

С. Л. Зенкевич, д-р физ.-мат. наук, проф., zenkev@bmstu.ru, **Хуа Чжу**, аспирант, zhuhua1302@gmail.com, **Цзяньвэнь Хо**, аспирант, huojianwen2008@hotmail.com, Научно-учебный центр "Робототехника" МГТУ им. Н. Э. Баумана

Экспериментальное исследование движения группы мобильных роботов в строю типа "конвой"

Приведено описание эксперимента, состоящего в исследовании движения группы мобильных роботов в строю типа "конвой". Рассмотрены используемые аппаратные средства роботов. Описана распределенная система управления ведущими и ведомыми роботами в среде ROS. Кратко изложены алгоритмы управления ведущим и ведомыми роботами. Приведены результаты экспериментов: построенная карта среды, траектории роботов.

Ключевые слова: эксперимент, навигация, ведущий робот, следование, ведомый робот, распределенная система

Введение

Ранее авторами было проведено теоретическое исследование методов управления движением роботов [1], а также компьютерное моделирование движения роботов в среде ROS [2].

Компьютерное моделирование является одним из эффективных методов изучения движения группы роботов. Но вместе с тем этот метод анализа движения может не учитывать ряд факторов, например, неточности модели и измерений, задержки при коммуникации и т. д. Поэтому проведение натурных испытаний является актуальной задачей, позволяющей оценить как правильность используемых методов, так и возможность их использования в реальных условиях.

Постановка задачи

Пусть мобильные роботы движутся в плоскости OXY строем типа "конвой" (рис. 1). Роботы пронумерованы от R_0 (ведущего робота) до R_N (замыкающего конвой). Ведущий робот оснащен богатой сенсорной системой, позволяющей планировать траекторию в непредсказуемой обстановке, например, сканирующими лазерными дальномерами, системами спутниковой навига-

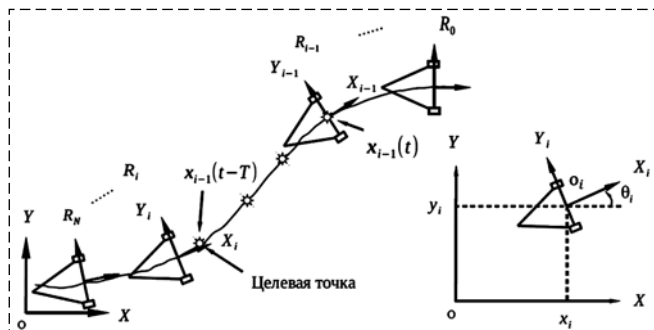


Рис. 1. Постановка задачи

ции, стереозрением. Ведомые роботы в этом случае должны только следить за положением своего ведущего робота.

Задача настоящей работы состоит в экспериментальном исследовании группы мобильных роботов в строю типа "конвой".

Описание ведущего и ведомого роботов

Внешний вид роботов представлен на рис. 2 (см. четвертую сторону обложки), а их структурная схема — на рис. 3. В состав робота входят следующие компоненты:

1. Механическая платформа, имеющая два независимых ведущих колеса и одно пассивное.
2. Два электродвигателя с магнитными энкодерами.
3. Одноплатный компьютер Raspberry Pi 2B (частота: 900 МГц, ОЗУ: 1 Гб).
4. Микроконтроллер Arduino Uno для управления двигателями.

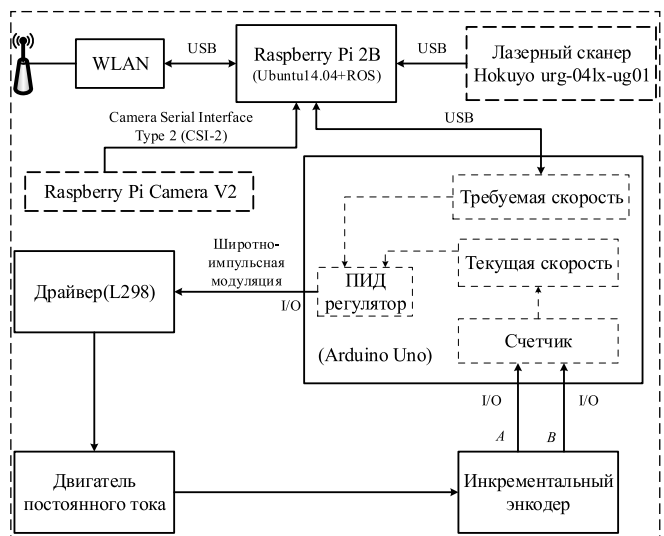


Рис. 3. Структурная схема робота

5. Лазерный сканер Hokuyo urg-04lx-urg01 (диапазон измерения: 5,6 м, скорость сканирования: 100 мс/скан, только у ведущего робота).

6. Raspberry Pi камера (только у последнего ведомого робота).

В эксперименте участвует строй типа "конвой", в состав которого входят четыре ведомых и один ведущий робот.

Описание программного обеспечения распределенной системы управления роботами

Цель эксперимента состоит в том, чтобы в условиях отсутствия априорных знаний о внешней среде перевести группу мобильных роботов из начального положения в положение, заданное оператором. Для реализации такой системы в масштабе реального времени роботы оснащены операционной системой Ubuntu 14.04 совместно с ROS (Robot Operating System). В среде ROS разработано программное обеспечение распределенной системы управления роботами, структура которого представлена на рис. 4.

Опишем основные элементы данного программного обеспечения:

- ◆ Процесс `/hector_mapping` используется для построения двумерной карты окружающей среды и определения собственного положения в ней с помощью информации лазерного сканера, обслуживаемого процессом `/hokuyo_node`.
- ◆ Процесс `/move_base` служит для динамического формирования роботом отслеживаемой траектории, а также формирования команды управления.
- ◆ Процесс `/follower` ведомого робота предназначен для отслеживания им траектории своего ведущего робота.
- ◆ Процесс `/odometry` служит для определения положения ведомого робота в окружающей среде.
- ◆ Управление исполнительным механизмом осуществляется процессом `/serial_node`.
- ◆ Процесс `/raspicam_node`, принадлежащий последнему ведомому роботу, служит для мониторинга движения роботов оператором с помощью камеры, установленной на работе.

Из-за ограниченной вычислительной мощности бортового компьютера части задачи ведущего робота выполняются удаленным компьютером.

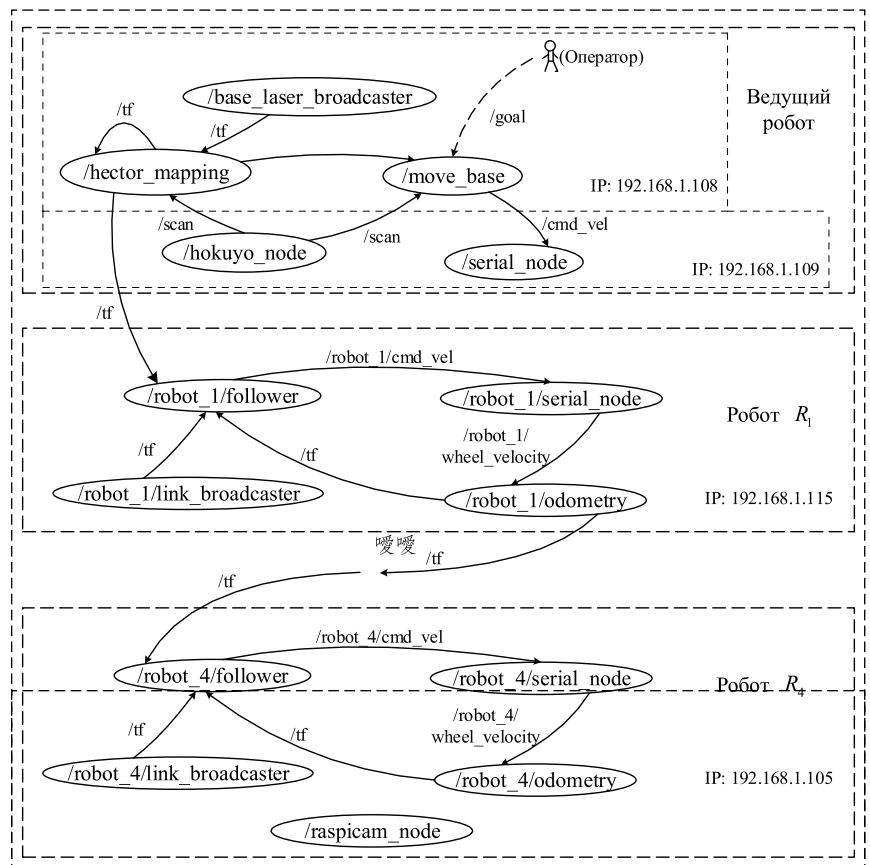


Рис. 4. Структура программного обеспечения распределенной системы управления роботами

Алгоритмы управления ведущим роботом

Для автономной навигации ведущего робота необходимо решать следующие задачи: определение собственного положения, построение карты, а также планирование траектории.

- ◆ *Определение собственного положения и построение карты (SLAM)*

Построенная в процессе эксперимента карта является растровой, каждая клетка $P(x, y)$ которого характеризуется величиной $M(P) \in [0, 100]$:

$$M(P) = \begin{cases} 0, & \text{клетка свободна;} \\ 100, & \text{клетка занята препятствием;} \\ -1, & \text{состояние клетки неизвестно.} \end{cases}$$

Используемый метод SLAM [3] состоит в том, что на каждом шаге сканирования ищется положение робота $\xi^* = (x_0, y_0, \theta_0)^T$, минимизирующее квадратичный критерий:

$$\xi^* = \arg \min_{\xi} \sum_{i=0}^n [100 - M(S_i(\xi))]^2,$$

где $n = 501$ — число лучей в каждой развертке; $M(x, y)$ — значение занятости в клетке (x, y) ; $S_i(\xi)$ — координаты конечной точки луча i в системе координат карты OXY , которые можно получить, используя измеренные координаты ко-

нечной точки $(\rho_{i,x}, \rho_{i,y})^T$ (рис. 5, а, см. четвертую сторону обложки):

$$S_i(\xi) = \begin{pmatrix} \cos \theta_0 & -\sin \theta_0 \\ \sin \theta_0 & \cos \theta_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \rho_{i,x} \\ \rho_{i,y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix}.$$

Пусть во время t получены оценки положения робота $\xi(t)$, и через промежуток Δt проводится новое сканирование, тогда смещение положения $\Delta \xi^*$ ищется из условия

$$\Delta \xi^* = \arg \min_{\Delta \xi} \sum_{i=0}^n [100 - M(S_i(\xi(t) + \Delta \xi))]^2.$$

Подробный процесс нахождения $\Delta \xi^*$ описан в работе [3], где алгоритм Гаусса—Ньютона используется для решения задач поиска экстремума методом наименьших квадратов. Далее проводится обновление положения и карты (рис. 5, б, см. четвертую сторону обложки).

♦ Планирование траектории

Используя полученную карту, процесс /move_base планирует траекторию с учетом габаритных размеров робота. В эксперименте используется два типа планирования: глобальное [4] и локальное [5]. От текущего до целевого положения робота глобальное планирование генерирует последовательность точек, используя алгоритм Дейкстры. По поступающим данным от сканера локальное планирование вычисляет команды управления роботом для следования вдоль сегмента маршрута с помощью алгоритма Trajectory Rollout или Dynamic Window. Преимущество этого способа планирования состоит в возможности перепланировки траектории в масштабе реального времени при появлении препятствий на маршруте.

Алгоритмы управления ведомым роботом

● Формирование команды (v_i, ω_i) управления роботом R_i

Стратегия управления роботом состоит в том, что робот R_i повторяет траекторию своего ведущего робота R_{i-1} с некоторым временным запаздыванием T . Команда (v_i, ω_i) управления роботом имеет вид [1]

$$\begin{pmatrix} v_i \\ \omega_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1(x_{i-1}(t-T) - x_i(t)) \cos \theta_i(t) + k_1(y_{i-1}(t-T) - y_i(t)) \sin \theta_i(t) \\ k_2(\theta_{i-1}(t-T) - \theta_i(t)) \end{pmatrix},$$

где $(x_i(t), y_i(t), \theta_i(t))$ — положение робота R_i в системе координат карты во времени t , $T = 2$ с.

● Классический способ управления двигателями

В каждый момент времени требуемая скорость двигателей ищется следующим образом:

$$\begin{cases} \omega_R = \frac{2v_i + l\omega_i}{2r}; \\ \omega_L = \frac{2v_i - l\omega_i}{2r}, \end{cases}$$

где ω_R, ω_L — требуемая скорость правого и левого двигателей; $r = 0,067$ м — радиус ведущих колес; $l = 0,172$ м — расстояние между центрами двух колес.

Управление двигателями осуществляется классическим методом (с использованием ПИД регулятора по скорости). Выходной сигнал регулятора $u(t) = (u_r(t), u_l(t))^T$ определяется тремя слагаемыми:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt},$$

где k_p, k_i, k_d — коэффициенты усиления пропорциональной, интегрирующей и дифференцирующей составляющих регулятора соответственно; $e(t) = (\omega_R(t) - \omega_R^{real}(t), \omega_L(t) - \omega_L^{real}(t))^T$ — отклонение скорости от требуемой.

В дискретной программной реализации метода расчета выходного сигнала уравнение принимает рекуррентную форму:

$$u(n) = u(n-1) + K_p(e(n) - e(n-1)) + \frac{K_i(e(n) - e(n-1))}{2} + K_d(e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)),$$

где $K_p = k_p, K_i = k_i \Delta t, K_d = k_d / \Delta t$, которые выбраны методом Циглера—Николса; время дискретизации $\Delta t = 0,02$ с.

Результаты эксперимента

▲ Результаты управления исполнительным механизмом

Постоянная требуемая скорость двигателя и временная реакция двигателя показаны на рис. 6 и рис. 7 ("с участием нагрузки" означает, что робот двигался по полу лаборатории).

Как видно из рис. 6, 7, длительности переходного процесса $t_{пп}$ различны в двух случаях ($t_{пп1} = 0,5$ с,

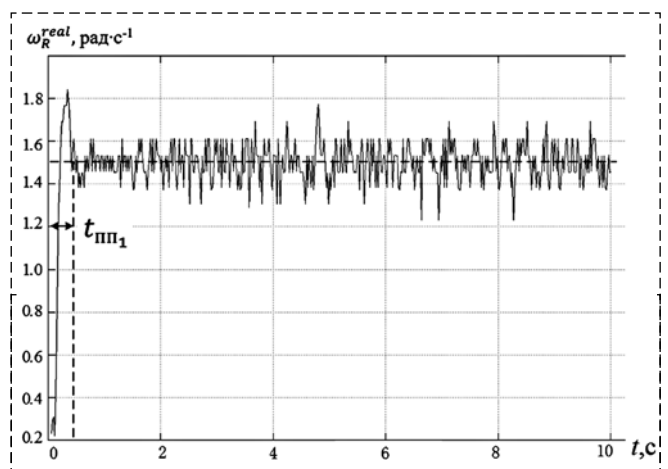


Рис. 6. Реакция двигателя на ступенчатое воздействие

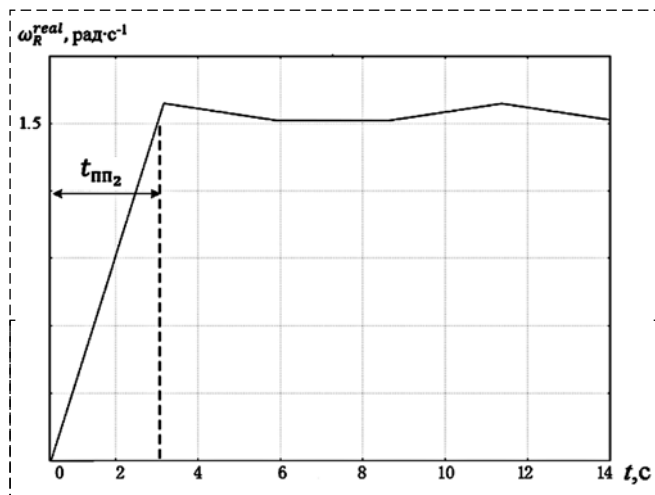


Рис. 7. Реакция двигателя на ступенчатое воздействие с участием нагрузки

$t_{пп2} = 2,5$ с). Соотношение $t_{пп2} > t_{пп1}$ значит, что инерция робота влияет на быстродействие системы, т. е. на работоспособность робота в масштабе реального времени.

▲ Результаты проверки функционирования в автономном режиме ведущего робота

При заданной оператором последовательности целевых точек A, B, C, D , ведущий робот автономно проходил эти целевые точки, для которых распознавал окружающую среду и планировал траектории. Реальная траектория робота показана на рис. 8.

Точность построенной карты представлена в таблице.

Сравнение реальной дистанции и дистанции на карте

Имя точек	Реальная дистанция, м	Дистанция на карте, м	Погрешность, м	%
L_1	2,05	1,98539	0,06461	3,15
L_2	1,5	1,43363	0,06637	4,4



Рис. 8. Траектория ведущего робота в построенной карте

▲ Результаты движения группы роботов в строю типа "конвой"

При движении робота в строю линейная скорость ведущего робота ограничена диапазоном $[0,1 \text{ м/с}, 0,2 \text{ м/с}]$, угловая скорость ограничена диапазоном $[-1,5 \text{ рад/с}, 2 \text{ рад/с}]$. Безопасное расстояние между роботами установлено равным 0,15 м. Результаты движения показаны на рис. 9 (см. четвертую сторону обложки).

Из рис. 9, а видно, что траектории ведомых роботов не совпадают с траекторией ведущего, однако траектории ведомых роботов хорошо совпадают друг с другом. Причиной этого могут быть следующие:

1. Различные точности локализации ведущего и ведомых роботов.
2. Задержки при коммуникации и недостаточное быстродействие исполнительного механизма.

Заключение

В работе описан проведенный эксперимент, исследующий движение роботов в строю типа "конвой". Полученные результаты демонстрируют правильность используемых методов. Дальнейшее направление исследования включает рассмотрение:

- ◆ согласованного движения квадрокоптера и группы мобильных роботов в строю типа "конвой";
- ◆ логического управления группой роботов при изменении топологии строя, обеспечивающий выполнение различных действий группы, например, входа робота в конвой, выхода робота из конвоя, объединения конвоев, разделения конвоя и т. д.

Список литературы

1. Зенкевич С. Л., Чжу Хуа. Управление движением группы роботов в строю типа "конвой" // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 1. С. 30–34.
2. Зенкевич С. Л., Назарова А. В., Чжу Хуа. Моделирование и анализ движения группы мобильных роботов в среде ROS // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017, Т. 18, № 5. С. 317–320.
3. Kohlbrecher S., Meyer J., von Stryk O., Klingauf U. A flexible and scalable SLAM system with full 3D motion estimation // Proc. of the IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics. Kyoto, Japan, Nov. 1–5. 2011. P. 50–55.
4. Global_planner. URL: wiki.ros.org/global_planner (дата обращения: 15.06.2016).
5. Base_local_planner. URL: wiki.ros.org/base_local_planner?distro=kinetic (дата обращения: 15.06.2016).

Experimental Study of Motion of the Mobile Robots Moving in the Convoy Type Formation

S. L. Zenkevich, zenkev@bmstu.ru, Hua Zhu, zhuhua1302@gmail.com,

Jianwen Huo, huojianwen2008@hotmail.com,

Robotics Training-Research Center, Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: **Zhu Hua**, Ph. D., Robotics Training-Research Center,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation,
e-mail: zhuhua1302@gmail.com

Accepted on May 30, 2016

In this paper the authors describe the experiment, which consists in studying the motion of the mobile robots moving in the convoy type formation, including one leader-robot and several follower-robots. The components of the educational robots and their sensor devices including Hokuyo urg-04lx-urg01 scanning laser rangefinder (only the leader-robot has it) are introduced. A distributed control system of the robots in ROS (Robot Operating System) is described, at the same time the functions of each node of the robots are presented in detail. The authors describe the SLAM algorithm of the leader-robot and its computational process in practice, and simultaneously the algorithm of the trajectory planning in real-time is described briefly. The authors present the PID controller for DC (direct current) motors and discuss the performance of DC motor according to its step response in the loading conditions. The motion control algorithm of the follower-robot is also presented. Experimental results including the map of environment and the trajectory of robots on the map are provided, which demonstrate effectiveness of the used algorithms. The authors analyze the reasons for discrepancy in the trajectories of some robots in a group, for example, different positioning accuracy of the leader-robot and follower-robots, delays in communication, insufficient performance of the actuator.

The further research direction consists of two aspects: firstly, the coordinated movements of the drone and a group of mobile robots moving in the convoy type formation; secondly, logical control of a group of robots when changing the formation topology. The control mechanism ensured the execution of various convoy behaviors, for example, convoy separation.

Keywords: experiment, navigation, leader-follower, distributed system, ROS

For citation:

Zenkevich S. L., Zhu Hua, Huo Jianwen. Experimental Study of Motion of the Mobile Robots Moving in the Convoy Type Formation, *Mekhatronika, Avtomatizacia, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 5, pp. 331–335.

DOI: 10.17587/mau.19.331-335

References

1. **Zenkevich S. L., Zhu Hua.** *Upravlenie dvizheniem gruppy robotov v stroju tipa "konvoj"* (Control of a group of mobile robots

moving in the convoy type formation), *Mekhatronika, Avtomatizacia, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 30–34 (in Russian).

2. **Zenkevich S. L., Nazarov A. V., Zhu Hua.** *Modelirovanie i analiz dvizhenija gruppy mobil'nyh robotov v srede* (Simulation and analysis of motion of a group of mobile robots in ROS), *Mekhatronika, Avtomatizacia, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 5, pp. 317–320 (in Russian).

3. **Kohlbrecher S., Meyer J., von Stryk O., Klingauf U.** A flexible and scalable SLAM system with full 3D motion estimation, *In Proc. of the IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics*, Japan, 2011, pp. 50–55.

4. **Global_planner** URL: wiki.ros.org/global_planner.

5. **Base_local_planner** URL: wiki.ros.org/base_local_planner?distro=kinetic.