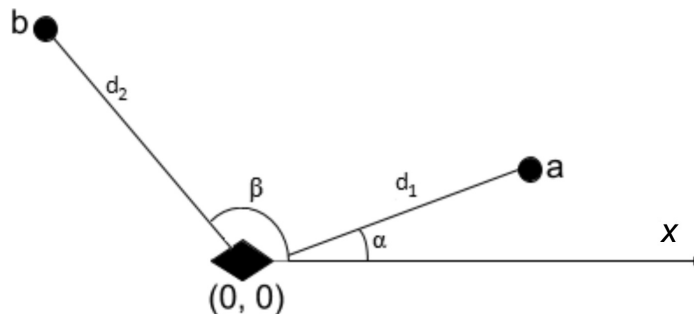


Рис. 3. Предлагаемый подход к определению местоположения робота

Fig. 3. The proposed approach to define the robot's position



Рис. 4. Алгоритм работы ведущего робота

Fig. 4. The leading robot's operation algorithm

Особенность ведущего робота состоит в том, что он снабжен сразу несколькими дальнометрами, которые крепятся на сервоприводы. Благодаря этому ведущий всегда обладает информацией о том, на каком расстоянии и в каком направлении от него располагается тот или иной робот. Например, на рис. 3 робот a расположен на расстоянии d_1 под углом α к фиксированной оси ведущего, обладая при этом, по сути, полярными координатами (d_1, α) . Аналогично определяются полярные координаты робота $b : (d_2, \beta)$. Ось отсчета X ведущий робот может выбрать относительно, например, нулевого положения серводвигателя, поворачивающего дальнометры.

Таким образом, ведущий робот, находящийся в произвольной начальной точке, должен непрерывно сканировать пространство вокруг себя, определяя тем самым полярные координаты остальных роботов. Подробнее процесс описан в алгоритмической модели (рис. 4).

Рассмотрим работу на примере задачи поиска группой роботов предмета в комнате заранее неизвестных размеров. Ведущий робот, оставаясь неподвижным и сканируя пространство для определения полярных координат роботов вокруг себя, сохраняет их в своей памяти. Робот, нашедший объект, связывается с ведущим и сообщает о необходимости сигнализировать другим роботам. В ответ ведущий отправляет каждому участнику не только сам сигнал, но и информацию о текущем положении сигнализирующего робота, а также каждому сообщается о его собственном текущем положении, чтобы можно было построить путь к сигнализировавшему роботу. Схема действий отражена на рис. 5.

Последней задачей является координирование перемещения каждого отдельного робота из его текущего положения к точке сигнализирующего участника. Предположим, что робот b отправил сигнал всей группе роботов. Движение робота a из по-



Рис. 5. Последовательность при обнаружении объекта

Fig. 5. The action sequence when a new object is detected

лярных координат (d_1, α) к роботу b с координатами (d_2, β) может быть описано вектором s (рис. 6).

Для перемещения к вызвавшему роботу необходимо повернуть в направлении, определяемом углом γ , и пройти путь длиной в модуль вектора s . Разложив этот вектор по осям, получим, что $\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{s_y}{s_x}\right)$, где s_x и s_y – проекции s на оси координат. Так как $s = \vec{d}_2 - \vec{d}_1$, то получается, что $s_y = d_2 \sin(\beta) - d_1 \sin(\alpha)$, $s_x = d_2 \cos(\beta) - d_1 \cos(\alpha)$, а длина вектора вычисляется $\sqrt{s_x^2 + s_y^2}$.

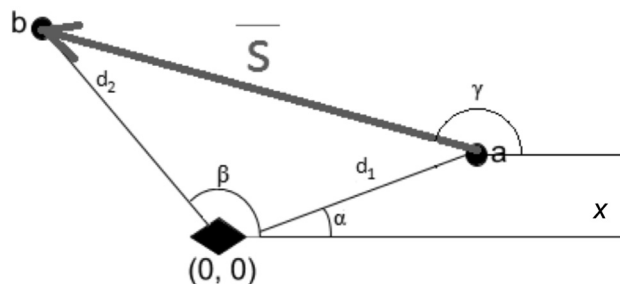


Рис. 6. Вектор перемещения робота в указанную точку

Fig. 6. A vector of robot's displacement to defined position

Сказанное налагает дополнительные требования на бортовое оборудование каждого из роботов. Каждый из роботов должен по требованию повернуть на строго определенный угол в пространстве. Для этого необходим магнитометр – датчик, определяющий текущее направление робота.

Вместе с тем, т. к. отслеживанием и вычислением координат участников группы занимается ведущий робот, необходимо реализовать упомянутый выше канал обмена данными между всеми роботами, поскольку каждый должен иметь возможность запросить у ведущего не только координаты объекта, но и собственные текущие координаты, чтобы построить траекторию перемещения к нему.

Решение задачи обеспечения коммуникации. Условие поддержки децентрализованного управления означает, что система должна работать автономно и выполнять задачи даже в случае, если несколько роботов вышли из строя. Из этого следует, что способ коммуникации должен позволять любому роботу в любой момент времени связываться с любым другим вне зависимости от их местоположения и текущих задач. Более того, стремление генерализовать систему для решения более широкого круга задач вынуждает увеличить радиус действия связи между роботами минимум до 100 м на открытой местности и до 25 м в помещении. Однако предложенный выше подход позволяет не налагать специальные требования на канал связи, как, например, в работе [6], где прямо подразумевалось, что канал связи должен не только реализовать передачу данных, но и предусмотреть возможность опре-

деления, с какой стороны пришел сигнал.

Описанный в предыдущем разделе подход для координации роботов осуществим при наличии возможности отправки ведущим данных с координатами любому из подвижных роботов как по запросу от них, так и без запроса.

Участники группы должны самостоятельно организовать сеть для обмена данными между собой. Более того, эта сеть должна быть создана ими даже в том случае, если часть из них выведена из строя.

Таким требованиям соответствуют стандарты передачи данных Wi-Fi и ZigBee. При этом второй, при всех своих достоинствах, в числе которых можно назвать низкое энергопотребление и большую гибкость в организации топологий соединения [9], требует значительно более дорогое оборудование. Использование Wi-Fi в свою очередь подразумевает высокое энергопотребление и меньшую гибкость топологий, и более сложную организацию сети, но меньшую стоимость самих модулей.

Для указанной задачи подходит любой из этих стандартов связи, но их реализация будет очень различаться. Так, в случае с ZigBee вопрос создания сети решается аппаратно, все устройства являются равнозначными. В случае с Wi-Fi (мы создавали сеть на основе Wi-Fi-модулей ESP8266) любой робот может выступать как в роли точки доступа, так и в роли подключаемого к ней устройства. Поэтому достаточно любому из них (например, ведущему) выступить в роли точки доступа, тогда остальные роботы подключатся к нему.

При использовании протоколов передачи данных в случае с ZigBee любое сообщение, отправленное любым роботом, одновременно получают все участники сети либо один определенный участник.

В случае с использованием Wi-Fi необходимо организовать TCP/IP канал. Для этого один из роботов должен стать TCP-сервером, а остальным необходимо подключаться к нему в режиме TCP-клиентов. Подробности приведены на рис. 7.

Требуемое бортовое оборудование. Для

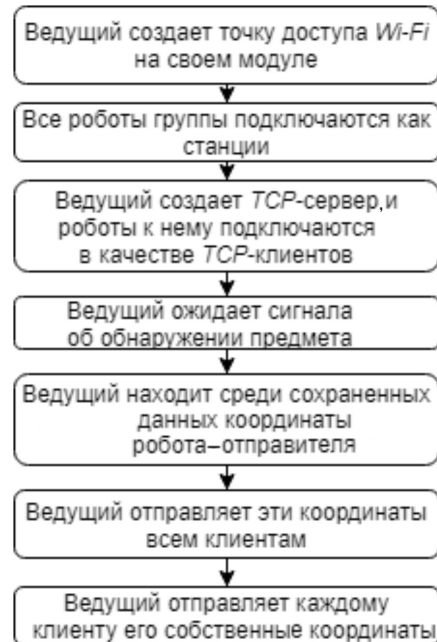


Рис. 7. Реализация последовательности на уровне передачи данных

Fig. 7. The data interchange sequence

реализации описанного выше алгоритма необходимо обеспечить следующее оборудование для участников группы:

модули связи — в данном случае рекомендуем использовать Wi-Fi-модули, например, ESP8266;

датчики расстояния — для этой цели подойдут ультразвуковые дальномеры;

магнитометры — они позволяют определять текущее направление движения робота, что необходимо для вычисления и контроля необходимого поворота;

сервоприводы — для определения угла (относительно оси робота), на котором располагается предполагаемый объект.

Отдельно стоит отметить, что для ведущего робота магнитометры не являются необходимым оборудованием, т. к. предполагается его статичность в основной фазе работы. Вместе с тем ему необходим сервопривод для кругового осмотра местности.

Заключение. Преимущество предложенного в статье подхода в том, что для любого подвижного робота задача определения его местоположения решается извне — ведущим роботом. Это позволяет упростить

его бортовое оборудование, уменьшить вес и высвободить вычислительные ресурсы для других задач. Также достоинством является отсутствие привязки к статическим объектам (кроме самого ведущего робота, который может в случае необходимости самостоятельно изменить свое местоположение).

Предложенный алгоритм представляется несложным для выполнения на самых простых и недорогих микроконтроллерах.

В то же время недостатком является необходимость допущения, что в окрестностях ведущего робота отсутствуют рельефные особенности и любые другие предметы, помимо искомого. Кроме того, подвижные роботы могут корпусами закрывать друг друга от ведущего.

Разработанный способ координирова-

ния роботов может использоваться при выполнении таких групповых задач, как патрулирование территории, обезвреживание объектов и поисковые работы.

Вместе с тем для более качественной реализации сетевидной системы требуется разработка содержания уточняющих сообщений, определение частоты их отправления, а также онтологии их коллективного поведения [2], которая станет базой для интеллектуальной системы управления.

Следующий шаг в развитии – организация передачи данных между рабочей станцией и ведущим роботом, что может быть сделано при помощи подключения станции к беспроводной сети группы роботов. Для этого потребуется реализация TCP-клиента на станции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Амелин К.С., Амелина Н.О., Граничин О.Н.** Адаптивная мультиагентная операционная система реального времени для комплексов БПЛА // Актуальные проблемы Российской космонавтики. Труды XXXVIII академических чтений по космонавтике. М.: Комиссия РАН, 2014. С. 654.
2. **Городецкий В.И., Самойлов В.В., Троцкий Д.В.** Базовая онтология коллективного поведения автономных агентов и ее расширения // Известия РАН. Теория и системы управления. 2015. № 5. С. 102–121.
3. **Ефремов А.Ю., Максимов Д.Ю.** Сетевидная система управления – что вкладывается в это понятие? // Труды III Всеросс. конф. с междунар. участием: Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения. М.: ИПУ РАН, 2012. С. 158–161.
4. **Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.** Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009. 280 с.
5. **Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.** Самоорганизация в мультиагентных системах // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск. 2010. С. 14–20.
6. **Карпова И.П.** Псевдоаналоговая коммуникация в группе роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. № 2(17). С. 94–101.
7. **Куафе Ф.** Взаимодействие робота с внешней средой. М.: Мир, 1985. 285 с.
8. **Мальцев П.П., Пономарев К.М., Степанов Ю.И.** «Умная пыль» на основе микросистемной техники // Интеллектуальные робототехнические системы 2001: материалы молодежной, науч. шк. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2001. С. 220–232.
9. **Онуфриев В.А., Удод А.С.** Беспроводная система контроля параметров дистанционно распределенных сооружений // Научная сессия ТУСУР-2010: Матер. докладов Всеросс. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск: В-Спектр, 2010. Ч. 2. С. 170–173.
10. **Amato C., Konidaris G.D., Cruz G., Maynor C.A., How J.P., Kaelbling L.P.** Planning for decentralized control of multiple robots under uncertainty // Proc. of IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation. IEEE, 2015. Pp. 1214–1248.
11. **Blankenship J., Mishal S.** Enhancing the Pololu 3pi with Robotbasic. North Charleston SC: Createspace, 2010. 156 p.
12. **Brettel M., Friederichsen N., Keller M., Rosenberg M.** How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An industry 4.0 perspective // Internat. J. of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronics and Manufacturing Engineering. 2014. Vol. 8. No. 1. Pp. 37–44.
13. **Feddema J.T., Lewis C., Schoenwald D.A.** Decentralized control of cooperative robotic vehicles: Theory and application // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 2002. Vol. 18. No. 5. Pp. 852–864.
14. **Guilherme A.S., Kumar R.V., Campos M.F.M.** Decentralized algorithms for multirobot



manipulation via caging // Springer Tracts in Advanced Robotics. 2003. Vol. 7. Pp. 257–274.

15. **Onufriev V. A., Sulerova A.S., Poteking V.V.** Cyber-physical systems application for the radio telescope's adaptive surface control task // Symp. on Automated Systems and Technologies. Hannover: PZH Verlag, 2016. Pp. 51–56.

16. **Vásárhelyi G., Virágh Cs., Somorjai G., et al.** Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots // IEEE/RSJ Internat. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Digest.

Chicago, 2014. Pp. 3866–3873.

17. **Wang Y., de Silva C.W.** A machine-learning approach to multi-robot coordination // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2008. Vol. 21(3). Pp. 470–484.

18. **Wang Z., Takano Y., Hirata Y., Kosuge K.** A pushing leader based decentralized control method for cooperative object transportation // IEEE/RSJ Internat. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE press, 2004. Vol. 1. Pp. 1035–1040.

Статья поступила в редакцию 16.08.2017.

REFERENCES

1. **Amelin K.S., Amelina N.O., Granichin O.N.** Adaptivnaya multiagentnaya operatsionnaya sistema realnogo vremeni dlya kompleksov BPLA [Adaptive multi-agent real-time operating system for UAV systems]. *Aktualnyye problemy Rossiyskoy kosmonavtiki. Trudy XXXVIII akademicheskikh chteniy po kosmonavtike [Actual problems of the Russian cosmonautics. Proceedings of the XXXVIII Academic Readings on Cosmonautics]*. Moscow: Komissiya RAN, 2014, P. 654. (rus)

2. **Gorodetskiy V.I., Samoylov V.V., Trotskiy D.V.** Bazovaya ontologiya kollektivnogo povedeniya avtonomnykh agentov i yeye rasshireniya [The reference ontology of collective behavior of autonomous agents and its extensions]. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya [Journal of Computer and Systems Sciences International]*, 2015, No. 5, Pp. 102–121. (rus)

3. **Yefremov A.Yu., Maksimov D.Yu.** Setesentricheskaya sistema upravleniya – chto vkladyvayetsya v eto ponyatiye? [The network-centric control system - what is included in this concept?] *Trudy III Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem: Tekhnicheskiye i programmnyye sredstva sistem upravleniya, kontrolya i izmereniya [3rd All-Russian Conference with International Participation: Technical and Software Tools for Control, Monitoring and Measurement Systems]*. Moscow: IPU RAN Publ., 2012, Pp. 158–161. (rus)

4. **Kalyayev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G.** Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov [Models and algorithms of collective management in groups of robots]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2009, 280 p. (rus)

5. **Kalyayev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G.** Samoorganizatsiya v multiagentnykh sistemakh [Self-organization in multi-agent systems]. *Izvestiya SFedU. Engineering sciences*, 2010, Pp. 14–20. (rus)

6. **Karpova I.P.** Psevdoanalogovaya kommunikatsiya v gruppe robotov [Pseudo-analog communication in robot groups]. *Mechatronics*,

Automation, Control, 2016, No. 2(17), Pp. 94–101. (rus)

7. **Kuaf F.** *Vzaimodeystviye robota s vneshney sredoy [Interaction of the robot with the external environment]*. Moscow: Mir Publ., 1985, 285 p. (rus)

8. **Maltsev P.P., Ponomarev K.M., Stepanov Yu.I.** “Umnaya pyl” na osnove mikrosistemnoy tekhniki [“Clever dust” based on microsystem technology]. *Intellectual Robotics Systems 2001: Proceed. youth, scientific school*. Taganrog: TRTU Publ., 2001, Pp. 220–232. (rus)

9. **Onufriyev V.A., Udod A.S.** Besprovodnaya sistema kontrolya parametrov distantsionno raspredelennykh sooruzheniy [Wireless monitoring system for parameters of remotely distributed structures]. *Nauchnaya sessiya TUSUR-2010: Materialy dokladov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh [Scientific session of TUSUR-2010: Reports of the All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, PhD Students and Young Scientists]*. Tomsk: V-Spektr Publ., 2010, Part 2, Pp. 170–173. (rus)

10. **Amato C., Konidaris G.D., Cruz G., Maynor C.A., How J.P., Kaelbling L.P.** Planning for decentralized control of multiple robots under uncertainty. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 2015, Pp. 1214–1248.

11. **Blankenship J., Mishal S.** *Enhancing the Pololu 3pi with Robotbasic*. North Charleston SC: Createspace, 2010, 156 p.

12. **Brettel M., Friederichsen N., Keller M., Rosenberg M.** How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: an industry 4.0 perspective. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronics and Manufacturing Engineering*, 2014, Vol. 8, No. 1, Pp. 37–44.

13. **Feddema J.T., Lewis C., Schoenwald D.A.** Decentralized control of cooperative robotic

vehicles: theory and application. *IEEE transactions on robotics and automation*, 2002, Vol. 18, No. 5, Pp. 852–864.

14. **Guilherme A.S., Kumar R.V., Campos M.F.M.** Decentralized algorithms for multirobot manipulation via caging. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 2003, Vol. 7, Pp. 257–274.

15. **Onufriev V. A., Sulerova A.S., Poteking V.V.** Cyber-physical systems application for the radio telescope's adaptive surface control task. *AST - Symposium on Automated Systems and Technologies*, Hannover: PZH Verlag, 2016, Pp. 51–56.

16. **Vásárhelyi G., Virágh Cs., Somorjai G., et al.** Outdoor flocking and formation flight with

autonomous aerial robots. *IROS 2014 Conference Digest - IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Chicago, 2014, Pp. 3866–3873.

17. **Wang Y., de Silva C.W.** A machine-learning approach to multi-robot coordination. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2008, Vol. 21(3), Pp. 470–484.

18. **Wang Z., Takano Y., Hirata Y., Kosuge K.** A pushing leader based decentralized control method for cooperative object transportation. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Piscataway: IEEE press, 2004, Vol. 1, Pp. 1035–1040.

Received 16.08.2017.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ОНУФРИЕВ Вадим Александрович

ONUFRIEV Vadim A.

E-mail: ovavadim@gmail.com