

Комплекс группового управления беспилотными аппаратами

К. Ю. Котов, А. С. Мальцев*, Е. Е. Пришляк, М. А. Соболев

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

*Контактный автор: Мальцев Александр Сергеевич, e-mail: alexandr@idisys.iae.nsk.su

Поступила 1 октября 2020 г., доработана 13 ноября 2020 г., принята в печать 20 ноября 2020 г.

Представлен стендовый комплекс, предназначенный для разработки, моделирования и экспериментальных исследований систем управления беспилотными аппаратами колесного, гусеничного и мультироторного типа. Рассмотрены алгоритмы и архитектура программного обеспечения комплекса, реализующего функции построения математических моделей динамики, определения пространственных координат и децентрализованного управления движением роботов в составе группы.

Ключевые слова: мобильные роботы, управление движением, моделирование, техническое зрение.

Цитирование: Котов К.Ю., Мальцев А.С., Пришляк Е.Е., Соболев М.А. Комплекс группового управления беспилотными аппаратами. Вычислительные технологии. 2021; 26(1):99–111. DOI:10.25743/ICT.2021.26.1.008.

Введение

В последнее время при управлении мобильными роботизированными устройствами на один из первых планов выходят задачи разработки алгоритмов управления совместным движением заданным строем [1, 2], перемещения крупного груза [3] или слежения за объектом [4]. Для возможности исследования характеристик и особенностей этих алгоритмов используется численное моделирование и проводятся эксперименты с реальными моделями роботов на специально созданных для этого полигонах и стендах [5–7]. При создании таких систем ключевыми являются задачи моделирования, определения пространственных координат, навигации, обмена данными между отдельными роботами в составе группы, разработки алгоритмов совместного движения, обхода препятствий и других роботов. Существующие комплексы решают частные задачи, например определение положения роботов в пространстве [6, 7] без возможности моделирования и управления движением.

Алгоритмы управления группой и роботами в ее составе можно ранжировать по степени осведомленности отдельных членов группы о состоянии всей системы. Для систем, в которых имеется связь между отдельными единицами, появляется возможность распределять цели, оценивая возможности роботов и состояния системы. Такой тип задач сводится к нахождению оптимального распределения ролей, которые решаются методами линейного программирования [8], подходами к построению мультиагентных систем [9], а также современными методами теории автоматического управления [10]. Кроме того, в распределенных системах решение может приниматься и на локальном уровне [11, 12].

В данной работе задача управления группой решается в предположении полной осведомленности роботов [3]. Обмен информацией осуществляется с помощью “доски объявлений”, представляющей собой базу данных, в которой содержится информация о действиях и состоянии каждого робота. Построение математических моделей динамики, управление траекторным движением группы с обходом препятствий, определение местоположения аппаратов в пространстве реализуются в виде отдельных программных модулей, взаимодействующих также с помощью “доски объявлений”.

Целью настоящего исследования является разработка программно-аппаратного комплекса управления группой беспилотных аппаратов для решения задачи совместного движения заданным строем по требуемому маршруту. Архитектура программного обеспечения, механизм обмена данными и алгоритмы управления должны обеспечивать возможность добавления нового робота в состав группы, возможность формирования как независимой задачи для каждого аппарата, так и единой задачи движения требуемым строем для всех роботов в составе группы. Комплекс должен поддерживать работу в режиме моделирования для исследования свойств алгоритмов управления движением и отработки компонентов системы, а также в режиме управления реальными роботами колесного, гусеничного и мультироторного типа.

1. Архитектура программного и аппаратного обеспечения

Исходя из поставленных требований возможности построения математических моделей динамики, алгоритмов децентрализованного управления движением роботов в составе группы и проведения экспериментальных исследований с прототипами роботов в структуру программно-аппаратного комплекса предложено включить моделирующий и экспериментальный стенды.

Модульное построение программного обеспечения комплекса позволяет без изменения предложенной структуры работать в режимах программного и программно-аппаратного моделирования, а также управления экспериментальными прототипами. Моделирующий стенд представляет собой набор специального конфигурируемого программного обеспечения, реализующего оригинальные методы моделирования динамики, навигации и управления движением автономных беспилотных аппаратов.

Экспериментальный стенд предназначен для проверки опытных образцов систем управления и программного обеспечения на реальных колесных, гусеничных и мультироторных аппаратах. Стенд включает поверхность движения, набор веб-камер для определения координат и углов ориентации аппаратов с применением технологий компьютерного зрения, вычислитель, на котором исполняется все программное обеспечение, набор колесных роботов со специальными платами расширения и квадрокоптеры. В качестве плат расширения используются как специализированные платы с операционной системой Linux и библиотекой Player Project, так и универсальные одноплатные компьютеры Raspberry Pi с компонентами ROS. Эти платы обеспечивают связь с колесными и летательными аппаратами по Wi-Fi и включают программное обеспечение управления конкретным роботом.

Программное обеспечение комплекса управления движением роботов написано на языке Python и представляет собой набор независимых процессов (модулей), обмен данными между которыми осуществляется через общий сервер данных по принципу “доска объявлений” на основе сетевого хранилища данных Redis. Комплекс включает несколько модулей.

Модуль управления отдельным роботом. Формирует сигналы управления линейной и угловой скоростями на основе информации о текущем и желаемом положении робота в каждый момент времени. Для расчета текущего положения используется навигационная система на основе фильтра Калмана, в которой данные модели движения объединяются с данными о координатах от внешней системы технического зрения. Математический алгоритм формирования команд управления движением описан ниже. Передача команд линейной и угловой скоростей на исполнительные механизмы робота происходит через драйвер бортовой системы на основе Player Project или Robot Operating System (ROS) [13].

Модуль моделирования отдельного робота. Включает математическую модель движения колесного или мультироторного беспилотного аппарата, получает на вход сигналы от блока управления движением отдельного робота, вычисляет и публикует текущие координаты и углы ориентации аппарата. Модуль предназначен для использования комплекса в режиме моделирования для отработки программного обеспечения и исследования свойств алгоритмов управления движением отдельного робота и группы роботов в целом.

Модуль определения пространственных координат. Представлен двумя процессами, первый из которых является TCP-клиентом, собирающим данные от системы технического зрения Swtrack [14], а второй процесс выполняет обработку полученных данных и запись информации о текущем положении каждого робота и его курсовом угле в общий сервер данных. Система технического зрения получает данные от закрепленных сверху веб-камер, совместно откалиброванных в единой системе координат, привязанной к плоскости движения роботов. В развитии данного комплекса система технического зрения на базе Swtrack заменена на модуль `ar_track_alvar` [15] из состава Robot Operating System. В обоих случаях на роботах устанавливаются специальные маркеры. В отличие от Swtrack система на базе AR-маркеров позволяет определять не только две координаты и курсовой угол по маркеру, но и полный набор из трех координат и трех углов ориентации робота.

Модуль визуализации. Это графическая программа индикации положения и ориентации каждого робота и груза, реализованная на основе библиотек GTK и Cairo. Программа также обеспечивает ввод команд от оператора, которые позволяют задавать строй роботов и маршрут движения на карте местности (рис. 1).

Модуль управления группой. Обеспечивает процесс формирования высокоуровневых команд для систем управления индивидуальным роботом и траектории движения группы, а также распределения роботов относительно лидера группы. В качестве общего сервера данных используется Redis-server, который обеспечивает хранение в оперативной памяти данных по принципу ключ – значение и предоставляет остальным процессам доступ к этим данным на запись и чтение через TCP-соединение. Система управления группой получает команду от оператора и выставляет информацию о строе и положении каждого робота относительно лидера группы. Каждый робот действует независимо от других в соответствии с командой для всей группы, данными о положении лидера группы, требуемом расположении относительно него и данными о положении других роботов во избежание коллизий. Роботы, получая команду и остальные данные, начинают движение, выдерживая заданное положение относительно лидера группы в соответствии с математическими алгоритмом управления. Каждый робот выставляет свой текущий статус в сетевом хранилище, по которому модуль управления группировкой выставляет статус всей группы для индикации оператору. После завершения действия



Рис. 1. Графический интерфейс пользователя: индикация положения роботов и планирование маршрута

Fig. 1. Graphical user interface: indication of robot position and route planning

каждый робот выставляет флаг о завершении текущей команды, и, когда флаги от всех роботов выставлены, управление группой формирует сигнал о выполнении текущей команды всей группой.

Управление беспилотным аппаратом в составе группы осуществляется с использованием программного модуля приведения объекта в целевое положение, модуля определения идентификатора и координат объекта, а также модуля клиента к бортовой системе управления. Обмен данными между программными модулями осуществляется через организацию общего ресурса памяти сервера данных Redis. Необходимая для управления движением объекта информация о координатах объекта и данных, полученных от бортовых сенсоров, поступает на сервер данных. Все программные модули функционируют как независимые процессы в асинхронном режиме.

В процессе определения идентификатора и координат объекта происходит обработка изображения от видеокамер системы определения координат объектов. Задачи, выполняемые программным модулем определения идентификатора и координат объекта, включают в себя цветовые преобразования видеопотока, пороговую обработку видеокадров, поиск и распознавание маркеров, расчет абсолютных координат.

После определения и идентификации объектов выполняется чтение команды от системы управления группировкой с сервера данных. В подпрограммах приведения роботов в целевое положение выполняется сравнение полученной команды с известными и запускается соответствующий программный модуль. Структурная схема программного обеспечения приведена на рис. 2.

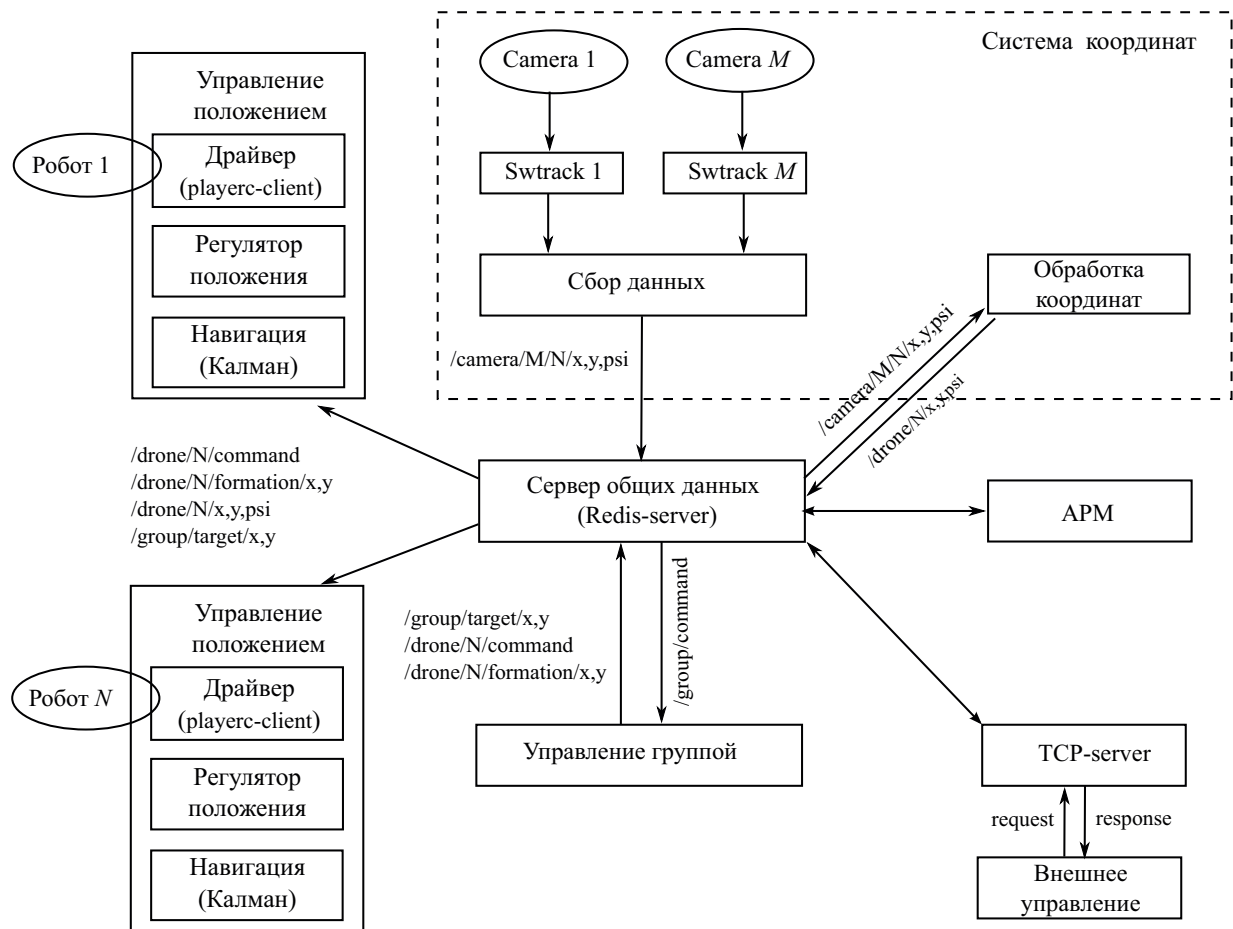


Рис. 2. Структурная схема программного обеспечения
 Fig. 2. The software block diagram

Предложенная архитектура позволяет формировать заданную конфигурацию программных модулей для конкретной решаемой задачи, добавляя новые или отключая имеющиеся в зависимости от цели. Конфигурация запускаемых модулей описывается в XML-файлах, содержащих идентификатор каждого процесса, имя исполняемого файла и параметры запускаемых процессов, такие как идентификаторы роботов, их IP-адреса, вид алгоритмов управления и коэффициенты. Таким образом обеспечивается возможность хранить конфигурации комплекса под каждую конкретную задачу управления реальными роботами или варианты моделирования и оперативно подключать требуемую конфигурацию. В результате программное обеспечение комплекса группового управления в режимах моделирования и управления реальными объектами позволяет решать следующий набор задач:

- обмен данными и командами с внешней системой управления и индикации;
- формирование требуемой конфигурации группы беспилотных аппаратов по принципу лидер – ведомые;
- автоматическое управление движением группы по заданной траектории;
- формирование команд движения отдельного аппарата с учетом уклонения от столкновений с другими объектами группы и препятствиями;
- разработка и исследование алгоритмов управления движением;
- сохранение сигналов для последующего анализа.

2. Децентрализованный алгоритм управления движением

Комплекс позволяет использовать различные способы управления движением как отдельных аппаратов, так и их групп. В этом разделе описан алгоритм управления, входящий в состав алгоритмического и программного обеспечения комплекса и применяющийся при создании стенда группового управления колесными роботами.

Для решения задачи совместного движения строим предлагается сформировать группу из нескольких роботов, расположенных в требуемом районе. Среди этих машин случайным образом выбирается лидер, относительно которого задаются местоположение остальных устройств в процессе движения по принципу фиксированного пеленга и расстояние до лидера. На рис. 3 приведены два варианта такого построения. Ромбами обозначено требуемое местоположение каждого устройства в строю; $\Delta\psi$ — разница между текущим курсовым углом робота и направлением на требуемое местоположение в строю.

Таким образом, задачу управления движением группы роботов предлагается свести к задаче слежения каждым роботом за желаемым положением относительно лидера группы. Требуемая траектория перемещения группы формируется в виде программного движения целевой точки по кусочно-линейным участкам между заданными путевыми точками либо по построенному через них сплайну.

Без учета инерционных характеристик приводных механизмов и проскальзывания колес движение i -го робота описывается следующими дифференциальными уравнениями в векторно-матричной форме [16, 17]:

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

где $\mathbf{x}_i = [x_i, y_i, \psi_i]^T$ — вектор состояния i -го робота (координаты и курсовой угол); $\mathbf{u}_i = [v_i, \omega_i]^T$ — вектор команд управления линейной и угловой скоростью; $\mathbf{f}(\mathbf{x}_i) = \begin{bmatrix} \cos \psi_i & \sin \psi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$ — матричная функция.

Потребуем от системы управления уменьшения ошибки слежения за требуемым положением с соответствии с дифференциальными уравнениями

$$\dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{F}(\mathbf{x}_i). \quad (2)$$

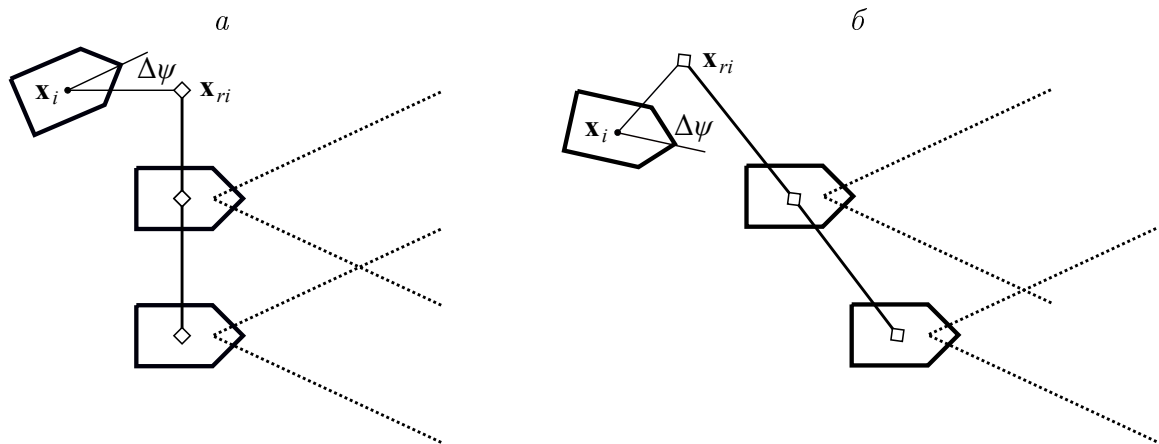


Рис. 3. Движение строем: в линию (а) и уступом (б)
Fig. 3. Formation motion: in a line (a) and a ledge (b)

Здесь $\mathbf{F}(\mathbf{x}_i)$ — вектор желаемых значений старших производных переменных состояния: $\mathbf{F}(\mathbf{x}_i) = \mathbf{A}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{ri})$; \mathbf{x}_{ri} — требуемое положение робота относительно лидера группы, которое вычисляется по текущим координатам лидера, требуемому пеленгу и дистанции до него.

Используя метод решения обратной задачи динамики [18], приравнявая правые части уравнений (1) и (2) и домножив обе части на $\mathbf{f}^T(\mathbf{x}_i)$ с учетом, что для текущей матричной функции $\mathbf{f}^T(\mathbf{x}_i)\mathbf{f}(\mathbf{x}_i) = \mathbf{I}$, получим алгоритм управления движением i -го робота в составе группы

$$\mathbf{u} = \mathbf{f}^T(\mathbf{x}_i)\mathbf{F}(\mathbf{x}_i). \quad (3)$$

При этом величины линейной и угловой скорости уравнения (3) преобразуются в значения управляющих ШИМ-сигналов драйверов двигателей конкретных роботов (ШИМ — широтно-импульсная модуляция). При некоторых перестроениях и маневрах возможны столкновения между машинами. Кроме того, необходимо учесть препятствия на пути роботов. Дополним вычисление требуемого положения каждого робота относительно лидера смещением в сторону от препятствий

$$\hat{\mathbf{x}}_{ri} = \mathbf{x}_{ri} + \mathbf{g}(\mathbf{x}_i), \quad (4)$$

где $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = [g_x(\mathbf{x}_i), g_y(\mathbf{x}_i), 0]^T$ — векторная функция, компоненты которой вычисляются по уравнениям

$$g_j = k_g \left(\frac{d_r}{d_j - r} - \frac{d_r}{r} \right), \quad g_x(\mathbf{x}_i) = \sum g_j \cos \gamma_j, \quad g_y(\mathbf{x}_i) = \sum g_j \sin \gamma_j. \quad (5)$$

Здесь k_g — положительный коэффициент; d_r — допустимое расстояние до препятствия; r — радиус зоны минимального сближения; γ_j — обратный угол на j -е препятствие (рис. 4). Суммирование выполняется по всем препятствиям и другим роботам, расстояния d_j до которых меньше d_r .

В результате замкнутая система управления описывается уравнениями (1), (3), где при расчете векторной функции желаемых значений старших производных используются смещенные желаемые положения роботов (4) относительно лидера группы $\mathbf{F}(\mathbf{x}_i) = \mathbf{A}(\hat{\mathbf{x}}_{ri} - \mathbf{x}_i)$. Структурная схема управления каждым роботом показана на рис. 5.

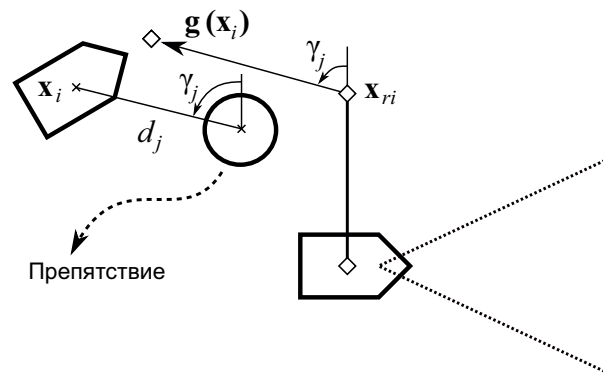


Рис. 4. Уклонение от препятствия

Fig. 4. Obstacle avoidance

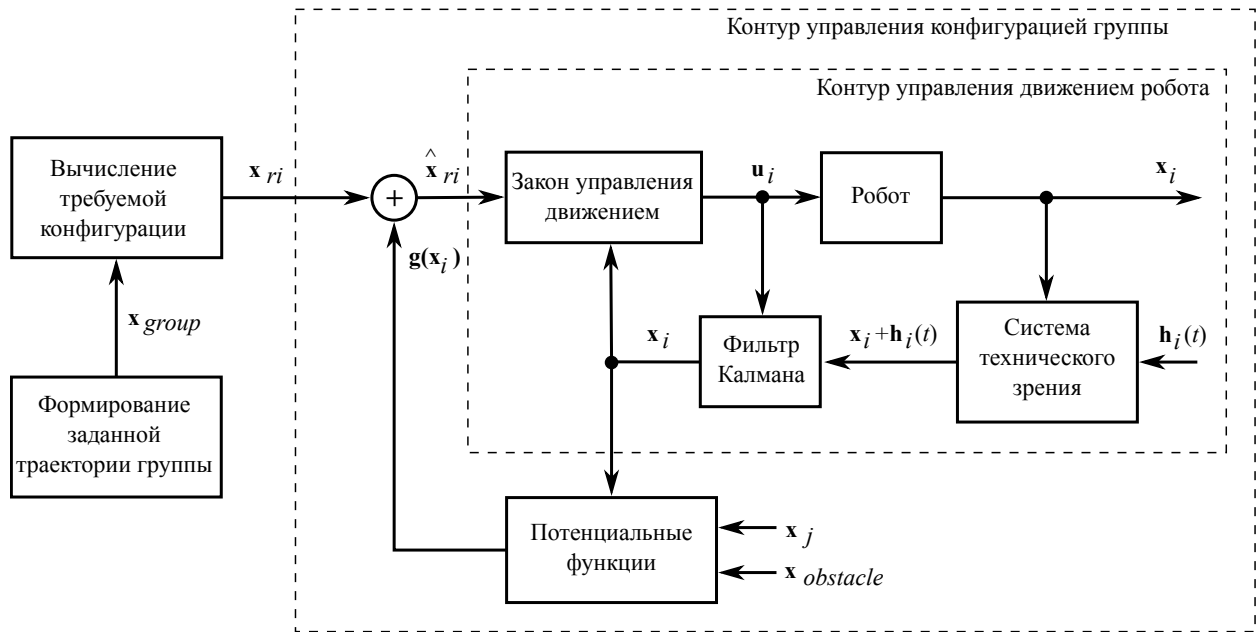


Рис. 5. Структурная схема системы управления
 Fig. 5. The control system block diagram

3. Результаты программного моделирования

Для проверки алгоритмического и программного обеспечения, исследования свойств алгоритмов управления предложено использовать режим программного моделирования. В этом режиме запускаются программы, моделирующие движение отдельных роботов с учетом алгоритмов управления движением, программа управления совместным движением группы роботов, формирующая заданные значения положения лидера группы и требуемое распределение роботов относительно него, программа визуализации. Об-

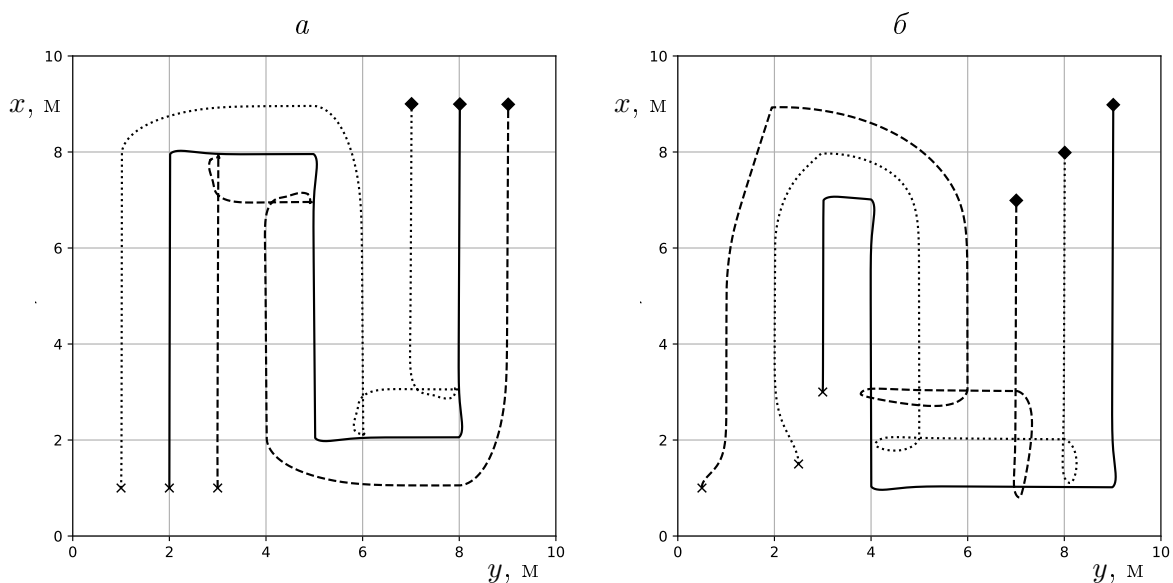


Рис. 6. Траектории роботов при моделировании движения строем: в линию (а) и уступом (б)
 Fig. 6. Motion trajectory for formation: in a line (a) and a ledge (b)

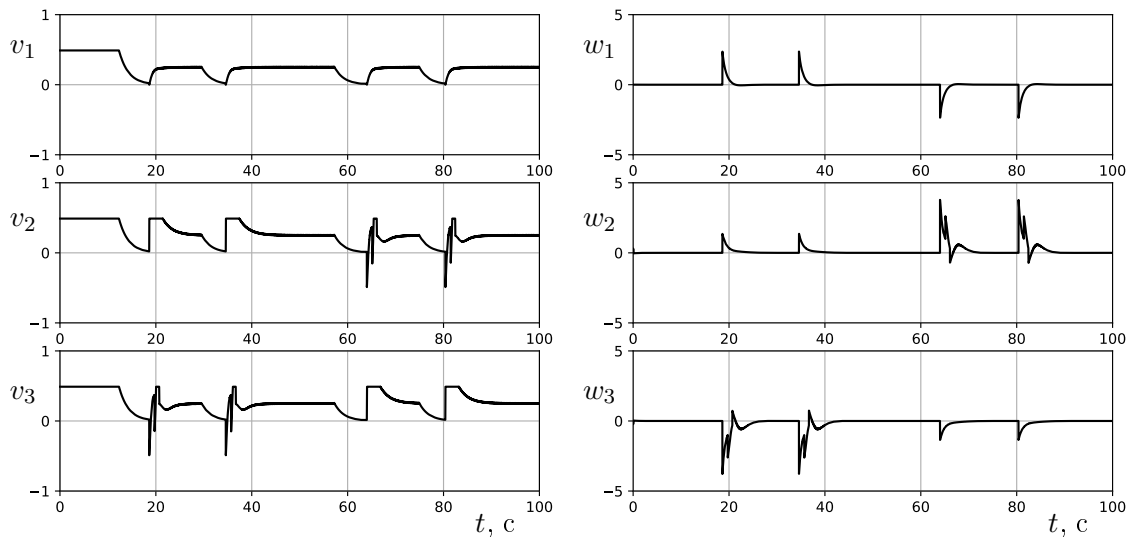


Рис. 7. Команды управления роботами при движении строем в линию

Fig. 7. Controls for robots motion in line formation

мен данными между программами происходит через общий сервер данных или через механизм обмена сообщениями из состава Robot Operating System [19]. На рис. 6 и 7 показаны варианты моделирования обследования тремя роботами поля 10×10 м при расстоянии между траекториями в 1 м с учетом уравнений (1)–(5). На рис. 6 траектория лидера обозначена сплошной линией, ведомых — штриховой и пунктирной. Крестиками отмечено начальное положение, ромбами — конечное. При моделировании задавались следующие параметры алгоритма управления:

$$\mathbf{A} = \text{diag} \{0.5, 0.5, 1.5\}, \quad k_g = 1, \quad d_r = 0.75, \quad r = 0.5. \quad (6)$$

Предложенный алгоритм предоставляет возможность использовать нескольких роботов для совместного движения заданным строем, например в задаче обследования большой территории. При этом движение строем в линию обеспечило более равномерное распределение траекторий по площади по сравнению со случаем движения строем в уступе.

Заключение

Для управления группой подвижных автономных объектов разработан программно-аппаратный комплекс, включающий математические алгоритмы формирования управляющих команд, которые обеспечивают движение по заданным траекториям, поддержание требуемого расположения объектов в группе и перестроение группы, методы обхода препятствий, оценивания и компенсации погрешности алгоритмов определения местоположения при автономном движении в заранее неизвестном окружении. Представлены результаты программного моделирования движения заданным строем группы из трех роботов по требуемой траектории.

Наличие в составе комплекса универсальных методов управления, средств для моделирования и тестирования позволяет сократить время разработки и затраты, связанные с созданием систем управления для реальных объектов. В качестве объектов могут выступать как наземные роботы, так и беспилотные летательные аппараты, применение которых может существенно сэкономить человеческие ресурсы и повысить эффективность в обеспечении безопасности жизнедеятельности. Комплекс позволяет уменьшить

затраты, связанные с разработкой, реализацией и тестированием систем управления как единичными, так и группами беспилотных аппаратов. Особенностью комплекса является возможность его использования без модификации алгоритмического обеспечения как в задачах программного и программно-аппаратного моделирования систем управления группой беспилотных аппаратов, так и в задачах управления реальными роботизированными устройствами.

Разработанный комплекс применялся при создании стенда группового управления колесными роботами и проверке алгоритмов управления полетом по заданной траектории квадродоторных беспилотных аппаратов.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (№ государственной регистрации АААА-А17-117060610006-6).

Список литературы

- [1] **Ogren P., Fiorelli E., Ehrich L.N.** Cooperative control of mobile sensor networks: Adaptive gradient climbing in a distributed environment. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2004; 49(8):1292–1302.
- [2] **Jose V., Lounis A., Youcef M.** Adaptive leader–follower formation in cluttered environment using dynamic target reconfiguration. *Distributed Autonomous Robotic Systems. Part of the Springer Tracts in Advanced Robotics book series*. 2016; (112):237–254.
- [3] **Ortiz J.S., Aldas J.V., Andaluz V.H.** Mobile manipulators for cooperative transportation of objects in common. *Towards Autonomous Robotic Systems: 18th Annual Conference (TAROS, Guildford, UK, July 19–21, 2017)*. Part of the *Lecture Notes in Computer Science*. 2017; (10454):651–660. DOI:10.1007/978-3-319-64107-2_53.
- [4] **Hausman K., Muller J., Hariharan A., Ayanian N., Sukhatme G.** Cooperative multi-robot control for target tracking with onboard sensing. *The International Journal of Robotics Research*. 2015; (34):1660–1677.
- [5] **Chamanbaz M., Mateo D., Zoss B.M., Tokic G., Wilhelm E., Bouffanais R., Dick K. Yue P.** Swarm-enabling technology for multi-robot systems. *Frontiers in Robotics and AI*. 2017; (4):11–22.
- [6] **Zheng W., Zhou F., Wang Z.** External vision based robust pose estimation system for a quadrotor in outdoor environments. *Proceedings of the 3rd International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods (ICPRAM-2014)*. Setubal: Science and Technology Publications; 2014: 718–723.
- [7] **Millard A.G., Hilder J.A., Timmis J., Winfield A.F.T.** A low-cost real-time tracking infrastructure for ground-based robot swarms. *Proceedings of the 9th International Conference (ANTS 2014)*. Gewerbestr: Springer International Publishing; 2014: 172–184.
- [8] **Borrelli F., Subramanian D., Raghunathan A.U., Biegler L.T.** MILP and NLP techniques for centralized trajectory planning of multiple unmanned air vehicles. *Proceedings of the 2006 American Control Conference*. Minneapolis: IEEE; 2006: 217–223.
- [9] **Figat M., Zielinski C.** Methodology of designing multi-agent robot control systems utilising hierarchical Petri nets. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA-2019)*. Montreal: IEEE; 2019: 44–50.

- [10] **Белоконь С.А., Золотухин Ю.Н., Котов К.Ю., Мальцев А.С., Нестеров А.А., Соболев М.А., Филиппов М.Н., Ян А.П.** Управление мобильными роботами в составе группы лидер–ведомые. Мехатроника, автоматизация, управление. 2016; 17(3):166–172. (In Russ.)
- [11] **Каляев И.А., Капустян С.Г., Гайдук А.Р.** Самоорганизующиеся распределенные системы управления группами интеллектуальных роботов, построенные на основе сетевой модели. Управление большими системами. 2010; (30.1):605–639.
- [12] **Luo L., Chakraborty N., Sycara K.** Distributed algorithm design for multirobot task assignment with deadlines for tasks. Proceedings 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2013; 3007–3013.
- [13] **Quigley M., Conley K., Gerkey B.P., Faust J., Foote T., Leibs J., Wheeler R., Ng A.Y.** Ros: An open-source robot operating system. Proceedings of ICRA Workshop on Open Source Software. IEEE; 2009; (3):142–146.
- [14] **Lochmatter T., Roduit P., Cianci C., Correll N., Jacot J., Martinoli A.** Swistrack — A flexible open source tracking software for multi-agent systems. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE; 2008: 4004–4010.
- [15] ROS AR TRACK ALVAR Package Summary. Available at: http://wiki.ros.org/ar_track_alvar.
- [16] **Юркевич Е.И.** Управление роботами и робототехническими системами: Учебное пособие. СПб: СПбГТУ; 2000: 171.
- [17] **Park B.S, Yoo S.J.** Adaptive leader–follower formation control of mobile robots with unknown skidding and slipping effects. International Journal of Control, Automation and Systems. 2015; 13(3):587–594.
- [18] **Крутько П.Д.** Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. М.: Машиностроение; 2004: 576.
- [19] **Мальцев А.С., Мамонова К.Е., Щекочихин Т.П.** Построение систем управления роботизированными устройствами с использованием веб-технологий и ROS. Труды X Общероссийской молодежной научно-технической конференции “Молодежь. Техника. Космос”. Санкт-Петербург, Россия, 18–20 апреля 2018; (2):116–120.

Group control complex for unmanned vehicles

KOTOV KONSTANTIN YU., MALTSEV ALEXANDER S.*, PRISHLYAK ELIZAVETA E.,
SOBOLEV MAXIM A.

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia

*Corresponding author: Maltsev Alexander S., e-mail: alexandr@idisys.iae.nsk.su

Received October 10, 2020, revised November 13, 2020, accepted November 20, 2020

Abstract

The purpose of this work is to develop the test bench for modelling and controlling a group of wheeled and multi-rotor unmanned vehicles. Such test bench should solve the problems of studying the control algorithms of individual robots and their groups which ensure the formation of a group of robots with a given orientation in space and automatically control their joint movement along the desired trajectory with preserving the spatial configuration.

The solution is achieved using the proposed software and hardware architecture, which is a set of independent programs that exchange signals through the Redis shared data server or through the Robot Operating System.

The result is the control system for group of mobile robots that includes the motion surface, the technical vision system, mathematical methods of motion control and specialized software. This test bench can reduce the costs associated with the development, implementation, and testing of unmanned vehicle control systems.

Keywords: mobile robots, motion control, simulation, technical vision.

Citation: Kotov K.Yu., Maltsev A.S., Prishlyak E.E., Sobolev M.A. Group control complex for unmanned vehicles. Computational Technologies. 2021; 26(1):99–111. DOI:10.25743/ICT.2021.26.1.008. (In Russ.)

Acknowledgements. This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state registration No. AAAA-A17-117060610006-6).

References

1. **Ogren P., Fiorelli E., Ehrich L.N.** Cooperative control of mobile sensor networks: Adaptive gradient climbing in a distributed environment. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2004; 49(8):1292–1302.
2. **Jose V., Lounis A., Youcef M.** Adaptive leader–follower formation in cluttered environment using dynamic target reconfiguration. *Distributed Autonomous Robotic Systems. Part of the Springer Tracts in Advanced Robotics book series*. 2016; (112):237–254.
3. **Ortiz J.S., Aldas J.V., Andaluz V.H.** Mobile manipulators for cooperative transportation of objects in common. *Towards Autonomous Robotic Systems: 18th Annual Conference (TAROS, Guildford, UK, July 19–21, 2017). Part of the Lecture Notes in Computer Science*. 2017; (10454):651–660. DOI:10.1007/978-3-319-64107-2_53.
4. **Hausman K., Muller J., Hariharan A., Ayanian N., Sukhatme G.** Cooperative multi-robot control for target tracking with onboard sensing. *The International Journal of Robotics Research*. 2015; (34):1660–1677.
5. **Chamanbaz M., Mateo D., Zoss B.M., Tokic G., Wilhelm E., Bouffanais R., Dick K. Yue P.** Swarm-enabling technology for multi-robot systems. *Frontiers in Robotics and AI*. 2017; (4):11–22.
6. **Zheng W., Zhou F., Wang Z.** External vision based robust pose estimation system for a quadrotor in outdoor environments. *Proceedings of the 3rd International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods (ICPRAM-2014)*. Setubal: Science and Technology Publications; 2014: 718–723.
7. **Millard A.G., Hilder J.A., Timmis J., Winfield A.F.T.** A low-cost real-time tracking infrastructure for ground-based robot swarms. *Proceedings of the 9th International Conference (ANTS 2014)*. Gewerbestr: Springer International Publishing; 2014: 172–184.
8. **Borrelli F., Subramanian D., Raghunathan A.U., Biegler L.T.** MILP and NLP techniques for centralized trajectory planning of multiple unmanned air vehicles. *Proceedings of the 2006 American Control Conference*. Minneapolis: IEEE; 2006: 217–223.
9. **Figat M., Zielinski C.** Methodology of designing multi-agent robot control systems utilising hierarchical Petri nets. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA-2019)*. Montreal: IEEE; 2019: 44–50.
10. **Belokon' S.A., Zolotukhin Yu.N., Kotov K.Yu., Mal'tsev A.S., Nesterov A.A., Sobolev M.A., Filippov M.N., Yan A.P.** Control of the mobile robots in a leader–follower formation. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2016; 17(3):166–172. (In Russ.)

11. **Kalyaev I.A., Kapustyan S.G., Gaiduk A.R.** Self-organizing distributed control systems of intellectual robot groups constructed on the basis of network model. *Upravlenie Bol'shimi Sistemami*. 2010; (30.1):605–639. (In Russ.)
12. **Luo L., Chakraborty N., Sycara K.** Distributed algorithm design for multirobot task assignment with deadlines for tasks. *Proceedings 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2013; 3007–3013.
13. **Quigley M., Conley K., Gerkey B.P., Faust J., Foote T., Leibs J., Wheeler R., Ng A.Y.** Ros: An open-source robot operating system. *Proceedings of ICRA Workshop on Open Source Software*. IEEE; 2009; (3):142–146.
14. **Lochmatter T., Roduit P., Cianci C., Correll N., Jacot J., Martinoli A.** Swistrack — A flexible open source tracking software for multi-agent systems. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE; 2008: 4004–4010.
15. ROS AR TRACK ALVAR Package Summary. Available at: http://wiki.ros.org/ar_track_alvar.
16. **Yurkevich E.I.** *Upravlenie robotami i robototekhnicheskimi sistemami: Uchebnoe posobie [Management of Robots and Robotic Systems]*. SPb: SPbGTU; 2000: 171. (In Russ.)
17. **Park B.S., Yoo S.J.** Adaptive leader–follower formation control of mobile robots with unknown skidding and slipping effects. *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2015; 13(3):587–594.
18. **Krutko P.D.** *Obratnye zadachi dinami v teorii avtomaticheskogo upravleniya [Inverse Problems in Control System Theory]*. Moscow: Mashinostroenie; 2004: 576. (In Russ.)
19. **Mal'tsev A.S., Mamonova K.E., Shchekochikhin T.P.** Design control systems for robotic devices using web technologies and ROS. *Proceedings of the X All-Russian youth scientific and technical conference “Youth. Technic. Space”*. Saint Petersburg, Russia, April 18–20, 2018. Saint Petersburg: Baltic State Technical University; 2018; (2):116–120. (In Russ.)