

УДК 621.865.8-5

## ЛОКАЛИЗАЦИЯ И НАВИГАЦИЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ARUCO-МАРКЕРОВ

И. М. Толстой (*tolstoy.i.m@yandex.ru*)

К. С. Захаров (*kon7666007@yandex.ru*)

Санкт-Петербургский институт информатики и  
автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург

И. А. Кан (*igorkaan@yandex.ru*)

Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург

**Аннотация.** Авторами работы рассмотрена проблема перемещения мобильных роботов в закрытом помещении. Представлена реализация системы навигации мультиагентной робототехнической системы на основе ArUco-маркеров с применением классических алгоритмов планирования пути. Описан метод оценки положения и ориентации роботов по изображению, получаемому с камеры, расположенной под потолком помещения, а также процесс передачи данных между управляющим сервером и агентами по Wi-Fi. Представлена модель симуляции перемещения роботов в среде V-REP. Рассмотрены такие вопросы, как планирование пути, локализация и навигация мобильных роботов.

**Ключевые слова:** мультиагентные робототехнические системы, локализация, навигация, планирование пути, мультиагентные системы, автономные роботы, ArUco-маркеры.

### Введение

В настоящее время мультиагентные робототехнические системы (МАРС) являются одним из наиболее перспективных направлений в робототехнике. Возможные области их применения варьируются от оборонной сферы до индустрии развлечений [Манько и др., 2015]. В зависимости от задач, поставленных перед МАРС, выбирается одна из трех стратегий группового управления: централизованная, децентрализованная, иерархическая [Лохин и др., 2014]. Авторами данной статьи реализована централизованная стратегия управления мобильными роботами в замкнутом пространстве на основе информации, получаемой с

монокулярной камеры, а также разработана виртуальная модель для тестирования алгоритмов построения пути и поведения агентов.

## 1 Конструкция роботов-агентов

Единичный модульный робот представляет из себя мобильную робототехническую платформу, состоящую из основного корпуса, управляющей электроники, элемента питания, сменных навесных модулей и мотор-редукторов. Размеры платформы: длина – 210 мм, ширина – 170 мм, высота – 90 мм, диаметр колес – 60 мм. Крепление модулей осуществляется посредством соединения «Ласточкин хвост» с последующей фиксацией винтом. Также на корпусе расположен ArUco маркер, по которому сервер распознает робота. Основным элементом управления платформой является микроконтроллер ESP32 с 32-битным микропроцессором, OnChip Bluetooth и Wi-Fi модулем. Алгоритмы соединения, движения и обработки команд от сервера зашиты в микроконтроллер и реализованы на языке программирования C++.

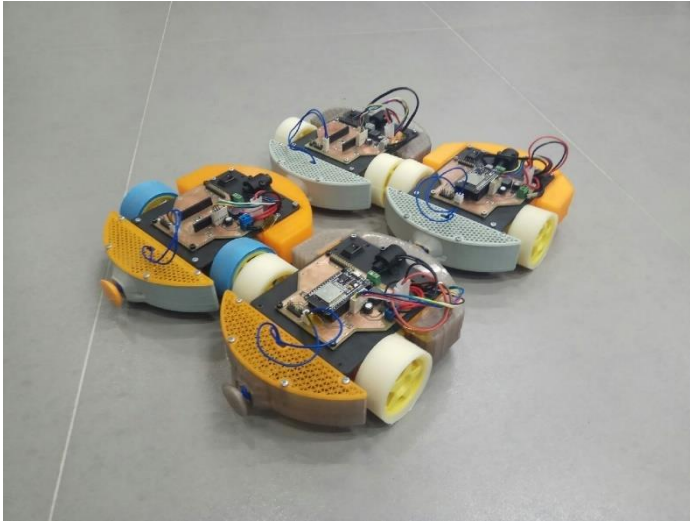


Рис. 1. Внешний вид роботов-агентов.

## 2 Локализация роботов-агентов

### 2.1 Выбор метода локализации

Одним из ключевых аспектов управления роботами-агентами является получение информации о местоположении и ориентации каждого робота в

пространстве. Существуют различные методы позиционирования мобильных роботов. В работе [Aswin N Raghavan et al., 2010] описан подход, использующий технологию Bluetooth. При проведении экспериментов авторы использовали 3 Bluetooth модуля, образующих треугольник со сторонами 5,28 м, 2,62 м, 3,27 м в помещении 6 м на 8 м. Робот выполнял серию случайных перемещений с последующими поворотами, после которых с интервалом в 3 с производилось 5 запросов к модулям Bluetooth для определения уровня принимаемого сигнала с последующим усреднением по пяти полученным значениям. Затем авторами был применен метод итеративной трилатерации для определения положения робота. Среднее значение ошибки позиционирования робота в составило  $0,427 \pm 0,229$  м. Таким образом, данный подход не обеспечивает достаточную точность локализации, что неприемлемо для функционирования мультиагентной системы мобильных роботов, так как среднее значение ошибки в обоих случаях превышает размер робота. Помимо этого существуют так называемые системы глобального позиционирования, например, GPS, однако, они не работают внутри закрытых помещений [Aitor De Blas et al., 2017]. Так же для локализации роботов внутри помещений применяются RFID-метки, однако их использование требует предварительной подготовки среды и кропотливой калибровки, прежде чем система позиционирования начнет работать корректно [Martinelli, 2015]. Кроме вышеперечисленных способов, существует метод локализации на основе маркеров дополненной реальности (ArUco, ArTag, AprilTag и др.), позволяющих определить позицию маркера и его угол поворота относительно плоскости изображения, что дает информацию об ориентации робота. Данный подход был успешно применен в работе [Pickem et al., 2017]. Семейство меток ArUco было выбрано исходя из наличия в библиотеке OpenCV [OpenCV, 2019] модуля для работы с ним. Опытным путем авторами данной статьи было определено среднее значение погрешности позиционирования маркера равное 0,25 м. При этом расстояние от камеры до маркера составляло 3 м, а размер маркера – 5 см. Такое значение погрешности не превышает длину робота, а значит является удовлетворительным. На основании вышеизложенного для определения положения робота в пространстве был выбран последний подход.

## 2.2 Получение данных о местоположении роботов-агентов

Для получения данных о местоположении и ориентации роботов использовался модуль ArUco библиотеки OpenCV, предоставляющий алгоритмы обнаружения маркера дополненной реальности на изображении и для вычисления его пространственного местоположения. Таким образом, имея на роботе соответствующую маркировку, можно определить его

положение и ориентацию в системе координат изображения, получаемого с камеры. Пример подобной локализации робота представлен на рис. 2.

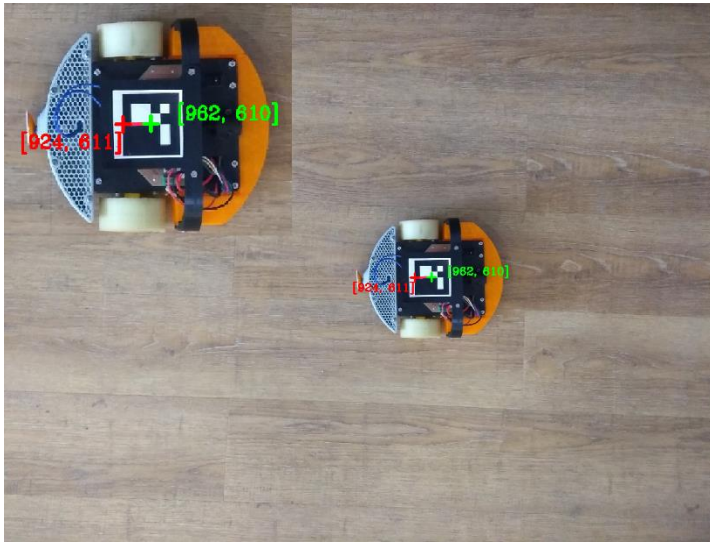


Рис. 2. Результат локализации робота агента.

На рис. 2 представлено изображение, полученное с камеры. Зеленым крестом отмечен центр маркера робота, а красным – конец вектора, проведенного из центра и описывающего его ориентацию. Координаты вектора в пространстве изображения, также представленные на рисунке, имеют значения (962, 610) и (924, 611) для начала и конца вектора соответственно.

### 3 Управление роботами

Передача управляющих сигналов агентам осуществляется по протоколу MQTT. На рис. 3 представлена блок-схема управления роботом при движении по построенному маршруту.

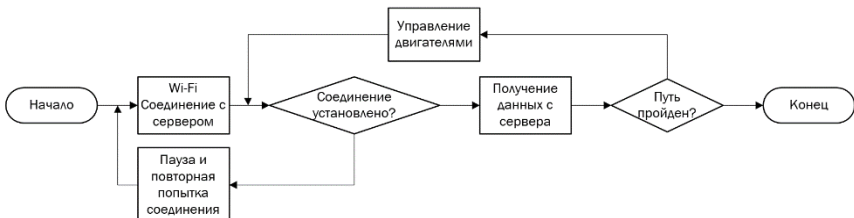


Рис. 3. Алгоритм управления роботом при движении по построенному маршруту.

Как видно из рис. 3, платформа, подключенная к серверу, получает данные по идентификатору вида “platform/N”, где N – уникальный id, соответствующий id маркера, закрепленного на роботе. Таким образом, робот получает команду на поворот вокруг своей оси, остановку или движение прямо, а также величину угла отклонения от заданной точки маршрута, необходимую для работы ПИД-регуляторов, после чего, на основании этих данных, происходит управление двигателями.

## 4 Алгоритм планирования пути

В работе [Захаров и др., 2018] был проведен анализ алгоритмов планирования пути, и в качестве наиболее подходящего для задачи реконфигурации группы роботов в двумерном пространстве был выбран алгоритм RRT-Connect [JJ Kuffner Jr et al., 2000]. Данный алгоритм строит два дерева – из начальной и конечной точки – и заканчивает работу тогда, когда они соединятся в одной точке. Деревом называются множество точек в пространстве, расположенных последовательно и соединённых между собой отрезками. Поиск пути для одного робота с помощью алгоритма RRT-Connect занимает меньше секунды на компьютере с процессором Intel Core i5 3230M.

Алгоритм планирования принимает следующие входные данные: начальная точка, конечная точка, шаг планировщика (максимальное расстояние между точками пути) и данные о препятствиях. Эти данные можно получить как из компьютерной симуляции, так и из реального эксперимента, следовательно, этот алгоритм планирования пути подойдёт как для реального робота, так и для компьютерной модели.

Для предотвращения коллизий алгоритмом движения робота предусмотрена его остановка при приближении на определённое расстояние к другому роботу. Из двух роботов продолжит движение тот, длина оставшегося пути которого больше, а второй будет ждать, пока первый не отъедет на безопасное расстояние, и уже после продолжит движение по маршруту. Если же остановка одного из двух роботов не предотвращает столкновения, происходит перестроение маршрута второго робота, в объезд первого.

## 5 Проведение экспериментов

### 5.1 Среда моделирования

Для проведения компьютерных экспериментов был выбран бесплатный симулятор роботов V-REP, так как в нём реализованы возможности,

необходимые в контексте задачи планирования пути для группы роботов: каждым объектом на сцене можно управлять с помощью встроенного скрипта, ROS или BlueZero узла или удалённого API (Application Programming Interface), имеется возможность фиксирования столкновений, а также 4 физических движка, благодаря которым результаты компьютерного эксперимента могут быть приближены к результатам реального эксперимента. Контроллеры могут быть написаны на языках C/C++, Python, Java, Lua, Matlab или Octave. Для реализации алгоритма локализации и навигации роботов с V-REP использовался язык Python.

## 5.2 Процесс симуляции

Для тестирования работы алгоритма и движения роботов по заданному пути была использована модель Pioneer 3-DX [Generationrobots, 2019]. На первом шаге работы программы происходит локализация всех объектов на сцене и отправка данных планировщику. На втором шаге происходит нахождение путей для каждого робота. На третьем шаге, после того как все пути сгенерированы, каждый робот начинает движение по собственному маршруту, что проиллюстрировано на рис. 4.

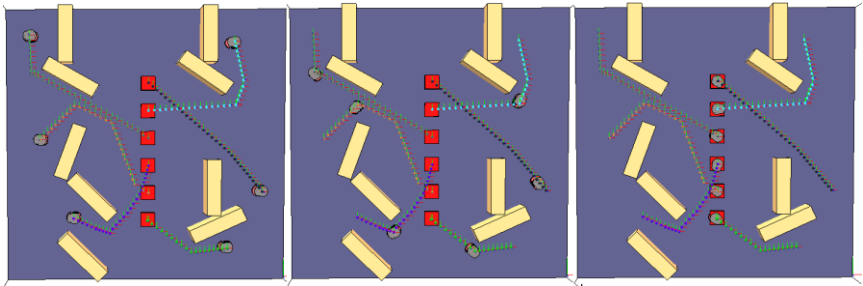


Рис. 4. Процесс симуляции построения пути и движения роботов по маршруту.

На рис. 4 представлен процесс симуляции построения пути и движения группы роботов. Серыми точками представлены роботы, маршрут каждого из которых показан в виде последовательности точек определённого цвета. Препятствия, в обход которых строится маршрут, представлены как параллелепипеды желтого цвета, а целевыми точками для каждого робота являются центры красных квадратов. На левой части рис. 4 роботы находятся в исходных позициях, на средней – роботы в процессе движения, а на правой – результат передвижения роботов по построенным маршрутам. Как видно из рис. 4, каждый робот занял необходимую позицию на поле.

### 5.3 Эксперименты на реальной платформе

При проведении экспериментов использовалась камера Logitech C525, размещенная на высоте 2 м и охватывающая квадрат 1,5 м на 1,5 м. Для построения маршрута движения, помимо самих роботов, маркерами были отмечены целевые точки, к которой платформы должны прийти, и препятствие, которое платформы должны объезжать. На рис. 5 демонстрируется процесс передвижения трех роботов по построенным траекториям.

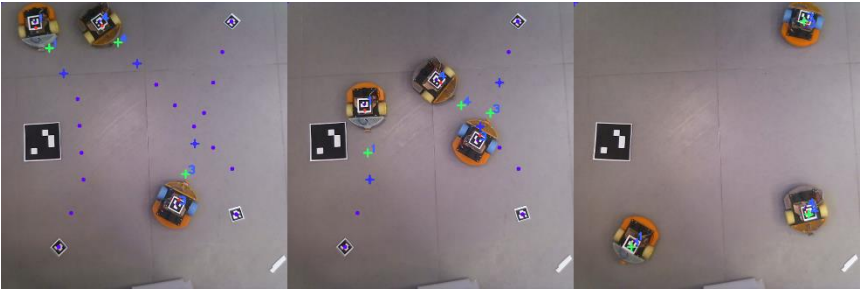


Рис. 5. Результат построения маршрута для реальной платформы.

Фиолетовыми кругами отмечены точки траектории движения в объезд препятствий. Зелеными крестами отмечены текущие точки маршрута, а синими – следующие за ними. Как видно из рис. 5, построенные траектория движения для робота 1 успешно огибает препятствие. В ходе проведения испытаний роботы успешно достигали конечных точек маршрута, однако были выявлены проблемы перерегулирования поворота платформы по углу и скорости движения, связанные с малым диапазоном допустимых значений управляющего воздействия на двигатели и малой чувствительностью к сигналам управления.

### 5.4 Анализ точности передвижения платформы.

В ходе испытаний было проведено 50 запусков реальной платформы как по автоматически сгенерированному пути, так и пути, заданному вручную. На рис. 6 представлен один из графиков прохождения роботом заданного пути.

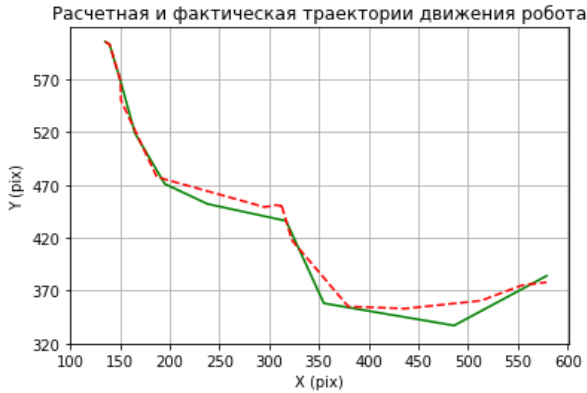


Рис. 6. График прохождения роботом пути.

На приведенном выше графике непрерывной зеленой линией отмечена расчетная траектория движения робота, а пунктирной красной — фактическая. Относительно точек расчетной траектории среднее отклонение фактического положения платформы составило 12 пикселей изображения, что составляет 0,5 от длины платформы. Для V-REP симуляции среднее значение отклонения робота от траектории составило 0,1 от размера робота. Для всей серии экспериментов среднее значение отклонения положения робота от траектории движения составило 0,63 от длины робота.

## 6 Заключение

В результате данного исследования был предложен и практически реализован метод централизованного управления мультиагентной робототехнической системой на основе применения AgUco-маркеров и алгоритма построения пути RRT-Connect. Симуляция работы алгоритма планирования маршрута и движения роботов показала пригодность данного подхода при управлении мобильными роботами. Эксперименты, проведенные с реальными платформами, также подтвердили эффективность предложенных методов, несмотря на проблемы перерегулирования угла поворота и скорости движения роботов. В будущем планируется модернизация роботов с целью обеспечения более точного управления двигателями для устранения вышеописанных недостатков, а также учет реального размера робота для более корректного построения траектории движения.



## Список литературы

- [Захаров и др., 2018] Захаров К.С., Ватаманюк И.В., Крестовников К.Д. Алгоритмы самореко конфигурации робототехнических систем. // Робототехника и техническая кибернетика. №4(21). СПб: ЦНИИ РТК, 2018.
- [Лохин и др., 2014] Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Диане С.А.-К. Перспективы применения, принципы построения и проблемы разработки мультиагентных робототехнических систем. // XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 2014
- [Манько и др., 2015] Манько С.В., Лохин В.М., Романов М.П. Концепция построения мультиагентных робототехнических систем. // Вестник МГТУ МИРЭА. №3. Москва, 2015
- [Aitor De Blas et al., 2017] A. Blas, D. López-de-Ipiña. Improving trilateration for indoors localization using BLE beacons. // 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech). 2017.
- [Aswin N Raghavan et al., 2010] Aswin N Raghavan, Harini Ananthapadmanaban, Manimaran S Sivamurugan, Balaraman Ravindran. Accurate mobile robot localization in indoor environments using Bluetooth. // IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2010.
- [Generationrobots, 2019] Pioneer P3-DX mobile robot. - <https://www.generationrobots.com/en/402395-robot-mobile-pioneer-3-dx.html>
- [JJ Kuffner Jr et al., 2000] JJ Kuffner Jr, LaValle S.M. RRT-Connect: An Efficient Approach to Single-Query Path Planning. // IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2000.
- [Martinelli, 2015] F. Martinelli. A robot localization system combining RSSI and Phase Shift in UHF-RFID signals. // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2015. Vol. 23. p. 1782 – 1796.
- [OpenCV, 2019] OpenCV Library. - <https://docs.opencv.org>
- [Pickem et al., 2017] D. Pickem, P. Glotfelter, L. Wang, M. Mote, A. Ames, E. Feron, M. Egerstedt. The Robotarium: A remotely accessible swarm robotics research testbed. // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2017.