

С. Л. Зенкевич, д-р физ.-мат. наук, проф., mr.zenkev@mail.ru,

А. В. Назарова, канд. техн. наук, доц., avn@bmsu.ru, **Хуа Чжу**, аспирант, zhuhua1302@gmail.com,
Научно-учебный центр "Робототехника" МГТУ им. Н. Э. Баумана

Моделирование и анализ движения группы мобильных роботов в среде ROS

Решена задача моделирования движения группы мобильных роботов в среде ROS при отсутствии препятствий. Рассмотрены три типа поведения группы роботов при движении: синхронизация запуска роботов, движение группы роботов-"жуков", движение группы роботов в строю типа "конвой". Проанализированы характеристики движения группы мобильных роботов и исследованы проблемы при осуществлении таких видов движения.

Ключевые слова: моделирование, движение, группа роботов, ROS

Введение

За последние два десятилетия огромное внимание уделяется исследованиям в областях групповой робототехники. Преимущества использования групп мобильных роботов очевидны. Во-первых, это больший радиус действия, во-вторых, расширенный набор выполняемых функций и, наконец, более высокая вероятность выполнения задания, достигаемая за счет возможности перераспределения целей между роботами группы в случае выхода из строя некоторых из них.

Большая часть исследований в области групповой робототехники направлена на изучение коллективного поведения групп роботов и, прежде всего, на координацию движения. Моделирование движения группы мобильных роботов является актуальным, поскольку построение универсальной математической модели группы роботов затруднительно [1], а проведение натурных экспериментов по групповой робототехнике является технически сложной задачей.

ROS (Robot Operating System, операционная система для роботов) — это одна из основных сред для программирования роботов, предоставляющая возможность моделирования поведения распределенных робототехнических систем [7]. ROS была первоначально разработана в 2007 г. под названием *Switchyard* в Лаборатории искусственного интеллекта Стэнфордского Университета для проекта STAIR. В 2008 г. развитие продолжилось в научно-исследовательском институте робототехники Willow Garage. ROS имеет две основные особенности: будучи, с одной стороны, специализированной операционной системой, она предлагает набор поддерживаемых пользователями пакетов, которые реализуют различные функции, например, SLAM, планирование, восприятие, моделирование и др.

В данной статье рассматривается моделирование движения группы однотипных мобильных роботов в среде ROS с использованием пакета *stage_ros*.

1. Модель каждого робота строя

Исследуемый мобильный робот R_i перемещается в плоскости OXY , имея два симметрично расположенных ведущих колеса, левое и правое, а также одно (или более) пассивное колесо (рис. 1). Свяжем с роботом систему координат $O_iX_iY_i$, выбрав в качестве начала системы точку O_i , лежащую посередине отрезка, соединяющего центры колес, ось X_i направим перпендикулярно этому отрезку, а ось Y_i направим так, чтобы получилась правая система координат. При моделировании приняты следующие ограничения: отсутствуют продольное и боковое проскальзывания между колесами и плоскостью. В этом предположении вектор линейной скорости направлен вдоль оси X_i , и кинематические уравнения движения имеют вид [2]

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{\theta}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_i & 0 \\ \sin\theta_i & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_i \\ \omega_i \end{pmatrix}, \quad (1)$$

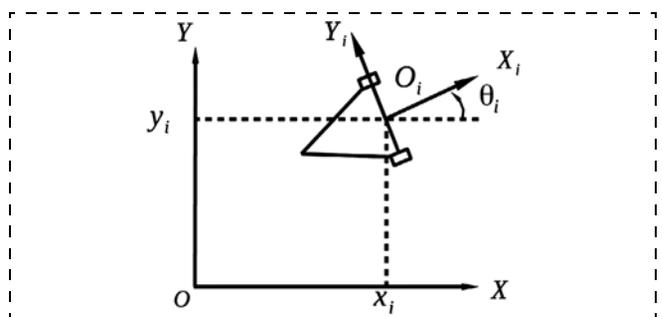


Рис. 1. Мобильный робот R_i

где x_i, y_i, θ_i — положение и ориентация робота, ω_i — угловая скорость робота, а v_i — линейная скорость начала связанной системы координат. При моделировании в среде ROS v_i и ω_i представляют собой сигналы управления роботами.

Рассмотрим три типа движения мобильных роботов.

2. Моделирование запуска мобильных роботов при централизованном и децентрализованном способах управления группой

Задача. Пусть имеется n мобильных роботов в группе, требуется запустить все роботы приблизительно одновременно.

Решение. При централизованном способе управления каждый мобильный робот передает свое сообщение "готов" центру управления. Когда все роботы готовы, центр управления передает сообщение "поехали" каждому роботу, и все роботы начинают двигаться. При децентрализованном управлении каждый мобильный робот передает всем остальным свое сообщение "готов". Все роботы начинают двигаться, когда каждый из них получил n сообщений "готов".

Моделирование: в среде ROS моделируем запуск четырех мобильных роботов. Каждому роботу соответствует процесс `/sync_robot_i`. При централизованном управлении (рис. 2, а) между процессами `/sync_robot_i` и `/centralized_monitor` передаются сообщения `/robot_status` и `/team_status`. В сообщении `/robot_status` содержится информация об идентификации и состоянии робота. В сообщении `/team_status` содержится информация о состоянии группы роботов. При децентрализованном способе (рис. 2, б) только процессы `/sync_robot_i` обмениваются сообщениями друг с другом.

3. Моделирование движения мобильных роботов-"жуков"

Задача. Рассмотрим группу из четырех однородных мобильных роботов (назовем их роботами-жуками) R_0, R_1, R_2, R_3 . Каждый робот находится в вершине квадрата. Первоначально вектор направления движения робота совпадает со стороной квадрата. При движении каждый мобильный робот перемещается по направлению к соседнему роботу. Требуется исследовать характеристики движения роботов.

Решение. Уравнение движения роботов имеет вид (1), в этом случае, выбираем $v_i = \text{const}$, $\omega_i = k(\arctg2(y_j - y_i, x_j - x_i) - \theta_i)$, где $i = 0, 1, 2, 3, j = (i + 1)$ при $i = 0, 1, 2; j = 0$ при $i = 3$; k — параметр регулирования.

Моделирование. При программировании в среде ROS используется эмулятор Stage. Начальное положение роботов задается как $R_0(-10, 0, -45^\circ)$, $R_1(0; -10; 45^\circ)$, $R_2(10, 0, 135^\circ)$, $R_3(0, 10, -135^\circ)$. Как и в предыдущей задаче, каждый робот имеет собственный процесс. При моделировании предполагаем, что известно положение робота в абсолютной системе координат OXY , линейная скорость робота равна 1 м/с.

Результат и анализ. В процессе моделирования в эмуляторе Stage получаем траектории движения четырех мобильных роботов при параметре регулирования $k = 0,5$. Положение и угловая скорость робота R_0 показаны на рис. 3. Рис. 4 (см. вторую сторону обложки) показывает, что через определенное время четыре робота начинают двигаться приблизительно по окружности с радиусом R .

Выбирая различные параметры регулирования k , получаем различные "финальные" радиусы движения R (табл. 1).

Таблица 1

Зависимость радиуса окружности от параметров регулирования k

k	0,3	0,5	1,0	1,5	2	10
$R, \text{ м}$	4,3	2,7	1,4	1	0,63	Столкновение

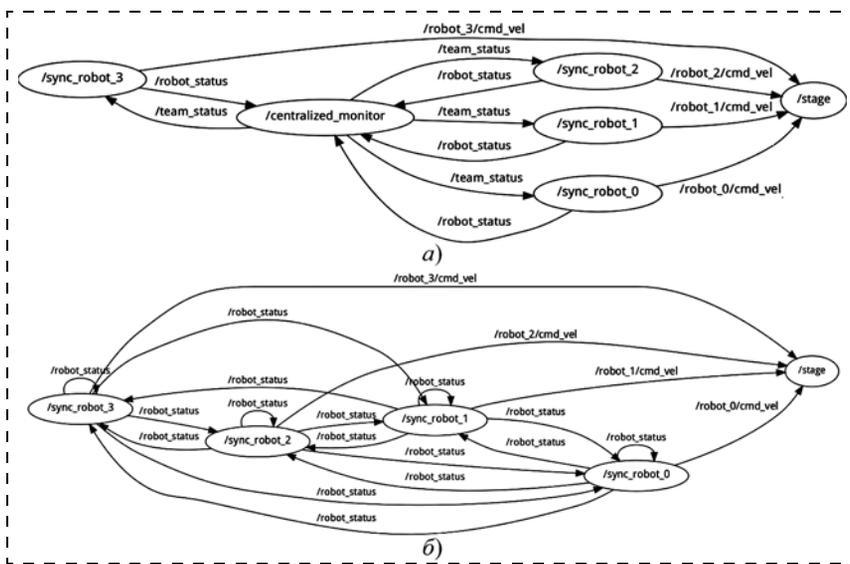


Рис. 2. Вычислительный граф узла (nodes) ROS при: а — централизованном управлении; б — децентрализованном управлении

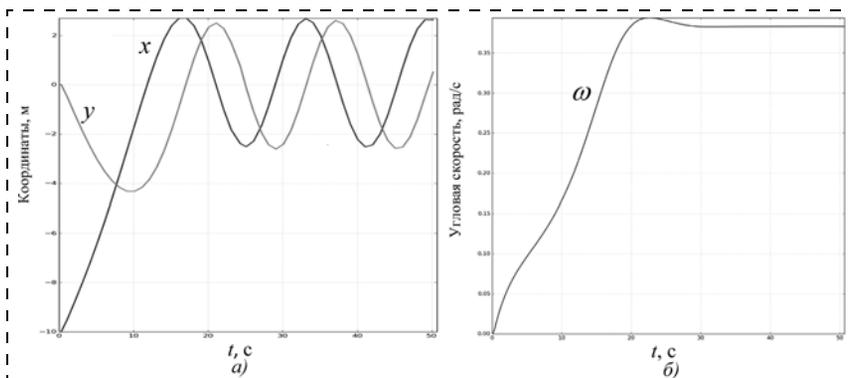


Рис. 3. Положение и угловая скорость робота R_0

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1) четыре робота движутся друг к другу, но начиная с определенного момента начинают перемещаться по окружности и никогда не встречаются, кроме столкновения роботов при большом k ;

2) радиус окружности, по которой роботы движутся, зависит от параметров регулирования k . Чем больше k , тем меньше радиус окружности R .

4. Моделирование и анализ движения мобильных роботов в строю типа "конвой"

Задача. Пусть имеется группа из n мобильных роботов. Один из них является ведущим роботом R_0 , оснащенным более богатыми сенсорными устройствами, позволяющими ему автономно двигаться в неопределенной среде, а остальные роботы R_i ($i = 1, \dots, n$) только повторяют его траекторию. Требуется, чтобы траектории всех роботов максимально совпадали при условии обеспечения безопасной дистанции между роботами.

Решение. Это задача подражательного поведения. Реализация подражания неизбежно требует решения следующих задач [3]:

1. Распознавание "своих", т. е. выявление объектов для подражания.

2. Определение действий "своих", которым следует подражать. Иными словами, робот должен знать, что делает его окружение, т. е. уметь распознать действия "своих".

3. Копирование такого же действия.

При моделировании движения роботов в строю предполагаем, что каждый робот R_i подражает поведению робота R_{i-1} , для этого они должны узнавать положения и скорости других роботов. Задача состоит в нахождении алгоритма управления каждым роботом. Рассмотрим три алгоритма вычислительной скорости ведомых роботов.

• **Алгоритм 1.** Решение задачи стабилизации или следования

Линейная скорость робота R_i :

$$v_i = k_v \sqrt{(x_{i-1} - x_i)^2 + (y_{i-1} - y_i)^2}.$$

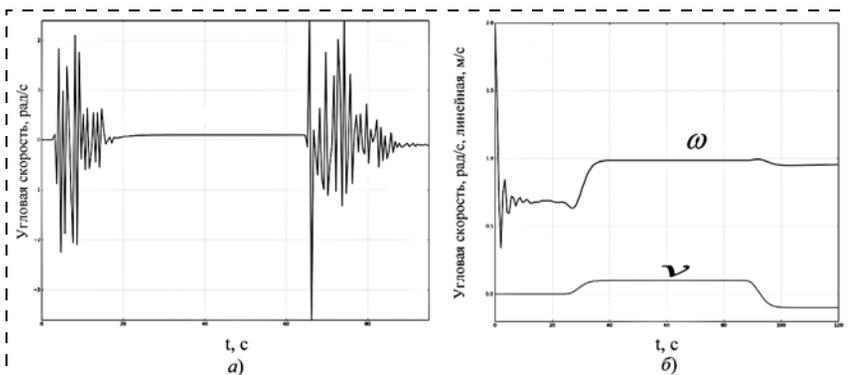


Рис. 6. Угловая скорость робота R_{10} по алгоритму 2 (а); скорость робота R_{10} по алгоритму 3 (б)

Угловая скорость робота:

$$\omega_i = k_\omega (\arctg 2(y_{i-1} - y_i, x_{i-1} - x_i) - \theta_i),$$

где k_v, k_ω — параметр регулирования (одинаковы для алгоритмов 2 и 3).

• **Алгоритм 2** [4]. *Аппроксимация траектории кривой Безье*

Линейная скорость робота: $v_i = v_{i-1}$.

Вычисление координаты (x, y, ϕ) "своих" в собственной системе координат робота R_i ($i = 1, \dots, n$):

$$\begin{cases} x = (x_{i-1} - x_i) \cos \theta_i + (y_{i-1} - y_i) \sin \theta_i; \\ y = -(x_{i-1} - x_i) \sin \theta_i + (y_{i-1} - y_i) \cos \theta_i; \\ \phi = \theta_{i-1} - \theta_i. \end{cases}$$

Вычисление параметра кубической кривой Безье:

$$d = \frac{2}{3} \sqrt{2} (\sqrt{2} - 1) \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Определение параметра регулирования k_ω :

$$k_\omega = \frac{2(y - d \sin \phi)}{3d^2}.$$

Определение угловой скорости робота: $\omega_i = k_\omega v_i$.

• **Алгоритм 3** [5]. *Робот R_i движется с некоторым временным запаздыванием T по траектории, вдоль которой двигался робот R_{i-1}*

Линейная скорость робота:

$$v_i = k_v ((x_{i-1}(t - T) - x_i(t)) \cos \theta_i(t) + (y_{i-1}(t - T) - y_i(t)) \sin \theta_i(t)).$$

Угловая скорость робота:

$$\omega_i = k_\omega (\theta_{i-1}(t - T) - \theta_i(t)).$$

Моделирование. При программировании в среде ROS используется эмулятор Stage. Моделируется движение "конвоя" из одиннадцати роботов. Ведущий робот R_0 совершает движение с постоянной линейной скоростью $v_i = 5$ м/с и угловой скоростью $\omega_i = 0,1$ рад/с при $t < 62,8$ с, $\omega_i = -0,1$ рад/с при $t > 62,8$ с, т. е. движется по траектории типа "восьмерка". Скорость остальных роботов вычисляется с использованием одного из алгоритмов 1, 2 или 3.

Результат и анализ. В эмуляторе Stage (рис. 5, см. вторую сторону обложки) получены траектории движения одиннадцати мобильных роботов при $k_v = 4, k_\omega = 0,5$ с использованием алгоритма 1 и при $k_v = 1, k_\omega = 1, T = 2$ с использованием алгоритма 3.

На рис. 6 представлены графики изменения скорости последнего в конвое робота (R_{10}) при реализации алгоритмов 2 (рис. 6, а) и 3 (рис. 6, б).

Сравнение результатов моделирования (табл. 2) при различных траекториях движения позволяет

Сравнение трех алгоритмов

Характеристики	Алгоритм 1	Алгоритм 2	Алгоритм 3
Отклонение между траекториями роботов Характер изменения скоростей последующих роботов	10 %	3 % Колебательный	3 % Апериодический

сделать вывод, что алгоритм 3 имеет преимущества при управлении движением роботов в строю.

Заключение

Дальнейшая работа состоит в реализации движения группы мобильных роботов в реальной среде. При проведении эксперимента по исследованию движения группы роботов необходимо решить следующие проблемы:

1. Коммуникация между роботами, которая является одним из необходимых условий обеспечения коллективных согласованных действий роботов.

2. Способ локализации мобильных роботов в составе группы. Хотя в настоящее время существу-

ют различные методы локализации для отдельного робота, например, SLAM и визуальная одометрия, необходимо исследовать способы определения положения роботов в группе.

3. Влияние шумов датчиков на точность следования требуемой траектории движения.

Список литературы

1. Hamann H., Wörn H. A framework of space-time continuous models for algorithm in swarm robotics // *Swarm Intelligence*. 2008. № 7. P. 209–239.
2. Zenkevich S. L., Nazarova A. V. Система управления мобильного робота // *Вестник МГТУ. Сер. "Приборостроение"*. 2006. № 3. С. 31–51.
3. Карпов В. Э. Коллективное поведение роботов. Желаемое и действительное // *Современная мехатроника. Сб. научн. трудов Всероссийской научной школы (г. Орехово-Зуево, 22–23 сентября 2011)*. 2011. С. 35–51.
4. Chiem S., Cervera E. Vision-based robot formations with Bezier trajectories // *Proc. Of Intelligent and Autonomous Robots*. 2004. P. 191–198.
5. Zenkevich S. L., Чу Хуа. Управление движением группы роботов в строю типа "конвой" // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2017. Т. 18, № 1. С. 30–34.
6. Reynolds C. W. Steering Behaviors for Autonomous Characters // *Proc. of Game Developers Conference. San Jose (USA)*. 1999. P. 763–782.
7. URL: www.ros.org

Simulation and Analysis of the Movement of a Group of Mobile Robots in ROS

S. L. Zenkevich, mr.zenkev@mail.ru, A. V. Nazarova, avn@bmstu.ru, Hua Zhu, zhuhua1302@gmail.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

Received on April 25, 2016

Accepted on May 11, 2016

The paper presents a simulation of a group movement of mobile robots in absence of obstacles in ROS and a kinematics model of the mobile robots used in the simulation. Three types of motion behavior of the mobile robots in a group were considered. First, the authors achieved a synchronization of the mobile robots in a group using the centralized method, which requires a control center, and the decentralized method, in which the mobile robots in a group communicate with each other. Second, the authors simulated movement of four mobile robots in Zhukov forms, when each robot was controlled according to the relative position of the two neighboring robots. Different trajectories of the mobile robots were obtained depending on the selected control parameters. The authors analyzed the relation between the control parameters and the resulting trajectories. Finally, the authors simulated movement of a group of the mobile robots in a convoy type of formation. Three different control algorithms were considered. The authors analyzed and compared the trajectories of the mobile robots moving in the convoy type of formation using three different control algorithms. The advantages and disadvantages of the three control algorithms were presented. The authors discussed a range of problems, which could be encountered when conducting physical experiments, for example, communication between the robots, the process of localization of the mobile robots in a group, and the impact of a sensor noise.

Keywords: simulation, movement, group, mobile robots, synchronization, convoy, ROS

For citation:

Zenkevich S. L., Nazarova A. V., Zhu Hua. Simulation and Analysis of the Movement of a Group of Mobile Robots in ROS, *Mekhatronika, Avtomatizacia, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no 5, pp. 317–320.

DOI: 10.17587/mau.18.317-320

References

1. Hamann H., Wörn H. A framework of space-time continuous models for algorithm in swarm robotics, *Swarm Intelligence*, 2008, no. 7, pp. 209–239.
2. Zenkevich S. L., Nazarova A. V. Sistema upravlenija mobil'nogo robota (System of control mobile robot), *Journal of Bauman Moscow State Technical University, series "Instrumentation"*, 2006, no. 3, pp. 31–51 (in Russian).

3. Karpov V. E. Kollektivnoe povedenie robotov (Collective behavior of robots). *Zhelaemoe i dejstvitel'noe, Sovremennaja mehatronika. Sb. nauchn. trudov Vserossijskoj nauchnoj shkoly (g. Orekhovo-Zuevo, 22–23 sentjabrja 2011)*, 2011, pp. 35–51 (in Russian).

4. Chiem S., Cervera E. Vision-based robot formations with Bezier trajectories, *Proc. Of Intelligent and Autonomous Robots*, 2004, pp. 191–198.

5. 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).

6. Reynolds C. W. Steering Behaviors for Autonomous Characters, *Proceedings of Game Developers Conference, San Jose (USA)*, 1999, pp. 763–782.

7. Available at: www.ros.org.