

На правах рукописи

Хо Цзяньвень

**УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ГРУППЫ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ
ВИЗУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ОТ СОПРОВОЖДАЮЩЕГО ДРОНА**

Специальность 05.02.05

Роботы, мехатроника и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

МОСКВА – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Зенкевич Станислав Леонидович**,
доктор физико-математических наук, профессор
Назарова Анаид Вартановна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «робототехнические системы и
мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Защита состоится **xx.xx.20xx** года в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный пер., д. 10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru

Отзывы и замечания на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим высылать по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.141.02.

Автореферат разослан «_____» _____ 20__ г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 212.141.02

кандидат технических наук, доцент

Муратов И. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние годы стало актуальным новое направление робототехники – групповая или роевая робототехника, которая широко применяется в областях, связанных с риском для жизни человека. Преимущество группы роботов заключается в том, что она обладает высокими гибкостью и устойчивостью к сбоям, большим радиусом действия, а расширенный набор выполняемых функций обеспечивает высокую вероятность успешной реализации поставленных задач.

Системы групповой робототехники, в состав которых входят дрон и группа мобильных роботов, могут выполнять задачи охраны территории, разведки и наблюдения за обстановкой, использоваться в ходе поисково-спасательных операций, при прогнозе, сборе урожая и обнаружении очагов вредителей в сельском хозяйстве. Дрон может обеспечить наблюдение за обширным районом, однако обнаружение наземных целей ограничено его скоростью и высотой полёта. С другой стороны, мобильный робот может точно определить местоположение наземных целей, но его недостатком является невысокая скорость разведки. Поэтому "картины восприятия" дрона и мобильного робота дополняют друг друга: дрон следит за препятствиями и мобильными роботами, фотографируя их с помощью камеры и передавая мобильному роботу глобальную карту, а мобильный робот может заметить реальные динамические препятствия, отсутствующие на глобальной карте. На основе этой информации может быть скорректировано управление движением группы мобильных роботов в случае изменяющейся внешней среды.

В существующих проектах группы роботов используются для решения следующих задач: управление движением группы роботов с использованием информации, получаемой либо от дрона, либо от мобильного робота; планирование движения группы роботов выполняемое заранее и в процессе движения не учитывающее динамическое изменение среды; топология группы при движении не изменяется, роботы в группе являются равноправными и обладают одинаковыми характеристиками.

Однако, на практике группа роботов должна двигаться без априорных знаний о внешней среде и выполнять перестроение при изменении среды, например, в результате катастрофы или коррекции поставленной задачи. Поэтому разработка систем управления группой роботов, включающей дроны для решения задач сбора информации и картографирования местности, и команду наземных роботов с ведущим роботом, например, для сопровождения и эвакуации пострадавших из опасной зоны, является актуальной научно-технической задачей.

В данной диссертационной работе рассматривается система управления движением группы роботов в среде с препятствиями, в которой дрон и наземный ведущий робот должны быть связаны сенсорной системой, включающей системы технического зрения и сканирующие лазерные дальнометры. На основе полученных данных группа мобильных роботов должна перемещаться вдоль заданной программной траектории, а в случае появления препятствий изменять

свою конфигурацию для их обхода.

Разработка систем управления движением групп мобильных роботов на основе визуальной информации от дрона ведется в различных институтах России, Китая, Европы и США. Ключевыми организациями в этом научном направлении являются университет Иннополис в России, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Шэньянский научно-исследовательский институт автоматки, Бэйханский университет в Китае, кафедра кибернетики Чешского технического университета, институт системотехники Ганноверского университета (Германия), лаборатория автономной навигации и восприятия Технион - Израильского технологического института, Массачусетский технологический институт (США), Калифорнийский университет в Беркли (США), Технологический институт Джорджии (США).

Цели и задачи. Цель диссертационной работы состоит в разработке системы управления движением группы мобильных роботов по данным от сопровождающего дрона для быстрой доставки необходимых грузов в пострадавший район при техногенной или природной катастрофе. Поэтому необходимо решить задачи сбора информации, построения глобальной карты, планирования глобальной траектории, а также движения группы роботов вдоль спланированной траектории и перестроения группы роботов для быстрого прохода или обхода препятствий. Для достижения этой цели в работе были поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ и сравнение существующих подходов к планированию траектории движения наземной группы мобильных роботов и управлению её перестроением с использованием визуальной информации от дрона.

2. Разработка алгоритма построения карты, включающего модель согласования карт (map matching) в системе координат наземного ведущего робота и определение параметров сопоставления глобальной и локальной карт.

3. Проведение глобального и локального планирования траектории ведущего робота.

4. Разработка алгоритма управления движением ведущего робота вдоль спланированной траектории.

5. Определение целевого расположения отдельного робота в новой топологии группы, в том числе, формирование множества возможных конфигураций роботов.

6. Решение задачи локализации роботов с использованием данных от различных сенсорных систем.

7. Исследование алгоритма предотвращения столкновений роботов при смене топологии группы.

8. Разработка стратегии управления перестроением группы роботов на логическом уровне системы управления (СУ) и метода управления движением группы роботов на тактическом уровне СУ.

9. Проведение компьютерного моделирования управления движением группы роботов на основе визуальной информации от дрона, а также экспериментальных исследований разработанных методов управления перестроением группы роботов.

Методология и методы исследования. В диссертационной работе используются классические методы теории автоматического управления, методы теории конечных автоматов, алгоритмы аукциона для распределения целей между роботами, методы теории перечисления Пойа, методы наименьших квадратов, алгоритмы поиска A*, алгоритмы Дугласа-Пекера, методы теории преобразования Фурье. Серия проведенных компьютерных исследований и полунатурное моделирование подтвердили работоспособность и правильность предложенных алгоритмов; в НУЦ «Робототехника» проведен ряд натуральных экспериментов.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Разработана методика определения параметров сопоставления карт в системе координат робота с использованием данных от дрона и ведущего наземного робота.

2. Разработан алгоритм построения программной траектории движения робота с учетом ограничений обхода выделенных узлов на карте.

3. Разработан метод определения целевого положения отдельных роботов при перестроении группы, обеспечивающий наименьшую сумму линейных перемещений роботов.

4. Разработана методика управления перестроением группы роботов в среде с препятствиями, обеспечивающая предотвращение столкновений роботов с препятствиями и другими роботами при изменении конфигурации группы.

Практическая значимость. Диссертационная работа имеет практическую значимость при решении задач управления движением групп роботов благодаря разработанным подходам к управлению коллективом мобильных роботов с сопровождающим дроном. Данная работа может лечь в основу построения систем управления автономными группами роботов при работе в среде с препятствиями. Разработанные методы и алгоритмы могут быть применены в области патрулирования территорий, грузоперевозок, сельского хозяйства, выполнения задач мониторинга, а также поисково-спасательных операций.

Защищаемые положения

1. Построение программной траектории ведущего наземного робота на основе сопоставления карт с данными от сопровождающего дрона.

2. Метод определения целевого пункта движения отдельного робота при изменении топологии группы.

3. Стратегия предотвращения столкновений роботов группы при одновременной смене их положений.

4. Алгоритм управления перестроением группы роботов, реализованный на логическом уровне СУ.

Апробация работы. Диссертационная работа в целом и её основные результаты обсуждались и докладывались на следующих конференциях и научных семинарах:

1. Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (Казань, 2017);

2. III Международная научно-практическая конференция «WORLD SCIENCE» (Карловы Вары - Москва, 2018);

3. Научная конференция для студентов, молодых ученых и аспирантов МГТУ им. Н. Э. Баумана, посвященная 105-летию Е. П. Попова (Москва, 2019);

4. Всероссийская научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника» (Санкт-Петербург, 2019).

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 9 научных статьях, в том числе – 4 публикации в изданиях из перечня ВАК РФ, 3 статьи из перечня международных научных изданий, включенных в базу данных Web of Science (Wos) или Scopus.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 147 печатных страниц, 69 рисунков, 8 таблиц. Библиография содержит 81 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы, представлена краткая структура диссертации, приведены защищаемые положения.

В первой главе рассмотрено понятие групповой робототехники. Проведен сравнительный анализ существующих стратегий управления группой роботов: централизованной, децентрализованной и гибридной, а также представлены примеры использования групповой робототехники. Приведен обзор существующих методов планирования траекторий мобильных роботов с учетом визуальной информации от дрона, а также обзор известных способов управления перестроением группы мобильных роботов и сравнение этих способов. Определены цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена разработке алгоритма построения программной траектории наземного ведущего робота группы на основе сопоставления карт, построенных с использованием данных от камеры сопровождающего дрона и датчика ведущего робота. Алгоритм построения программной траектории представлен на Рис.1. В диссертации разработаны и исследованы следующие задачи.

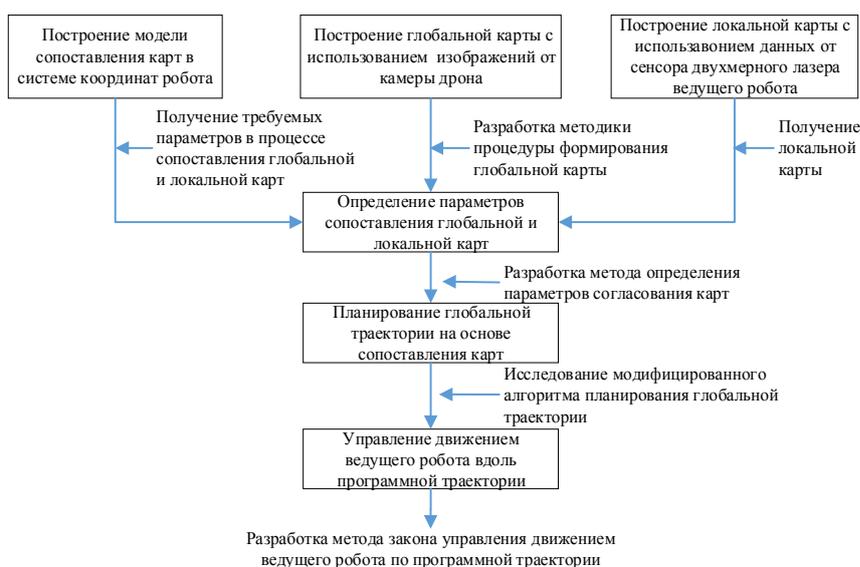


Рис.1. Алгоритм построения траектории ведущего робота

Модель сопоставления карт в системе координат ведущего робота. Пусть группа мобильных роботов и дрон движутся в пространстве $OXYZ$, дрон

летит на постоянной высоте ($z\text{-const}$). На борту ведущего робота группы установлен сканирующий двухмерный лазерный дальномер, система координат (с.к.) которого неподвижна относительно с.к. ведущего робота $O_r X_r Y_r Z_r$. На борту дрона – камера с с.к., неподвижной относительно с.к. дрона $O_g X_g Y_g Z_g$ и перемещающейся вместе с ним (Рис.2). Пусть M – неподвижная точка, принадлежащая рельефу, с вектором r_0 в неподвижной системе $OXYZ$, с другой стороны r_g – вектор, определяющий положение точки M в системе $O_g X_g Y_g Z_g$, полученный от камеры дрона. Тогда с помощью трансформации координат из системы $O_g X_g Y_g Z_g$ в систему $O_r X_r Y_r Z_r$ получим: $r_r = T_r^{-1} T_g r_g$, где T_g, T_r – матрицы перехода от связанных с дроном и ведущим роботом системами координат к абсолютной с.к. соответственно; вектор r , определяющий положение точки M в системе $O_r X_r Y_r Z_r$, можно получить, используя координаты конечной точки, измеренные сканирующим лазерным дальномером. Тогда соотношение для нахождения однородной матрицы T , связывающей векторы r_r и r : $r_r = T r$ имеет вид $T = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & x \\ \sin\theta & \cos\theta & y \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix}$, где θ, x, y, m – угол поворота, координаты переноса и масштаб между векторами r_r и r соответственно. Матрица T содержит четыре неизвестных параметра, для определения которых нужно иметь не меньше четырех уравнений и четырех пар точек на двух картах. Поэтому решение проблемы состоит в построении глобальной и локальной карт, поиске пар характерных точек и вычислении четырех неизвестных параметров.

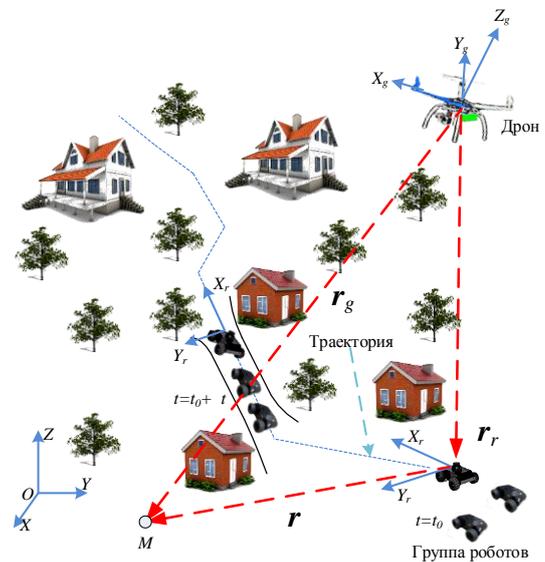


Рис.2. Системы координат дрона и ведущего робота группы

Построение глобальной карты с использованием изображений от камеры дрона. Предположим, что над некоторой территорией, по которой движется группа мобильных роботов, летит дрон по заданной траектории. На ней выбирается ряд равноотстоящих точек N , которые соответствуют тем моментам времени, когда камера дрона снимает очередной кадр K_i ($i = 0, 1, \dots, n - 1$). Каждый кадр i передается ведущему роботу, и записывается по очереди в буфер B (Рис.3). Объем памяти буфера B зависит от размера изображения каждого кадра. За время Δt в процессор P записывается по очереди один кадр из буфера B . Для уменьшения влияния на снимки освещения, окружающей среды, различных шумов датчика, и вибрации в полёте используется регистрация изображений (image registration) на основе области преобразования (transform domain). Поэтому можно получить параметры преобразования подобия (то есть поворот, перенос и масштаб) между последовательными кадрами для обработки каждого изображения. Для

формирования глобальной карты требуется сшивание этих изображений с помощью линейно-взвешенного метода сшивания, и обнаружение объектов с использованием модифицированного алгоритма Дугласа-Пекера.

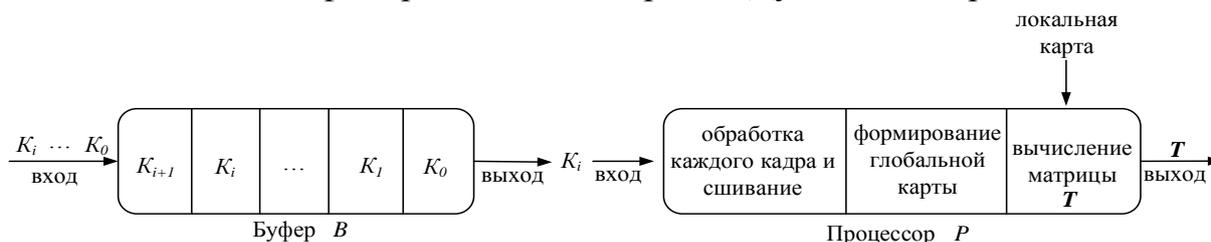


Рис.3. Процедура нахождения матрицы T

После построения глобальной карты необходимо построить локальную карту с помощью метода SLAM, используя данные от сканирующего лазерного дальномера ведущего робота. Получив глобальную и локальную карты нужно перейти к задаче их сопоставления, то есть вычисления матрицы T .

Определение параметров сопоставления карт. С использованием алгоритма Харриса (Harris), был получен набор характерных точек (A') на глобальной карте, которые необходимо соотнести со схожими точками (A) на локальной карте. Корреляция (C_θ) между прямолинейными отрезками, соединяющими характерные точки на локальной карте и границами препятствий на глобальной карте может быть записана как:

$$C_\theta = \frac{{}^L c_k \quad {}^L c_{k+1} \cdot {}^R c_n \quad {}^R c_{n+1}}{|{}^L c_k \quad {}^L c_{k+1}| \times |{}^R c_n \quad {}^R c_{n+1}|},$$

где ${}^L c_k \in A'$, ${}^R c_n \in A$. Для анализа корреляции данных определяется пороговое значение C'_θ . Если $C_\theta < C'_\theta$, линейный сегмент не коррелирует с краем препятствия, в противном случае генерируется соответствующая пара точек Q и Q' (где $Q \in {}^L c_k$ и $Q' \in {}^R c_n$). Используя метод минимизации квадрата ошибки $\varepsilon = \min \|T r_i - r_{ri}\|^2$, где $r_i \in Q'$, $r_{ri} \in Q$ нетрудно найти матрицу T из этих пар особых точек:

$$\begin{cases} T = r_{ri} r_i^{-1}; & \text{если } i = 4 \\ T = (r_i^T r_i)^{-1} r_i r_{ri}; & i > 4 \end{cases}.$$

Планирование глобальной траектории. После того, как установлена связь между объектами на картах, можно перейти к задаче планирования глобальной траектории. При планировании кратчайшего маршрута с использованием алгоритма A^* должен быть пройден каждый узел траектории, что приводит к большому объему и длительному времени вычислений. Для сокращения вычислений нужно ограничить обход узлов с учетом отсутствия или наличия препятствий вокруг узла. На основе условий ограничения движения алгоритм A^* модифицирован следующим образом:

- ① Ввод глобальной карты, начальной точки S_{fath} и целевой точки F .
- ② Начальная точка S_{fath} сохраняется в списке Open-List.
- ③ Вычисляется стоимость каждого узла n в списке Open-List с помощью функции $l(n) = g(n) + h(n)$, где $g(n)$ – функция фактического расстояния от начальной точки S_{fath} до узла n , а $h(n)$ – эвристическая функция

оцениваемого расстояния от узла n до целевой точки F . Узел с наименьшей стоимостью исключается из списка Open-List и переносится в список Closed-List.

- ④ Если узел n с наименьшей стоимостью является целевой точкой, то – конец алгоритма, в противном случае переход к ⑤.
- ⑤ Обход узлов по горизонтальной и вертикальной осям карты.
- ⑥ Если робот встречается с препятствием или достигает края карты, тогда обход узла по диагонали карты, переход к ⑦.
- ⑦ Определяется удаленный узел с помощью условий ограничения движения. Если узел является удаленным, то переход к ⑤; в противном случае узел сохраняется в списке Open-List, затем переход к ③.

После получения глобальной траектории выполняется локальное планирование движения вдоль неё ведущего робота по поступающим данным от сканера при помощи метода динамического окна.

Управление движением ведущего робота вдоль программной траектории.

При формировании закона управления движением используется следующая кинематическая модель робота

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 \\ \sin \varphi & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix},$$

где x, y, φ – линейные и угловая координаты ведущего робота (Рис.4), v, ω – линейная и угловая скорости. На вход системы управления поступает непрерывная последовательность в виде программной траектории (x^*, y^*, φ^*) .

Предположим, что программная траектория является траекторией движения эталонного робота с линейной v^* и угловой ω^* скоростями, т. е. $x_{t+1}^* = x_t^* + v^* \cdot \Delta t \cdot \cos \varphi_t^*$, $y_{t+1}^* = y_t^* + v^* \cdot \Delta t \cdot \sin \varphi_t^*$, $\varphi_{t+1}^* = \varphi_t^* + \omega^* \cdot \Delta t$. Тогда из модели ошибки, предложенной Nelson W. L. в 1988 г. следует:

$$\begin{pmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \\ \dot{e}_\varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos e_\varphi & 0 \\ \sin e_\varphi & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v^* \\ \omega^* \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1 & e_y \\ 0 & -e_x \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix},$$

где e_x, e_y – погрешность положения; e_φ – погрешность ориентации. Предположим, что закон управления роботом вдоль сегмента траектории получен на основе модели ошибки

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v^* \cos e_\varphi + v_b \\ \omega^* + w_b \end{pmatrix},$$

где v_b, w_b – неизвестные величины. Закон управления разработан на основе классического подхода А. М. Ляпунова, кандидат на функцию Ляпунова имеет вид $V = \frac{1}{2} K_1 (e_x^2 + e_y^2) + \frac{1}{2} K_2 e_\varphi^2$, где K_1, K_2 – параметры управления, $K_1, K_2 > 0$.

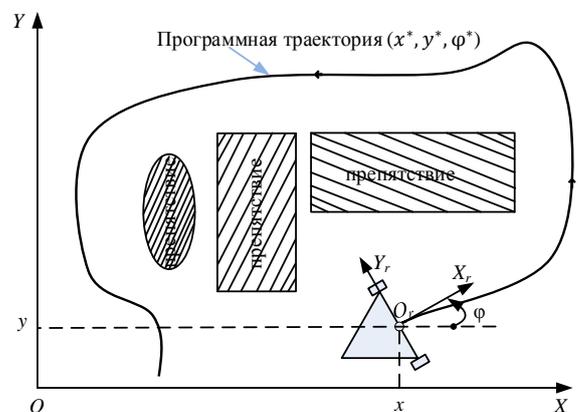


Рис.4.Схема движения ведущего робота по программной траектории

В результате, полученный закон управления имеет вид

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v^* \cos e_\varphi + K_1 e_x \\ \omega^* + \frac{K_1}{K_2} v^* e_y \frac{\sin e_\varphi}{e_\varphi} \end{pmatrix}.$$

На Рис.5 представлены результаты моделирования закона управления движением робота вдоль заданной программной траектории. Робот движется из начального положения $(x_0, y_0, \varphi_0) = (1.2, -2.0, 0)$ с начальными линейной и угловой скоростями $v_0 = 0.4$ см/с , $\omega_0 = 0.3$ рад/с и параметрами управления $K_1 = K_2 = 3$, а эталонный робот из начального положения $(x_0^*, y_0^*, \varphi_0^*) = (0, 0, \frac{\pi}{6})$ с начальными линейной и угловой скоростями $v_0^* = 0.3$ см/с , $\omega_0^* = 0$ рад/с. Как видно, через 4 секунды отклонения движения робота от данной программной траектории приближаются к нулю.

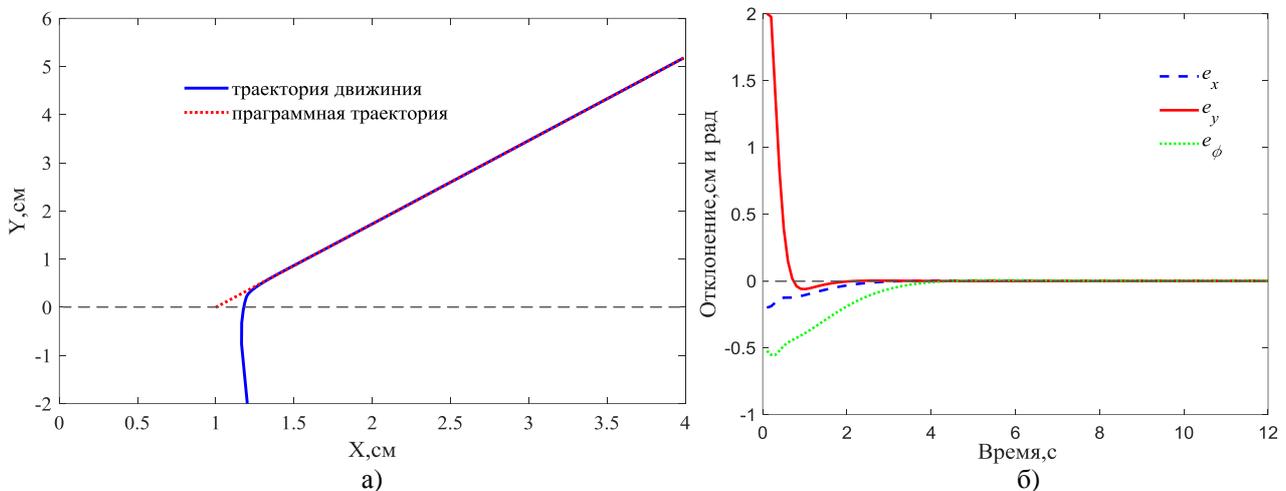


Рис. 5. Результаты моделирования управления движением робота: а) программная траектория и траектория движения робота; б) отклонение движения робота вдоль программной траектории

В третьей главе решается задача изменения топологии группы в процессе движения за ведущим роботом при появлении препятствий. Исследована стратегия управления перестроением группы роботов в среде с препятствиями, а также решен ряд задач совместного выполнения перестроения.

На первом этапе разработана структура СУ группой роботов, изображенная на Рис.6. Верхний уровень представляет собой управляющий центр, в состав которого входят блок наблюдения за состоянием системы и блок формирования команд для логического уровня. Логический уровень отвечает за изменение параметров движения группы роботов в среде с препятствиями и координацию их действий в зависимости от результата выполнения задания

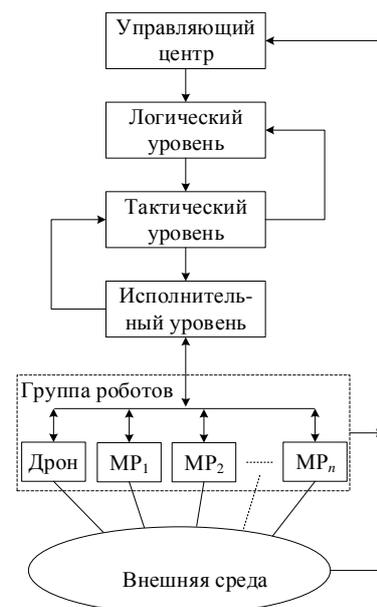


Рис.6. Структурная система управления

каждым роботом. На тактическом уровне вырабатываются команды управления перестроением группы и её движением с сохранением конфигурации. Исполнительный уровень выполняет управление механизмами на основе их законов управления. В третьей главе рассматриваются задачи, решаемые логическим уровнем СУ, а именно – формирование различных вариантов конфигураций группы роботов, связанных с препятствиями на глобальной карте с помощью теории перечисления Пойа, когда каждый вариант топологии группы соотносится с формой препятствия. На следующем этапе нужно перейти к задаче определения целевого пункта движения отдельного робота из текущей топологии группы в её целевую конфигурацию (Рис.7).

Определение целевого пункта движения робота при изменении топологии группы.

Предположим, что положение группы роботов F задаётся множеством их декартовых координат: $F = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$, где n – количество роботов группы, r_i – вектор декартовых координат робота R_i в абсолютной с.к.. Тогда для определения целевого пункта движения отдельного робота используется метод кратчайшего перемещения роботов из текущего положения r_i в целевое положение r'_j по прямой. Поэтому определяем матрицу $X_{n \times n} = [x_{ij}]$, где $x_{ij} \in \{0,1\} (i, j \in n)$, $x_{ij} = 1$ – если задана связь между текущим и целевым положениями робота, если связь не задана, то $x_{ij} = 0$. Поскольку каждым роботом может быть занято только одно положение в целевой топологии, то $\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1$ и $\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1$. Теперь цель состоит в том, чтобы найти значения параметров x_{ij} , которые приводят к наименьшей сумме перемещений отдельного робота, то есть достичь условия: $\sum_{i,j=1}^n x_{ij} \|r_i - r'_j\|^2 \rightarrow \min$. Для выполнения данного соотношения используется алгоритм аукциона. После получения целевого пункта движения отдельного робота, нужно перейти к задаче определения собственного положения роботов.

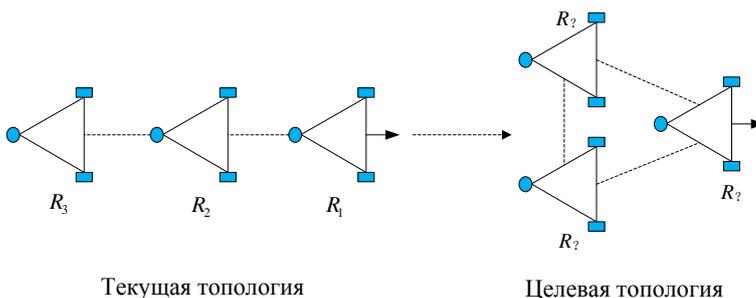


Рис.7. Определение целевого пункта движения отдельного робота

Локализация роботов.

В процессе движения группы робот должен автономно определять собственное положение, используя комплексирование информации от датчиков колеса, GPS и камеры. Пусть r – координаты робота, которые необходимо оценить, используя измерения координат r' : $r' = r e + \xi$, где $r' = (r_o, r_g, r_c)^T$ – координаты датчиков колеса, GPS и камеры; $e = (1,1,1)^T$; $\xi = (\xi_o, \xi_g, \xi_c)^T$ – шумы датчиков колеса, GPS и камеры со следующими статистическими характеристиками: $E(\xi) = 0$; $E(\xi\xi^T) = D$, D – матрица ковариаций шумов, $D = \text{diag}(d_1, d_2, d_3)$, d_i – дисперсия шума в измерении i -ого датчика. Тогда сформируем оценку \hat{r} параметров r по совокупности измерений r' в виде их линейной комбинации $\hat{r} = a^T r'$, $a = (a_1, a_2, a_3)^T$ – коэффициенты, $a_1 + a_2 + a_3 = 1$. Для реализации оценки параметра,

измеряемого датчиками с различной точностью, необходимо выбрать коэффициенты a_1, a_2, a_3 . Метод поиска коэффициентов предложен С. Л. Зенкевичем и А. В. Назаровой в работе, связанной с исследованием оценки параметра по информации от нескольких датчиков (2010 г.). Коэффициенты имеют вид $\mathbf{a} = \frac{\mathbf{D}^{-1}\mathbf{e}}{\mathbf{e}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{e}}$, то есть $a_i = \frac{1}{d_i} / \sum_{j=1}^3 \frac{1}{d_j}$. Теперь, когда все роботы знают свои положения и их планируемые траектории, может быть разработана стратегия предотвращения столкновений роботов при перестроении.

Стратегия предотвращения столкновений роботов при перестроении.

Смена конфигурации группы состоит в движении роботов из начального (F_0) в целевое (F_g) положение. Роботы перемещаются по прямой, соединяющей F_0 и F_g с кусочно-постоянной скоростью. Все роботы знают начальные и целевые положения остальных роботов и, следовательно, их планируемые траектории. При необходимости робот останавливается и пропускает другой, движущийся по пересекающей его траекторию. Пусть T_i – время движения робота R_i по пути к целевой конфигурации. Уравнение движения робота R_i имеет следующий вид:

вид: $\begin{cases} \dot{x}_i = v_i^x \\ \dot{y}_i = v_i^y \end{cases}$, где v_i^x, v_i^y – проекции скорости на оси X и Y . Тогда изменение

координат робота $\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_i^o + \mathbf{v}_i t$ ($t \in T_i$), т.е. $\mathbf{v}_i = \frac{\mathbf{r}_i' - \mathbf{r}_i^o}{|r_i' - r_i^o|} v$, где $\mathbf{r}_i^o, \mathbf{r}_i'$ – начальные и целевые координаты робота R_i в абсолютной системе координат; v – модуль скорости. Тогда положение роботов R_i относительно R_j : $\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j$, а расстояние между роботами R_i и R_j : $d_{ij}^2(t) = \mathbf{r}_{ij}^T \cdot \mathbf{r}_{ij}$. Предположим, что d – расстояние безопасности между роботами. Если $d_{ij}(t) < d$, возможно столкновение между роботами R_i и R_j , чтобы его предотвратить, робот, ближайший к отрезку пути от текущего положения до целевого, должен остановиться и ждать.

Алгоритм предотвращения столкновений сформулирован следующим образом:

- ① Ввод целевого положения каждого робота $F_g = \{\mathbf{r}_g^i\}$, расстояния безопасности между роботами d , порога расстояния до цели d^* и модуля скорости v .
- ② Получение текущих координат каждого робота $F = \{\mathbf{r}^i\}$, вычисление расстояния $d_{ig}(t)$ от текущего до целевого положения с использованием соотношения $d_{ig}^2(t) = (\mathbf{r}^i - \mathbf{r}_g^i)^T \cdot (\mathbf{r}^i - \mathbf{r}_g^i)$ и получение расстояния $d_{ij}(t)$ между роботами R_i и R_j .
- ③ Если $d_{ig}(t) \leq d^*$, то переход к ⑥; в противном случае переход к ④.
- ④ Если $d_{ij}(t) > d$, робот может двигаться дальше, переход к ③; если $d_{ij}(t) \leq d$, возможно столкновение между роботами R_i и R_j , переход к ⑤.
- ⑤ Если $d_{ig}(t) > d_{jg}(t)$, робот R_j останавливается и пропускает R_i , в противном случае стоит робот R_i . Далее переход к ④.
- ⑥ Конец работы алгоритма.

При движении группы на её пути возможны статические препятствия, чтобы

их объехать нужно, во-первых, вычислить расстояния $d_{i_0}(t)$ от текущего положения робота до препятствия; во-вторых, если $d_{i_0}(t) < d$, обеспечить управление движением робота для обхода препятствия, как это рассмотрено выше при предотвращении столкновений.

Логический уровень СУ группой роботов. На логическом уровне формируется движение группы роботов при возникновении препятствий с использованием аппарата конечных автоматов. Система управления группой роботов становится двухуровневой. Верхний уровень – групповой координатор – выбирает режим движения группы роботов, в зависимости от команды управляющего центра и результата выполнения задания соответствующим роботом; а нижний уровень – логическое управление отдельным роботом – обеспечивает управление движением робота в различных режимах, связанных с законом управления на тактическом уровне.

Конечно-автоматная модель отдельного робота имеет вид $A = (U_A, X_A, Z_A, f, h)$, где множество входных команд $U_A = \{ \text{pause} (u_0), \text{movement} (u_1), \text{transform} (u_2) \}$; множество состояний $X_A = \{ \text{неподвижное} (x_0), \text{движение с сохранением конфигурации} (x_1), \text{движение при перестроении} (x_2) \}$; множество входных сигналов $Z_A = \{ \text{success}_p (z_1), \text{success}_m (z_2) \}$. Соответствующая диаграмма Мура представлена на Рис. 8. Групповой координатор описывается

многовходовым конечным автоматом, входами которого являются команды от управляющего центра и выходные сигналы автоматов роботов, а выходами являются логические команды соответствующим роботам. Схема логического уровня системы управления группой роботов представлена на Рис.9, а.

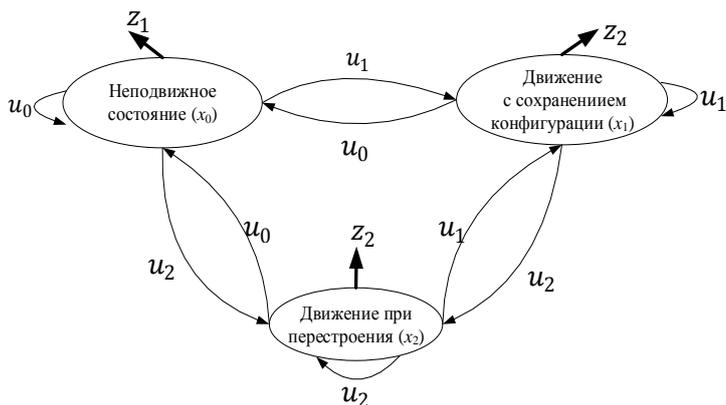


Рис.8. Диаграмма автомата отдельного

управляемого движения группы роботов. Реализация данной задачи предполагает, что группа роботов может быть в одном из четырёх состояний: x_0 – начальное, все роботы находятся в неподвижном состоянии; x_1 – сохранение конфигурации, реализуется согласованное управление движением роботов в группе; x_2 – перестроение, управление движением роботов для изменения топологии группы; x_3 – остановка, каждый робот заканчивает движение или останавливается и затем продолжает движение. Диаграмма состояний автомата-координатора представлена на Рис.9, б. Множество входных сигналов координатор: z_{a0} – wait, z_{a1} – movement, z_{a2} – transformation, z_{a3} – pause_p, z_{a4} – success_m, z_{a5} – success_p. Множество выходных команд: u_0 – pause, u_1 – movement, u_2 – transform.

Тактический уровень СУ движением группы роботов. Тактический уровень обеспечивает движение группы роботов в двух режимах: режиме

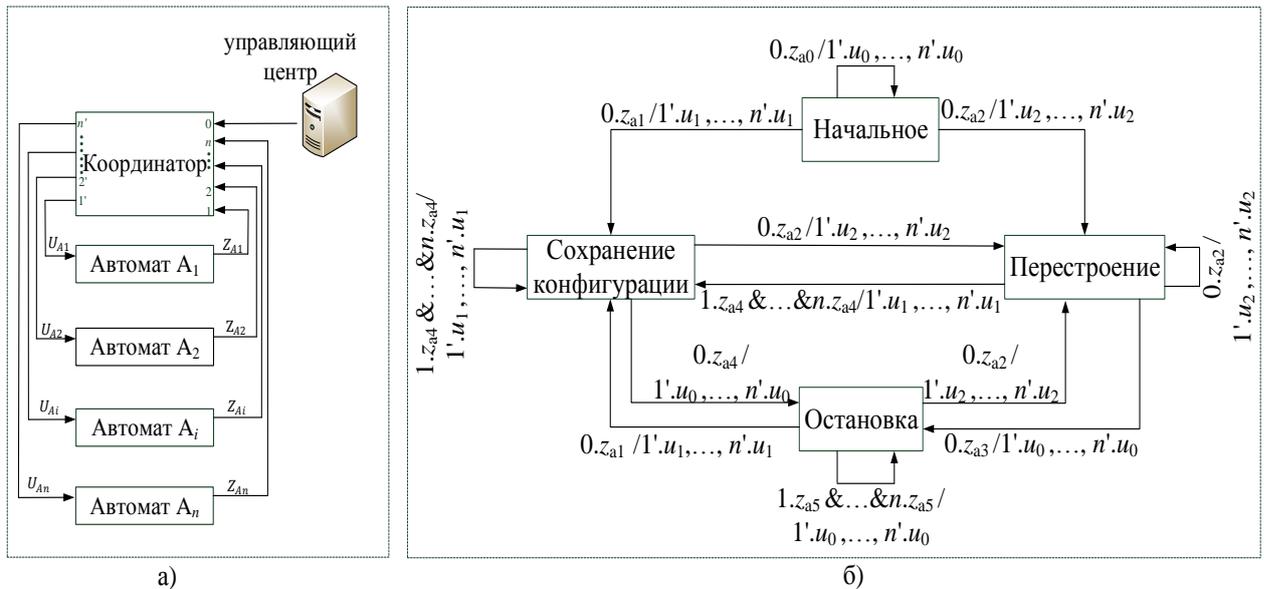


Рис.9. а) Логический уровень системы управления движением группы роботов; б) диаграмма координатора

движения с сохранением конфигурации и режиме перестроения. При изменении топологии группа роботов должна двигаться без столкновений из текущего в целевое положение, все роботы знают начальные и целевые положения остальных роботов и, следовательно, их планируемые траектории, а также стратегию избегания столкновения. Закон управления перестроением для каждого робота состоит в способе определения относительных расстояний и ориентаций, его можно записать в виде: $\begin{cases} v_i = k_{v_i} \cdot l_i \\ \omega_i = k_{\omega_i} \cdot (\alpha_i - \theta_i) \end{cases}$, где $l_i = \|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}'_i\|^2$, $\alpha_i = \arctg(r_i, r'_i)$, \mathbf{r}_i, θ_i - положение и ориентация робота в текущий момент времени, k_{v_i}, k_{ω_i} - параметры. С другой стороны, после перестроения группа роботов должна выполнять основной закон управления - двигаться с сохранением определенной конфигурации, например, клин, сетка, цепочка, и т. д. За основу закона управления взяты три правила из алгоритма децентрализованного управления, который предложен С. Л. Зенкевичем (2016 г.). С использованием этих правил (разделение, выравнивание и формация) управляющие сигналы рассчитываются по следующим выражениям:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_i = k_v \mathbf{V}_i + k_c \sum_{|r_{ij}| < d} \left\{ -\frac{r_{ij}}{|r_{ij}|} (d - |r_{ij}|) \right\} + k_\varepsilon \varepsilon_{P_i} \\ \omega_i = k_\omega \varepsilon_{\varphi_i} \end{cases},$$

где $\mathbf{v}_i = \begin{pmatrix} v_{xi} \\ v_{yi} \end{pmatrix}$; $k_v, k_c, k_\varepsilon, k_\omega$ - параметры; $\mathbf{V}_i = \begin{pmatrix} V_{xi} \\ V_{yi} \end{pmatrix}$ - скорость центра масс группы роботов в системе координат i -го робота; $\mathbf{r}_{ij} = \begin{pmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \end{pmatrix}$ - положение i -го робота относительно j -го робота; d - расстояние безопасности между роботами; ε_{P_i} - ошибка текущего положения i -го робота относительно заданного; ε_{φ_i} - ошибка текущей ориентации i -го робота относительно заданной.

Компьютерное моделирование управления движением группы роботов. Моделирование управления движением четырех роботов было проведено в среде

ROS. Для выполнения задачи моделирования разработана иерархическая структура программного обеспечения СУ. На Рис.10 показаны некоторые результаты моделирования управления перестроением и движением группы роботов с сохранением конфигурации.

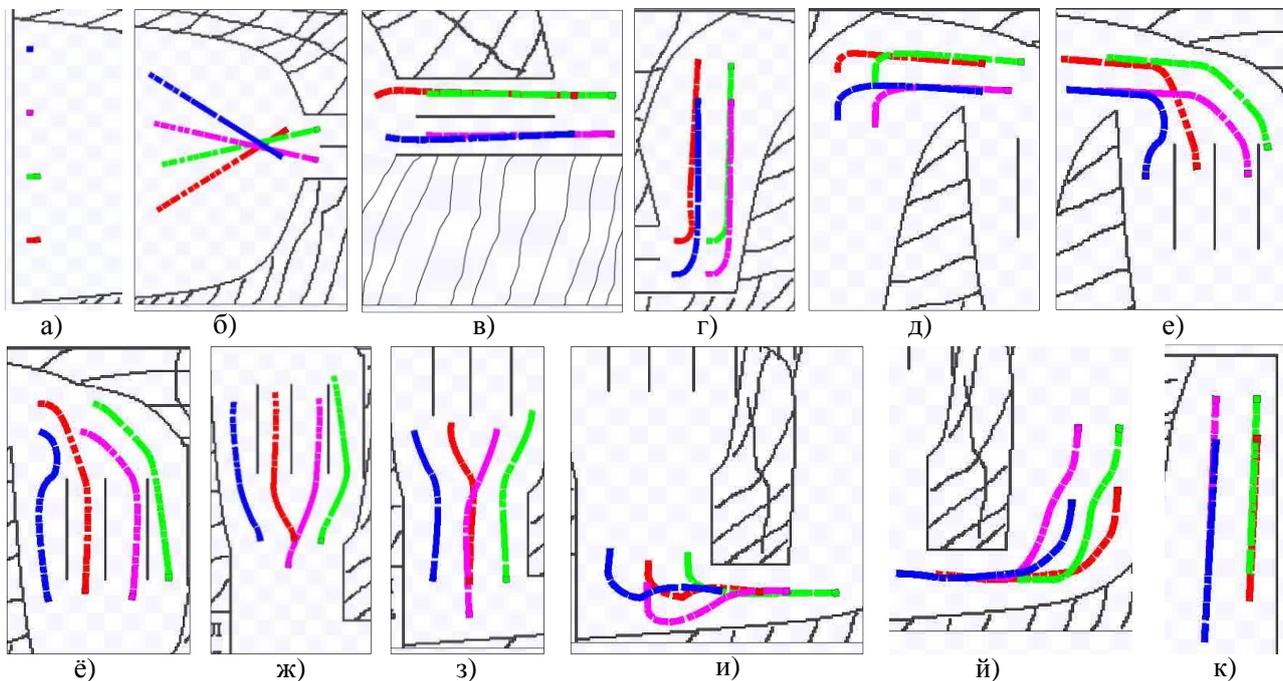


Рис.10. Результаты моделирования: а) начальная топология; в), г), д), ё), з) движение с сохранением конфигурации; б), е), ж), и), й) перестроение; к) окончательная конфигурация

Четвертая глава посвящена компьютерному моделированию построения программной траектории и экспериментальным натурным исследованиям с участием группы наземных роботов.

Программное моделирование планирования траектории проводилось в среде matlab и ROS с помощью симулятора Stage. Экспериментальная среда создана в лаборатории Научно-учебного центра «Робототехника» МГТУ им. Н. Э. Баумана. Камерой квадрокоптера на постоянной высоте непрерывно снимались наземные изображения и отправлялись на компьютер через роутер WIFI. Затем формировалась глобальная карта и получался набор характерных точек в среде matlab. Симулятор Stage использовался для загрузки модели окружающей среды (Рис.11, а), а интерфейс карты ROS использовался для загрузки глобальной карты. Результат без сопоставления глобальной и локальной карт показан на Рис.11, б, глобальная и локальная карты были сопоставлены на Рис.11, в. Результат планирования траектории представлен на Рис.11, г, из которого видно, что после задания оператором целевой точки была спланирована глобальная траектория (красная). При появлении препятствий на маршруте в процессе движения робота автоматически выполняется перепланировка траектории (зеленая) в масштабе реального времени.

Натурные эксперименты проводились с участием наземных роботов, внешний вид которых представлен на Рис.12, а, а их аппаратный состав – на Рис. 12, б. Ведущий робот в группе оснащен лазерным сканером.

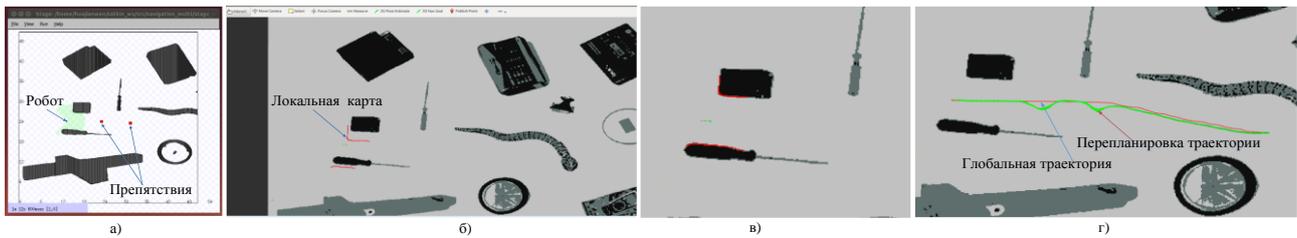


Рис.11. а) Модель окружающей среды, б) результат без сопоставления глобальной и локальной карт, в) результат с сопоставлением карт, г) результаты планирования траектории

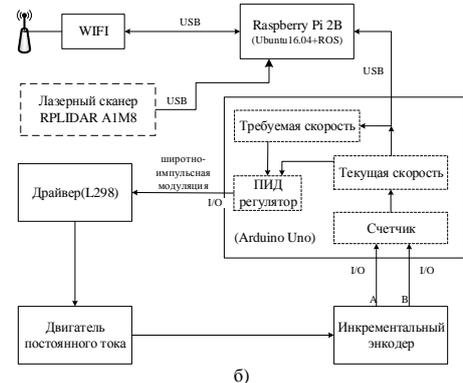
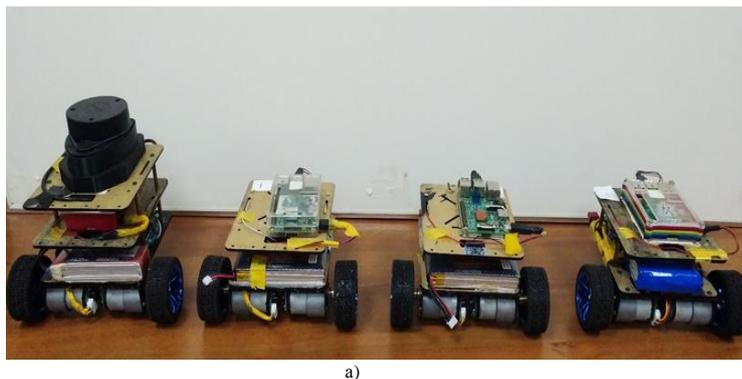


Рис.12. а) Внешний вид группы роботов; б) аппаратный состав робота

Для управления перестроением группы роботов без априорных знаний о внешней среде в контроллер Raspberry Pi 2B загружена операционная система Ubuntu 16.04, совместно со средой ROS. В среде ROS разработано программное обеспечение системы управления группой роботов, в котором каждый модуль является процессом, отвечающим за выполнение определенных функций, структура которого представлена на Рис.13. Например, процесс /tf_broadcaster_node служит для получения команды от процесса /logical_control_node и отправления целевого положения топологии группы в процессы /robot1_control, /robot2_control и /robot3_control; одновременно он получает состояние от нижнего уровня и посылает сообщение о выполнении в верхний уровень. Задачи построения карты с использованием данных от лазерного дальномера и планирования движения ведущего робота были выполнены удаленным компьютером (IP:192.168.1.118) из-за ограниченной вычислительной мощности бортового компьютера. Тогда удаленный компьютер остановится основным, и все роботы могут иметь доступ к данным основного компьютера.

Для проверки функционирования ведущего робота в автономном режиме оператором были заданы последовательности целевых точек A, B, C, D, E. Ведущий робот автономно проходил по заданным точкам, в процессе движения распознавая окружающую среду и планируя траекторию. Реальная траектория робота показана на Рис.14, а. Для проверки реализации процесса управления перестроением группы роботов «клином» задана начальная топология, в ходе эксперимента робот, оснащенный лазерным датчиком, всегда находился в ведущем положении. Результаты движения группы роботов показаны на Рис.14, б, а траектории движения группы при перестроении показаны на Рис.14, в.

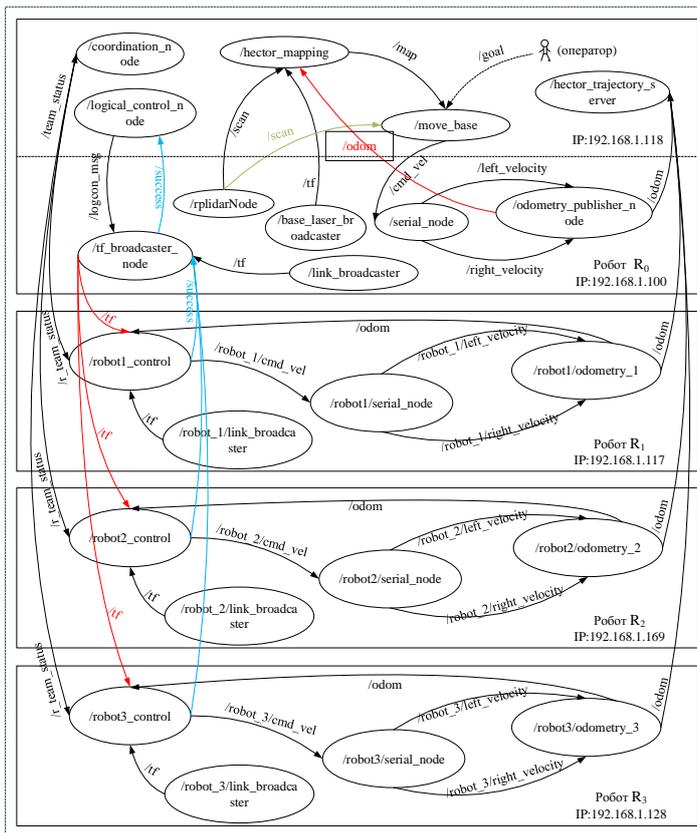
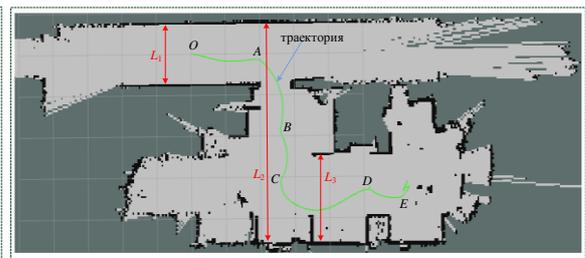


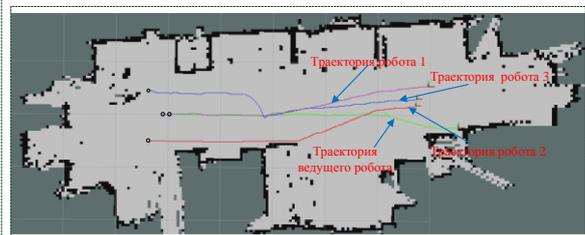
Рис.13. Структура программного обеспечения системы управления



а)



б)



в)

Рис.14. а) траектория движения ведущего робота в построенной карте; б) результат управления перестроением; в) траектории движения группы роботов

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработана методика процедуры формирования глобальной карты с использованием изображений от камеры дрона и сформирована модель сопоставления карт в системе координат робота, которые обеспечивают получение требуемых параметров матрицы перехода в процессе сопоставления глобальной и локальной карт.
2. Предложен алгоритм поиска кратчайшей траектории мобильного робота, который обеспечивает обход определенных узлов сеточной карты и уменьшает объем вычислений и время построения программной траектории.
3. Разработан метод управления движением ведущего робота вдоль спланированной траектории, обеспечивающий движение робота по произвольной программной траектории.
4. Разработан метод определения целевых положений отдельных роботов при перестроении группы, обеспечивающий наименьшую сумму прямолинейных перемещений роботов из текущих положений в целевые.
5. Разработан алгоритм локализации роботов с помощью комплексирования информации от датчиков колес, GPS и камеры, обеспечивающий высокую точность собственного положения.
6. Предложена эффективная стратегия предотвращения столкновений роботов

при изменении топологии группы и одновременной смене положений роботов.

7. Разработаны логический и тактический уровни системы управления группой роботов, обеспечивающие управление перестроением и движением группы с сохранением конфигурации.
8. Компьютерное моделирование в средах ROS и экспериментальные натурные исследования подтвердили работоспособность и эффективность предложенных методов и алгоритмов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Zenkevich S. L., Nazarova A. V., Ho Jianwen. Логическое управление движением группы мобильных роботов в среде с препятствиями // Автоматизация. Современные технологии. 2020. №10. С.470-475. (0.375п.л./0.13п.л.)
2. Zenkevich S. L., Nazarova A. V. and Huo Jianwen. Formation Control of Ground Multi-agent System Using Quadcopter with Camera // In: Kravets A. (eds) Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms. Studies in Systems, Decision and Control, Springer. 2020. Vol. 272. Pp.113-124. (0.75п.л./0.25п.л.)
3. Zenkevich S. L., Nazarova A. V. and Huo Jianwen. Dynamic Switching of Multi-agent Formation in Unknown Obstacle Environment // In: Gorodetskiy A., Tarasova I. (eds) Smart electromechanical systems. Studies in Systems, Decision and Control, Springer. 2020. Vol. 261. Pp.73-87. (0.94п.л./0.31п.л.)
4. Zenkevich S. L., Nazarova A. V., Ho Jianwen. Управление группой мобильных роботов с помощью сопровождающего дрона // Робототехника и техническая кибернетика. 2019. №3. С. 208-214. (0.45п.л./0.15п.л.)
5. Jianwen Huo, S. L. Zenkevich, A. V. Nazarova and Meixin Zhai. Path Planning Based on Map Matching in UAV/UGV collaboration system // International Journal of Intelligent Unmanned Systems. Publication date: 27 August 2019. DOI: 10.1108/IJUS-03-2019-0020. (0.94п.л./0.24п.л.)
6. Ho Jianwen. К вопросу о построении программной траектории робота по данным от сопровождающего дрона // Автоматизация. Современные технологии. 2019. № 5. С.235-240. (0.375п.л./0.375п.л.)
7. Zenkevich S. L., Чжу Хуа, Хо Цзяньвень. Экспериментальное исследование движения группы мобильных роботов в строю типа «конвой» // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. №5. С.331-315. (0.5п.л./0.17п.л.)
8. Zenkevich S. L., Чжу Хуа., Хо Цзяньвень. Движение группы мобильных роботов в строю типа «конвой» – теория, моделирование и эксперимент // Четвертый всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта, г. Казань, Республика Татарстан, Россия, 2017. С.136-147. (0.75п.л./0.25п.л.)
9. Хо Цзяньвень, Zenkevich S.L. Управление группой мобильных роботов в среде с различными препятствиями // III Международная научно-практическая конференция «Word Science», г. Карловы Вары - г. Москва, Чехия-Россия, 2018, С.143-152. (0.138п.л./0.07п.л.)