

## СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 681.515.8

### АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ГРУППЫ РОБОТОВ ПО ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ

© Ю. Н. Золотухин, А. С. Мальцев, М. Н. Филиппов, К. Ю. Котов,  
А. С. Димова

*Институт автоматизи и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1  
E-mail: alexandr@idisys.iae.nsk.su*

Предложены метод управления и структура программного обеспечения для решения задачи управления движением группы роботов по заданной траектории с сохранением выбранной конфигурации в условиях нестационарных динамических характеристик отдельных роботов.

*Ключевые слова:* управление группой мобильных роботов, синтез систем автоматического регулирования, адаптация параметров регулятора, моделирование, Robot Operating System.

DOI: 10.15372/AUT20190601

**Введение.** При решении задач наблюдения, исследования окружающей среды на большой площади, транспортирования груза совместное использование относительно простых роботов в составе единой группы эффективнее, чем одиночного робота сложной конструкции [1]. В то же время при построении системы в виде набора устройств, совместно работающих в группе, возникает необходимость в создании специализированных методов и алгоритмов управления, отличающихся от методов управления одиночным роботом [2].

Привлечение для выполнения задач смешанных групп роботов, действующих в различных средах, позволяет расширить области применения подобной гетерогенной системы за счет исключения ограничений в действиях отдельных представителей подобной группы. В работе [3] предлагается организовать симбиотическую роботизированную систему из беспилотного летательного аппарата (БПЛА) квадроспираторного типа и беспилотного наземного транспортного средства. В этой системе наземное транспортное средство обеспечивает безопасную площадку для посадки беспилотного летательного аппарата и его перевозку на большие дистанции, а БПЛА — увеличение степени свободы перемещения системы для наземного транспортного средства путём его переноса через непроходимые препятствия. При этом предлагается создание децентрализованного алгоритма координированного взаимодействия.

Для решения задачи определения позиции подвижной цели необходима система совместного управления группой роботов, действующих в двух средах (земля/воздух), устойчивая к отказам [4]. Предполагается создание, удержание, переключение конфигураций связи между роботами с применением механизмов оптимизации для построения законов управления роботами и расширенного фильтра Калмана для оценивания положения каждого робота. Этот подход к совместному слежению за целью позволяет минимизировать ошибку в определении положения цели, которое получается из расширенного фильтра Калмана, что достигается вычислением его предельной ковариации. При этом в критерий оптимальности помимо неопределённости положения цели входит функция, зависящая от

прогнозируемого расстояния между всеми совместно действующими роботами, которая определяет силу отталкивания для предотвращения столкновений. Тем самым формируются гибкая адаптивная конфигурация и локально-оптимальное управление, позволяющие учесть ограничения поиска цели и движения каждого робота, а также движения самой цели.

В качестве важного элемента при построении систем управления групповым взаимодействием роботов в различных средах выступает необходимость обеспечения устойчивости системы к ситуациям отказов, приводящих к потере эффективности управления отдельными роботами. Организация совместного взаимодействия роботов может базироваться на использовании схемы «лидер–ведомый», в которой лидер движется по заранее определённой траектории, а ведомым требуется поддерживать заданную конфигурацию относительно лидера. Синтез регулятора основывается на минимизации величин отклонения ведомых от требуемых положений. Для разработки таких систем целесообразно применять подходы, сформированные на принципах централизации и децентрализации [5–7].

В данной работе приведён способ построения системы управления группой мобильных роботов с дифференциальным приводом применительно к задаче координированного движения по программной траектории в условиях возмущений и частичной потери эффективности управления. Предложена многоконтурная структура системы регулирования, дополненная блоками адаптации к действию неизвестных и переменных факторов.

**Постановка задачи.** Бортовые системы управления роботами строятся на основе универсальных систем, таких как Robot Operation System (ROS) и Player Project, либо специализированного программного обеспечения, уникального для каждого робота. В таких бортовых системах можно выделить нижний уровень, отвечающий за получение данных с датчиков и управление моторами, и системы верхнего уровня, реализующие механизмы коммуникации, алгоритмы управления движением и взаимодействия. В универсальных и во многих специализированных системах входными параметрами для нижнего уровня бортовой системы управления являются команды задания линейной и угловой скорости робота. В то же время на параметры движения роботов значительное влияние оказывают внешние и внутренние факторы, например нестационарные характеристики приводных механизмов, неоднородность поверхности движения, наличие неизвестных преград и нагрузок [8, 9]. Действие этих факторов не позволяет реализовать заданные динамические характеристики системами управления нижнего уровня. В таких условиях целесообразно дополнить систему управления верхнего уровня контуром адаптации, который позволит компенсировать заранее неизвестные динамические характеристики отдельных роботов либо изменения этих характеристик в процессе движения.

Таким образом, в работе ставятся задача определения структуры и параметров системы управления для перемещения группы роботов по заданной траектории с погрешностью поддержания заданной конфигурации, не превышающей 5 % от расстояния между роботами, и задача разработки программного обеспечения действующей системы управления группой роботов.

При этом предлагается свести задачу управления группой роботов к задаче слежения каждым роботом за желаемым положением  $x_{r_i}$  относительно центра группы, которое определяется требуемой траекторией и распределением роботов, с необходимостью поддержания заданного расстояния между всеми роботами группы [10]. Требуемая траектория перемещения группы формируется в виде программного движения целевой точки по кусочно-линейным участкам между заданными точками пути либо по построенному через них сплайну.

Движение  $i$ -го робота при управлении линейной и угловой скоростью будем описывать

следующим дифференциальным уравнением в векторно-матричной форме [11]:

$$\dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{f}(\mathbf{x}_i)(\mathbf{u}_i - \mathbf{m}_i(t)), \quad (1)$$

где  $\mathbf{x}_i = [x_i, y_i, \psi_i]^\top$  — вектор состояния  $i$ -го робота (координаты и курсовой угол);  $\mathbf{u}_i = [v_i, \omega_i]^\top$  — вектор команд управления линейной и угловой скоростью;  $\mathbf{m}_i(t) = [m_{vi}(t), m_{\omega i}(t)]^\top$  — вектор зависящих от времени возмущений, которые вызваны проскальзыванием колёс, изменением нагрузок и заряда аккумулятора, а также другими факторами;  $\mathbf{f}(\mathbf{x}_i)$  — матричная функция вида  $\mathbf{f}(\mathbf{x}_i) = \begin{bmatrix} \cos \psi_i & \sin \psi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^\top$ . Пусть величина возмущений и скорость их изменения ограничены:

$$|m_{vi}(t)| \leq m_{vi \max}; \quad |m_{\omega i}(t)| \leq m_{\omega i \max}; \quad |\dot{m}_{vi}(t)| \leq \dot{m}_{vi \max}; \quad |\dot{m}_{\omega i}(t)| \leq \dot{m}_{\omega i \max}. \quad (2)$$

Наша цель — обеспечить в установившемся режиме движения для объектов с моделью (1) при возмущениях с ограничениями (2) уменьшение ошибки слежения за требуемым положением в соответствии с желаемым уравнением

$$\dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{F}(\mathbf{x}_i), \quad (3)$$

где  $\mathbf{F}(\mathbf{x}_i)$  — вектор желаемых значений старших производных переменных состояния:  $\mathbf{F}(\mathbf{x}_i) = \mathbf{A}(\mathbf{x}_{ri} - \mathbf{x}_i)$ .

Приведём способ построения следящей системы, которая обеспечивает управление перемещением отдельно взятого робота в заданную точку пространства координат, коррекцию положения этой точки в целях сохранения конфигурации группы роботов и их координированного движения при перемещении груза, а также адаптацию параметров регуляторов к изменению динамических характеристик роботов в процессе движения.

**Метод управления.** Основываясь на методе решения обратной задачи динамики [12–14], приравнивая правые части уравнений (1) и (3), запишем

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}_i) = \mathbf{f}(\mathbf{x}_i)(\mathbf{u}_i - \mathbf{m}_i(t)). \quad (4)$$

Умножая обе части уравнения (4) на  $\mathbf{f}^\top(\mathbf{x}_i)$  и учитывая, что в нашем случае  $\mathbf{f}^\top(\mathbf{x}_i)\mathbf{f}(\mathbf{x}_i) = \mathbf{I}$ , получим уравнение закона управления, которое обеспечивает заданное время сходимости процессов к желаемым в соответствии с (3):

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{f}^\top(\mathbf{x}_i)\mathbf{F}(\mathbf{x}_i) + \mathbf{m}_i(t). \quad (5)$$

Закон управления (5) содержит неизвестный нестационарный параметр  $\mathbf{m}_i(t)$ . Поэтому вместо (5) в качестве закона управления рассматривается уравнение с автоматически настраиваемыми параметрами, задача которых — скорректировать управление так, чтобы обеспечить инвариантность системы к действующим возмущениям:

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{f}^\top(\mathbf{x}_i)\mathbf{F}(\mathbf{x}_i) + \Theta_i. \quad (6)$$

Здесь  $\Theta_i$  — вектор автоматически настраиваемых параметров. Уравнение (6) определяет структуру системы с адаптивным управлением. В качестве алгоритма настройки параметров вектора  $\Theta_i$  используем уравнение вида [15]

$$\dot{\Theta}_i = -\mu^{-1}\mathbf{L}(\mathbf{x}_i)(\mathbf{F}(\mathbf{x}_i) - \dot{\mathbf{x}}_i), \quad (7)$$

где  $\mu$  — малый положительный коэффициент;  $\mathbf{L}(\mathbf{x}_i)$  — вспомогательная матричная функция, определяемая из условия устойчивости замкнутой системы. Уравнение (7) является частным случаем алгоритма скоростного градиента в дифференциальной форме [16].

Уравнение (1) с законом управления (6) описывают медленный контур управления перемещением робота в точку с заданными координатами. Уравнение (7) при достаточно малом параметре  $\mu$  представляет собой быстрый внутренний контур, который позволяет скорректировать управление и обеспечить заданные динамические характеристики робота в условиях возмущений.

Анализ процессов в замкнутой системе и поиск вида функции  $\mathbf{L}(\mathbf{x}_i)$  выполняется методом разделения движений [17]. Для этого введём быстрое время  $\tau = \mu^{-1}t$ , тогда уравнения процессов в замкнутой системе примут вид

$$\begin{cases} \mu^{-1} \frac{d}{d\tau} \Theta_i = -\mu^{-1} \mathbf{L}(\mathbf{x}_i) (\mathbf{F}(\mathbf{x}_i) - \mathbf{f}(\mathbf{x}_i) (\mathbf{u}_i - \mathbf{m}_i(\tau))); \\ \mu^{-1} \frac{d}{d\tau} \mathbf{x}_i = \mathbf{f}(\mathbf{x}_i) (\mathbf{f}^\top(\mathbf{x}_i) \mathbf{F}(\mathbf{x}_i) + \Theta_i - \mathbf{m}_i(\tau)). \end{cases} \quad (8)$$

При  $\mu \rightarrow 0$  и ограниченном темпе возмущений (2)

$$\begin{cases} \mathbf{x}_i = \text{const}, & \mathbf{m}_i(\tau) = \text{const}, \\ \frac{d}{d\tau} \Theta_i = \mathbf{L}(\mathbf{x}_i) (\mathbf{F}(\mathbf{x}_i) - \mathbf{f}(\mathbf{x}_i) (\mathbf{u}_i - \mathbf{m}_i)). \end{cases} \quad (9)$$

С учётом (6) получим

$$\frac{d}{d\tau} \Theta_i = \mathbf{L}(\mathbf{x}_i) \mathbf{f}(\mathbf{x}_i) \Theta - \mathbf{L}(\mathbf{x}_i) \mathbf{f}(\mathbf{x}_i) \mathbf{m}_i. \quad (10)$$

Уравнение (10) описывает быстрые процессы во внутреннем контуре настройки коэффициентов, которые устойчивы при  $\mathbf{L}(\mathbf{x}_i) \mathbf{f}(\mathbf{x}_i) < 0$ . В этом случае матричная функция  $\mathbf{L}(\mathbf{x}_i)$  может иметь вид  $\mathbf{L}(\mathbf{x}_i) = -\mathbf{f}^\top(\mathbf{x}_i)$ . В установившемся для быстрого контура режиме  $d\Theta_i/d\tau = 0$ , тогда

$$\Theta_i = \mathbf{m}_i(\tau). \quad (11)$$

Таким образом, закон настройки параметров регулятора примет вид

$$\dot{\Theta}_i = \mu^{-1} \mathbf{f}^\top(\mathbf{x}_i) (\mathbf{F}(\mathbf{x}_i) - \dot{\mathbf{x}}_i). \quad (12)$$

Наличие шумов при определении вектора состояния в навигационной системе роботов, основанной на использовании данных GPS или системы технического зрения, требует для вычисления производных в законе (12) применения дифференцирующих блоков с фильтрацией. Основу этих блоков может составлять структура динамической системы, сохраняющая свойства устойчивости при неограниченном коэффициенте усиления [18].

**Система управления.** Система управления каждым роботом создана на базе ROS, которая является современной и активно развиваемой системой с открытым исходным кодом для управления роботизированными устройствами [19]. Она предоставляет большой набор готовых библиотек и программных модулей, а также универсальный механизм коммуникации между ними, что позволяет строить сложные программные комплексы. Разработанная система управления включает набор независимых программ, взаимодействующих между собой посредством обмена сообщениями. Структура системы для каждого  $i$ -го робота показана на рис. 1. На схеме овальной рамкой обозначены программы, прямоугольной — сообщения. Стрелки показывают направление передачи сообщений.

В состав системы входят следующие программы:

- планирование маршрута (/path\_planning);
- моделирование движения робота, симулятор Gazebo (/gazebo);
- реализация закона управления (/control);

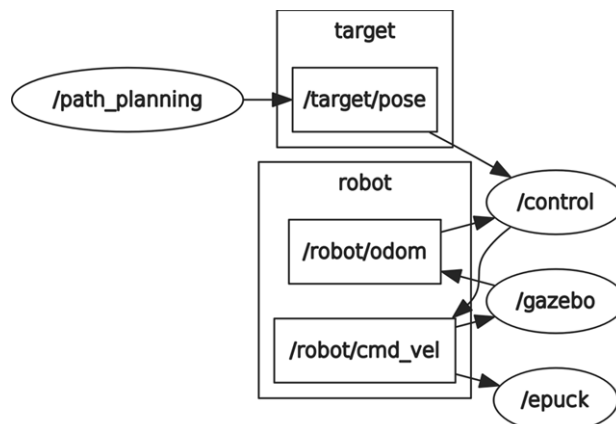


Рис. 1. Структура системы управления на базе ROS

— драйвер, формирующий команды управления роботу (/epuck).

Механизм работы данной системы характеризуется асинхронной передачей сообщений между перечисленными программами по принципу publish/subscribe [20]. Координаты очередной точки  $\mathbf{x}_{ri}$  для каждого робота вычисляются в модуле /path\_planning в зависимости от текущего положения лидера на траектории и заданного расположения роботов относительно лидера. Эти данные публикуются в системе и используются в модуле /control, где по уравнениям (3), (6), (12) на каждом шаге вычисляется вектор управления и публикуется сообщение /robot/cmd\_vel. Симулятор Gazebo на основе команд скоростей вычисляет положение робота в каждый момент времени.

Созданное программное обеспечение используется как для моделирования, так и для управления реальными роботами [21]. Для этого вместо симулятора запускаются драйверы, формирующие команды управления моторами. Драйверы являются отдельными программами, получающими сообщения /robot/cmd\_vel в системе ROS и преобразующими их в сигналы с широтно-импульсной модуляцией драйверов двигателей или задающими команды для системы управления нижнего уровня. Данные о координатах и углах ориентации каждого робота поступают от системы технического зрения с помощью модуля ar\_track\_alvar из состава ROS, обрабатывающего кадры с закреплённой сверху видеокамеры. При использовании роботов вне помещения информация о координатах может быть получена от навигационной системы, которая объединяет сигналы от разных источников.

Таким образом, разработаны метод управления и программная реализация системы управления группой роботов на базе ROS. Интеграция с симулятором Gazebo позволяет проводить моделирование различных ситуаций и исследовать качество работы системы.

**Численный эксперимент.** В целях изучения свойств предложенного алгоритма управления, вопроса устойчивости и решения поставленной задачи проведена серия численных экспериментов с использованием созданной программной системы управления при различных значениях входных параметров, когда в качестве маршрута задавались синусоида и кусочно-линейная траектория, а компоненты вектора возмущений  $\mathbf{m}_i(t)$  имели вид гармонических сигналов постоянной амплитуды и частоты. Проверено влияние наличия и отсутствия параметра  $\Theta_i$  в законе управления (6) на величину отклонения робота от заданного маршрута. В экспериментах использовались следующие значения параметров алгоритма управления:

$$A = \begin{bmatrix} 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 1,5 \end{bmatrix}; \quad \mu = 0,05. \quad (13)$$

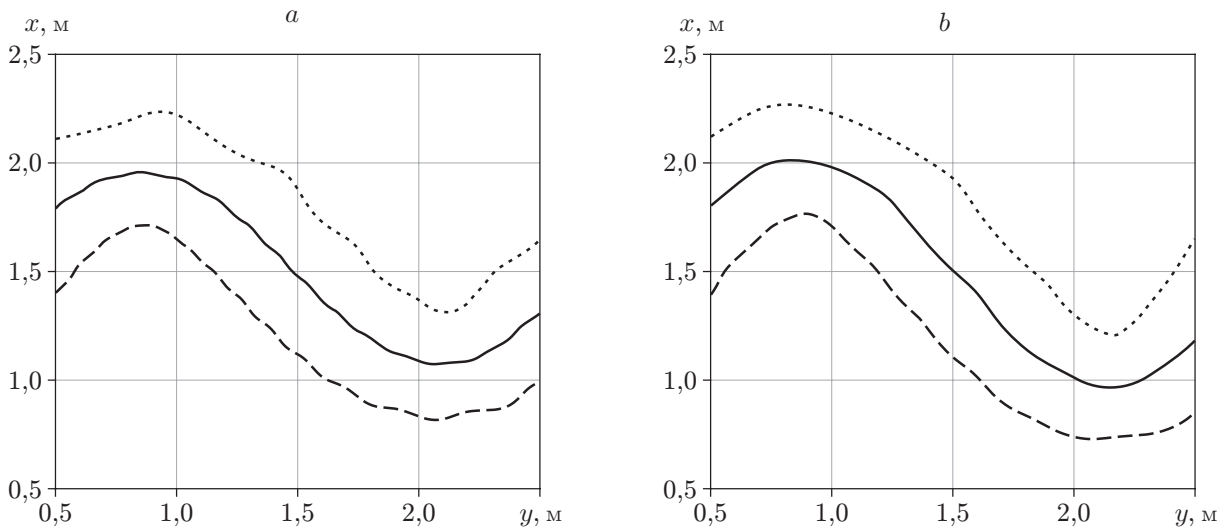


Рис. 2. Траектории движения группы роботов: при отсутствии (а) и наличии (б) настраиваемого параметра  $\Theta_i$  в законе управления

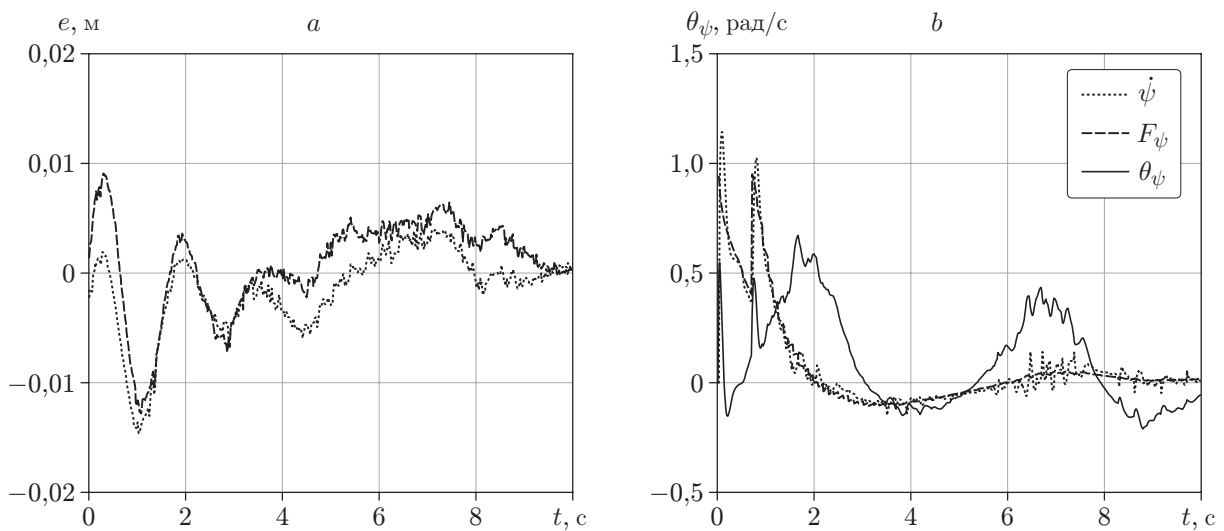


Рис. 3. Параметры движения: отклонения ( $e$ ) роботов от заданной позиции относительно лидера (а); сравнение реальных и желаемых значений старших производных курсового угла и изменение настраиваемого параметра регулятора (б)

Результаты моделирования движения группы из трёх роботов строим в условиях действия гармонических возмущений показаны на рис. 2.

Анализ работы системы с наличием контура коррекции желаемого положения каждого робота (рис. 3) показал возможность обеспечения координированного движения группы роботов, перемещающих груз по заданной траектории, с поддержанием необходимой конфигурации группы с погрешностью не более 5 % по данным численных экспериментов при требуемом расстоянии между роботами 0,2 м. При этом абсолютная величина отклонения роботов от заданных траекторий не превышала 0,01 м. В случае отсутствия контура коррекции величина отклонения роботов достигала 0,05 м. Характер процессов и числен-

ные значения величин отклонения от заданной позиции при моделировании движения по кусочно-линейным траекториям в установившемся режиме качественно не отличались от случая на рис. 3. Наличие адаптивной подстройки обеспечивает желаемые динамические характеристики по каналам управления, что в значительной степени уменьшает влияние рассмотренных возмущений на траектории движения каждого робота и на величину их отклонения от требуемого положения относительно лидера группы.

Таким образом, система управления обеспечивает движение роботов по требуемой траектории в условиях возмущений, а наличие в уравнении (6) параметра  $\Theta_i$  с законом изменения (12) уменьшает отклонение от маршрута до величины менее 0,01 м.

**Заключение.** Предложен метод управления движением группы роботов строем по программной траектории при возмущениях и заранее неизвестных динамических характеристиках. Использование внутреннего быстрого контура коррекции компенсирует действия возмущений и обеспечивает необходимые динамические характеристики по каналам управления для каждого робота в составе группы, что уменьшает отклонение роботов от желаемой позиции относительно лидера при совместном движении по заданной траектории. Представлена структура системы управления группой роботов на базе ROS, которая позволяет разделять функции управления между отдельными программами и изменять функциональность системы путём комбинирования различных модулей, включая моделирование, навигацию, построение карты местности, техническое зрение. Численные эксперименты показали, что ошибка поддержания заданной конфигурации группы составляет менее 5 % для рассмотренного типа возмущений.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и образования РФ (государственная регистрация № АААА-А17-117060610006-6).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ogren P., Fiorelli E., Leonard N. E.** Cooperative control of mobile sensor networks: Adaptive gradient climbing in a distributed environment // *IEEE Trans. Automatic Control*. 2004. **49**, N 8. P. 1292–1302.
2. **Dai Y., Choi K. S., Lee S. G.** Adaptive formation control and collision avoidance using a priority strategy for nonholonomic mobile robots // *Intern. Journ. Adv. Robot. Syst.* 2013. **10**, Iss. 2. P. 1–14.
3. **Petrovic T., Haus T., Arbanas B. et al.** Towards heterogeneous aerial-ground cooperative robot system for complex aerial manipulation tasks // *Proc. of the 12th Intern. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*. Colmar, France, 21–23 July, 2015. Vol. 1. P. 238–245.
4. **Hausman K., Müller J., Hariharan A. et al.** Cooperative multi-robot control for target tracking with onboard sensing // *The Intern. Journ. Robot. Research*. 2015. **34**, Iss. 13. P. 1660–1677.
5. **Lawton J. R., Beard R. W., Young B. J.** A decentralized approach to formation maneuvers // *IEEE Trans. Robot. Automation*. 2003. **19**, N 6. P. 933–941.
6. **Michael N., Fink J., Kumar V.** Cooperative manipulation and transportation with aerial robots // *Autonomous Robots*. 2011. **30**, N 1. P. 73–86.
7. **Yamashita A., Arai T., Ota J., Asama H.** Motion planning of multiple mobile robots for cooperative manipulation and transportation // *IEEE Trans. Robot. Automation*. 2003. **19**, N 2. P. 223–237.
8. **Park B. S., Yoo S. J.** Adaptive leader-follower formation control of mobile robots with unknown skidding and slipping effects // *Intern. Journ. Control, Automation and Syst.* 2015. **13**, N 3. P. 587–594.

9. **Jose V., Lounis A., Youcef M.** Adaptive leader-follower formation in cluttered environment using dynamic target reconfiguration // Proc. of the 12th Intern. Symp. on Distributed Autonomous Robotic Systems (DARS 2014). Tokyo: Springer, 2016. P. 237–254.
10. **Золотухин Ю. Н., Котов К. Ю., Мальцев А. С. и др.** Координированное управление группой роботов в задачах перемещения груза // Вычислительные технологии. 2016. **21**, № 1. С. 70–79.
11. **Канина К. В., Мальцев А. С., Цупа А. Е.** Создание экспериментальных роботов и алгоритмов управления в условиях возмущений // Тр. XIX Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара, Россия, 12–15 сент., 2017. С. 135–140.
12. **Бойчук Л. М.** Обратный метод структурного синтеза систем автоматического управления // Автоматика. 1966. № 6. С. 7–11.
13. **Бойчук Л. М.** Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. М.: Энергия, 1971. 112 с.
14. **Крутько П. Д.** Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. М.: Машиностроение, 2004. 576 с.
15. **Шпилевая О. Я., Мальцев А. С.** Об адаптивной стабилизации переключаемой системы // Науч. вестн. НГТУ. 2008. № 3 (33). С. 188–192.
16. **Андриевский Б. Р., Стоцкий А. А., Фрадков А. Л.** Алгоритмы скоростного градиента в задачах управления и адаптации // Автоматика и телемеханика. 1988. № 12. С. 3–39.
17. **Востриков А. С.** Синтез систем регулирования методом локализации. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. 252 с.
18. **Мееров М. В.** Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности. М.: Физматгиз, 1959. 284 с.
19. **Quigley M., Gerkey B., Conley K. et al.** ROS: An open-source Robot Operating System // Proc. of ICRA Workshop on Open Source Software. 2009. **3**, N 2. P. 45–49.
20. **Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р., Влиссидес Дж.** Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования. С.-Пб.: Питер, 2001. 368 с.
21. **Мальцев А. С., Мамонова К. Е., Щекочихин Т. П.** Создание систем управления роботизированными устройствами с использованием веб-технологий и ROS // Тр. X Общерос. молодёжной науч.-техн. конф. «Молодёжь. Техника. Космос». Санкт-Петербург, Россия, 18–20 апр., 2018. С. 32–33.

*Поступила в редакцию 21.08.2018*

*После доработки 24.06.2019*

*Принята к публикации 01.07.2019*

---