

# СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РОБОТОВ И АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ВОЗМУЩЕНИЙ

К.В. Канина<sup>1</sup>, А.С. Мальцев<sup>2</sup>, А.Е. Цупа<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Специализированный учебно-научный центр НГУ  
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 11, Россия

<sup>2</sup> Институт автоматики и электрометрии СО РАН  
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, Россия  
alexandr@idisys.iae.nsk.su  
тел: +7 (383) 333-26-25

**Ключевые слова:** *конструирование роботов, управление группой мобильных роботов, синтез систем автоматического регулирования*

## Abstract

We consider the design of our own robots, the structure of its software and we suggest the method for solving the control problem in disturbance conditions. The method is based on compensation the disturbances in the special organized fast control loop. The simulation results are presented.

## Введение

Беспилотные роботизированные системы находят широкое применение в повседневной жизни, что ставит необходимость в решении научных задач создания и исследования алгоритмов управления ими. В задачах изучения окружающей среды на большой площади, поиска и слежения за целью, транспортирования груза, совместное использование относительно простых устройств в составе единой группы считается более эффективным, чем применение одиночного механизма сложной конструкции. Для перемещения груза распространен подход «caging». Группа автономных транспортных средств окружает объект и двигает его вместе, контролируя местоположение каждого представителя группы [1]. Специальные алгоритмы управления отвечают за сохранение конфигурации. Для этого применяются методы, основанные на схеме «лидер-ведомые», в которой лидер движется по заданной траектории, а ведомые поддерживают требуемое местоположение [2-5]. Подобные подходы предлагаются и для управления беспилотным городским транспортом [6].

В докладе рассматривается конструкция собственных роботов для проведения экспериментов с системами управления группой автономных транспортных средств и предложен способ построения системы управления, позволяющий обеспечить заданные динамические характеристики таких роботов. Представлены результаты вычислительных экспериментов, показывающие уменьшение ошибки поддержания заданной конфигурации группы роботов при совместном движении в условиях возмущений.

## 1 Постановка задачи

Для создания и изучения алгоритмов управления беспилотным транспортом в реальных условиях возникла задача создания отечественной мобильной платформы, пригодной для научных экспериментов, обладающей хорошими вычислительными ресурсами, средствами коммуникации и имеющей невысокую стоимость. Разрабатываемая платформа должна быть пригодна для следующих задач:

- Исследование алгоритмов управления в заранее неизвестном окружении.
- Исследование методов навигации и построения плана местности.
- Исследование механизмов коммуникации и взаимодействия роботов.
- Исследование алгоритмов совместного движения группы роботов.

## 2 Создание экспериментальных роботов

В ходе работы создан прототип мобильной платформы (рисунок 1), представляющий конструкцию из нескольких уровней. Платформа оснащена инфракрасными датчиками, моторами постоянного тока, платой управления с микроконтроллером STM32 и драйвером двигателей, бортовым компьютером Raspberry Pi и камерой. Микроконтроллер решает задачи управления механизмами и датчиками, одноплатный компьютер - алгоритмами движения и коммуникацией с оператором или другими роботами.

Программное обеспечение для микроконтроллера STM32 разработано с использованием библиотеки SMT32Cube [7] и операционной системы реального времени FreeRTOS [8]. Программа разбита на независимые задачи с возможностью добавления новых:

- UARTTask - получение команд от бортового компьютера, исполнение и передача ответа.
- StateTask - контроль состояния робота и показаний датчиков.
- IndicatorTask - индикация статуса исполнения программы и напряжения аккумуляторной батареи.

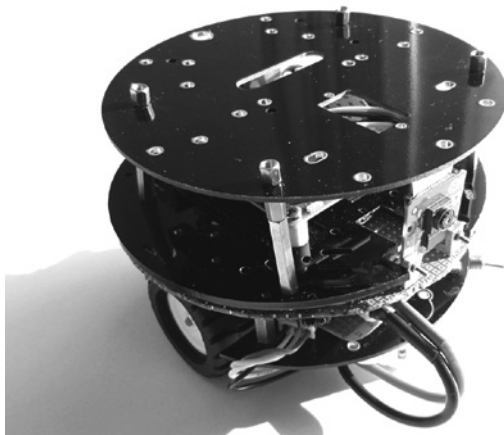


Рисунок 1 – Внешний вид прототипа

Бортовой компьютер реализует функции веб-сервера, автономную навигацию и управление. Модуль автономной навигации основан на расчете и коррекции координат робота и его курсового угла на основе фильтра Калмана. Выходные данные этого модуля используются для автономного движения в точку с заданными координатами. Веб-интерфейс удаленного управления для оператора включает поле для трансляции видео с бортовой камеры, элементы управления движением и индикации значений бортовых датчиков. Общая схема взаимодействия компонент платформы показана на рисунке 2.

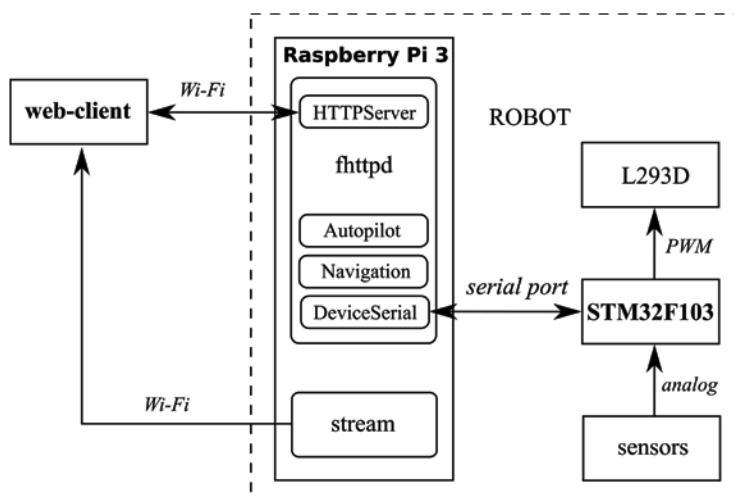


Рисунок 2 – Функциональная схема бортовой системы управления

### 3 Управление движением в условиях возмущений

Для решения задачи автономного движения робота в точку с заданными координатами в условиях возмущений предлагается синтезировать систему регулирования, в состав которой войдет специальный быстрый контур коррекции управления. Задача этого контура заключается в обеспечении соответствия фактических значений динамических характеристик робота с их желаемыми значениями в независимости от действия возмущений. Также в системе присутствует контур управления конфигурацией группы роботов, который определяет желаемое положение для каждого робота с целью сохранения конфигурации группы и обеспечения координированного движения.

Движение  $i$ -го робота при управлении линейной и угловой скоростями можно описать [9] следующим дифференциальным уравнением в векторно-матричной форме:

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

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 скоростями;  $\mathbf{m}_i(t) = (m_{vi}(t), m_{oi}(t))^T$  – вектор зависящих от времени возмущения, которые вызваны проскальзыванием колес, изменением нагрузок, заряда аккумулятора и другими факторами;  $\mathbf{f}(\mathbf{x}_i)$  – матричная функция вида:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_i) = \begin{pmatrix} \cos \psi_i & 0 \\ \sin \psi_i & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Пусть величина возмущений и скорость их изменения ограничены:

$$(2) \quad |m_{vi}(t)| \leq v_{i\max}, \quad |m_{oi}(t)| \leq \omega_{i\max}, \quad |\dot{m}_{vi}(t)| \leq \dot{m}_{vi\max}, \quad |\dot{m}_{oi}(t)| \leq \dot{m}_{oi\max}.$$

Наша цель [10] обеспечить движение объекта с моделью (1) при возмущениях с ограничениями (2) в соответствии с желаемым уравнением:

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

где  $\mathbf{F}(\mathbf{x}_i)$  – вектор желаемых значений старших производных переменных состояния:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}_i) = \begin{pmatrix} a_1(x_{ri} - x_i) \\ a_1(y_{ri} - y_i) \\ a_2(\psi_{ri} - \psi_i) \end{pmatrix}.$$

Здесь  $a_1, a_2$  – положительные коэффициенты, задающие скорость сходимости к желаемым координатам  $\mathbf{x}_{ri} = (x_{ri}, y_{ri}, \psi_{ri})^T$ , которые определяются требуемым положением робота в соответствии с заданной траекторией движения и конфигурацией группы.

Приравнивая правые части уравнений (1) и (3), получим:

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

Помножив обе части уравнения (4) на  $(\mathbf{f}^T(\mathbf{x}_i)\mathbf{f}(\mathbf{x}_i))^{-1}\mathbf{f}^T(\mathbf{x}_i)$ , находим уравнение закона управления, которое обеспечивает заданное время сходимости процессов к желаемым в соответствии с (3):

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

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 управления так, чтобы обеспечить инвариантность системы к действующим возмущениям:

$$(6) \quad \mathbf{u}_i = \mathbf{f}^T(\mathbf{x}_i)\mathbf{F}(\mathbf{x}_i) + \boldsymbol{\theta}_i.$$

Здесь  $\boldsymbol{\theta}_i$  – вектор настраиваемых параметров. Уравнение (6) определяет структуру системы с параметрическим управлением [11].

В качестве алгоритма настройки параметров вектора  $\boldsymbol{\theta}_i$  используется уравнение вида:

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

где  $\mu$  – малый положительный коэффициент;  $\mathbf{L}(\mathbf{x}_i)$  – вспомогательная матричная функция, определяемая из условия устойчивости замкнутой системы.

При наличии шумов оценивания координат, прямое вычисление производных для законов (7) приведет к значительному усилению их влияния на параметры системы управления. В этом случае в выражении (7) целесообразно использовать оценки производных, полученных с помощью дифференцирующих фильтров [12].

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 (рисунок 3).

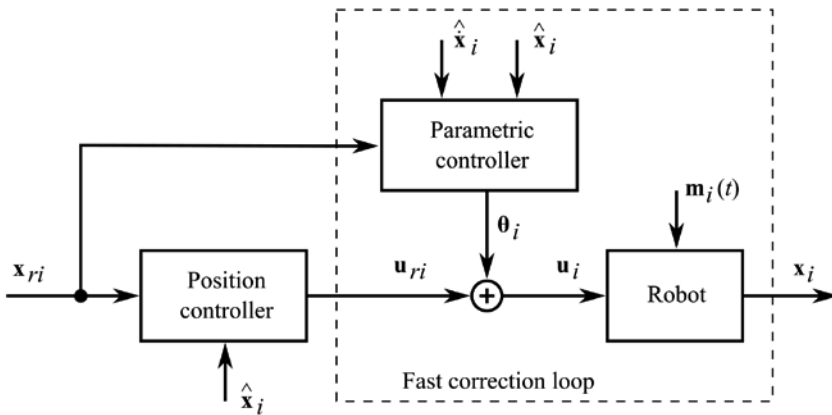


Рисунок 3 – Функциональная схема быстрого контура коррекции динамики

На рисунке  $\hat{x}_i$  – оценка вектора состояния  $i$ -го робота, получаемая в фильтре Калмана;  $\mathbf{u}_{ri} = \mathbf{f}^T(\hat{\mathbf{x}}_i)\mathbf{F}(\hat{\mathbf{x}}_i)$  – вектор управления движения в заданную точку  $\mathbf{x}_{ri}$  без коррекции динамических свойств.

Результаты моделирования движения группы из пяти роботов в условиях действия гармонических возмущений показаны на рисунке 4. Видно, что наличие контура коррекции (рисунок 4 б) в значительной степени уменьшает влияние рассмотренных возмущений на отклонение роботов от требуемого положения относительно лидера группы. При наличии контура коррекции обеспечивается уменьшение ошибки с величины 0.04 м до 0.01 м при тех же параметрах закона управления.

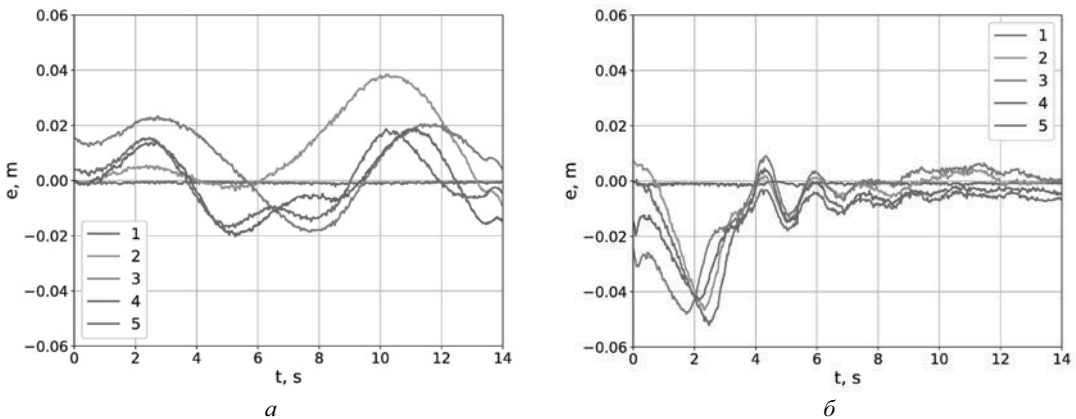


Рисунок 4 – Отклонение роботов от требуемого положения при отсутствии (а) и наличии (б) контура коррекции динамики

## Заключение

Представлена конструкция прототипа автономного робота, созданного для экспериментов с системами управления группой беспилотных транспортных средств, и предложен метод компенсации заранее неизвестных изменений динамических характеристик таких роботов при движении в условиях возмущений. Использование внутреннего быстрого контура коррекции

позволило обеспечить отклонение роботов от желаемой позиции относительно лидера группы на величину не более 0.01 м по результатам численных экспериментов.

### **Благодарности**

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-08-03233).

### **Список литературы**

- [1] Rubenstein, M., Cabrera, A., Werfel, J. Collective transport of complex objects by simple robots: theory and experiments // Proc. of the 12th Intern. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2013). Saint Paul, MN, USA. 6-10 May 2013. P. 47–54.
- [2] Yu. N. Zolotukhin, K. Yu. Kotov, A. S. Maltsev, A. A. Nesterov, M. A. Sobolev, M. N. Filippov. A Relative Measurement based Leader-follower Formation Control of Mobile Robots // In Proceedings of the 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2015). Colmar, Alsace, France. 21-23 July 2015. Vol. 2. P. 310–313.
- [3] Yanyan Dai, Kyung Sik Choi, Suk Gyu Lee. Adaptive formation control and collision avoidance using a priority strategy for nonholonomic mobile robots // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2013. Vol. 10. P. 1-14.
- [4] Lawton J.R., Beard R. W., Young B.J. A decentralized approach to formation maneuvers // IEEE Trans. on Robotics and Automation. 2003. Vol. 19, No. 6. P. 933–941.
- [5] Nathan M., Jonathan F., Vijay K. Cooperative manipulation and transportation with aerial robots // Autonomous Robots. 2011. Vol. 30, No. 1. P. 73–86.
- [6] Jose V., Lounis A. and Youcef M. Adaptive Leader-Follower Formation in Cluttered Environment Using Dynamic Target Reconfiguration // Distributed Autonomous Robotic Systems. 2016. P. 237–254.
- [7] Carmine Noviello. Mastering STM32. A step-by-step guide to the most complete ARM Cortex-M platform, using a free and powerful development environment based on Eclipse and GCC. Leadpub. 2017. 792 p.
- [8] Канина К.В. Система управления мобильной платформой на базе микроконтроллера STM32 и операционной системы реального времени FreeRTOS // Сборник трудов 55-й Международной студенческой научной конференции (школьная секция). Новосибирск. 2017. С. 26.
- [9] Bong Seok Park, Sung Jin Yoo. Adaptive Leader-follower Formation Control of Mobile Robots with Unknown Skidding and Slipping Effects // International Journal of Control, Automation, and Systems. 2015. Vol. 13, No. 3. P. 587–594.
- [10] Золотухин Ю.Н., Котов К.Ю., Мальцев А.С., Нестеров А.А., Соболев М.А., Цупа А.Е. Координированное управление группой роботов в задачах перемещения груза // Вычислительные технологии. 2016. Т. 21, № 1. С. 70–79.
- [11] Мальцев А.С. Метод синтеза систем стабилизации с параметрическим управлением // Сборник научных трудов НГТУ. 2010. №4 (62). С. 51–56.
- [12] Востриков А.С. Синтез систем регулирования методом локализации. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2007. 252 с.