

На правах рукописи
УДК 681.5.01

Чжу Хуа

**УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ГРУППЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ
В СТРОЮ ТИПА «КОНВОЙ»**

Специальность 05.02.05

Роботы, мехатроника и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чжу Хуа.

Москва — 2018

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

Официальные оппоненты: **Ермолов Иван Леонидович,**
доктор технических наук, доцент, профессор РАН,
ведущий научный сотрудник, «Институт проблем
механики им. А. Ю. Ишлинского РАН»

Орлов Игорь Александрович,
кандидат физико-математических наук, научный
сотрудник, «Институт прикладной математики им.
М. В. Келдыша РАН»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский технологический университет»
(МИРЭА)

Защита состоится 5 июня 2018 г. 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 переулок, д. 10, ауд. 613м

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

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета

Автореферат разослан «___» ____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.т.н., доцент



И. В. Муратов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

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

При проектировании, анализе и реализации методов и алгоритмов управления группой мобильных роботов возникает ряд проблем. Во-первых, при проектировании алгоритмов управления необходимо учитывать ряд особенностей, присущих рассматриваемой задаче, в частности, каждый робот обладает только локальной информацией о группе и окружающей среде (в пределах действия собственных датчиков и коммуникации), тогда как необходимо достичь желаемого поведения группы в целом. Во-вторых, аналитический способ получения свойств поведения и характеристик движения группы мобильных роботов затруднительно. С одной стороны, система уравнений движения группы мобильных роботов часто является нелинейной, с другой стороны, взаимодействие между роботами изменяется с течением времени из-за изменения топология строя. И, наконец, реализация алгоритмов управления требует, чтобы каждый робот действовал согласованно с помощью беспроводной сети.

Существующие подходы к управлению группой мобильных роботов обладают следующими характеристиками:

1. Группа роботов (возможно, исключая лидера) является гомогенной, т. е. её члены обладают одинаковыми характеристиками.
2. Движение группы мобильных роботов осуществляется в открытом пространстве или в помещении, план которого заранее известен.
3. Топология группы роботов часто является неизмененной.

Но на практике это может быть не так: роботы могут двигаться в условиях отсутствия априорных знаний о внешней среде, и необходимо изменять топологию группы из-за изменяющейся внешней среды или поставленной задачи. Поэтому разработка системы управления группой мобильных роботов, в состав которой входит один лидер, имеющий богатую информационную систему, позволяющую ему автономно двигаться, и несколько ведомых роботов, оснащенных простыми датчиками, является актуальной научно-технической задачей.

В диссертации рассмотрены вопросы, связанные с разработкой системы управления движением группы мобильных роботов в строю типа «конвой». В состав системы управления входят модули управления движением роботов и их локализации, а также модули координации поведения роботов при изменении топологии группы. При разработке системы управления были использованы алгоритмы одновременной локализации и построения карты (SLAM) и

планирования траектории для ведущего робота (лидера конвоя).

Разработка системы управления группой мобильных роботов ведутся в различных организациях как Китая, и России, так и США, и Европы. Ключевыми в данном вопросе являются: Шэньянский институт автоматизации Китайской академии наук (Китай), МГТУ им. Н. Э. Баумана, факультет вычислительной математики и кибернетики МГУ им. М. В. Ломоносова, ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, Массачусетский технологический институт (MIT, США), Технологический институт Джорджии (Georgia Institute of Technology, США), Технологический институт Карлсруэ (KIT, Германия), Государственный институт исследований в информатике и автоматике (INRIA, Франция).

Цели и задачи

Целью диссертационной работы является разработка системы управления группой мобильных роботов в строю типа «конвой», обеспечивающей выполнение различных способов поведения группы, в том числе, основной способ, когда ведущий робот движется автономно, а ведомые роботы повторяют траекторию своего ведущего робота с некоторым временным запаздыванием T , а также способы, связанные с изменением топологии группы. Для достижения этой цели в работе были поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ и сравнение существующих методов управления движением группы роботов в строю типа «конвой», в том числе, методов управления группой роботов при изменении их топологии.
2. Анализ характеристик движения конвоя с использованием модели масса-пружина-демпфер.
3. Разработка алгоритма управления движением ведомого робота вдоль траектории своего ведущего робота.
4. Проведение качественного анализа движения группы роботов в строю типа «конвой».
5. Разработка метода локализации роботов с помощью измерений относительных положений роботов, учитывающих шумы измерений.
6. Разработка алгоритма сглаживания с фиксированной задержкой для повышения точности оценки при локализации роботов.
7. Разработка логического уровня системы управления группой роботов, обеспечивающего выполнение последовательности действий группы.
8. Проведение компьютерного моделирования движения группы роботов и экспериментальных исследований с участием группы реальных мобильных роботов.

Методы исследования

Для решения поставленных задач в работе использованы классические методы теории автоматического управления, расширенный фильтр Калмана, теория обыкновенных дифференциальных уравнений, методы сглаживания с фиксированной задержкой, методы теории конечных автоматов. Проверка работоспособности алгоритмов и оценки точности осуществлялась путем моделирования, а также проведением натурных экспериментов.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Разработан метод управления движением группы мобильных роботов, позволяющий обеспечить совпадение траектории ведущего и ведомого роботов, и в то же время избежать столкновений между роботами.
2. Разработан алгоритм сглаживания оценки фазового вектора системы управления движением строя.
3. Разработан способ планирования и координации поведения группы при изменении топологии конвоя с использованием теории конечных автоматов.

Практическая значимость

Представлен новый способ управления движением группы роботов (не только наземными мобильными роботами, но возможно, дронами и подводными роботами), позволяющий им двигаться строем типа «конвой». Этот тип строя может быть использован при решении роботами широкого круга задач в различных областях.

Положения, выносимые на защиту

1. Алгоритм управления движением ведомых мобильных роботов.
2. Метод решения задач локализации мобильных роботов конвоя.
3. Модифицированный алгоритм сглаживания с постоянным запаздыванием.
4. Способ планирования и координации поведения группы при изменении топологии конвоя.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и получили положительную оценку на следующих конференциях и научных семинарах:

1. Научной конференции для студентов, молодых ученых и аспирантов МГТУ им. Н. Э. Баумана, посвященной 100-летию Е. П. Попова (Москва, 2014).
2. Всероссийском научно-практическом семинаре «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (Казань, 2017).
3. Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» (Санкт-Петербург, 2017).

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 7 научных статьях, в том числе - 4 публикациях в изданиях из перечня ВАК РФ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 107 печатных страницы, 54 рисунков, 3 таблицы. Библиография содержит 63 наименований.

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 рассмотрены понятие групповой робототехники, требование к алгоритму управления группой роботов, а также применение групповой робототехники в автомобильной промышленности и транспортировке. Проведен обзор существующих методов управления движением группы мобильных роботов в строю типа «конвой» и сравнение этих методов. Описана иерархическая архитектура системы управления движением строя. Приведен обзор существующих решений для управления роботами при изменении топологии группы, анализ обзора показывает, что существующие исследования движения роботов группы при изменении топологии строя состоит из трёх аспектов: описания процесса движения, способа планирования, алгоритма избегания столкновения между роботами строя. Заканчивается глава конкретизацией задач исследования.

Вторая глава посвящена разработке способа управления роботом как элементом строя. Пусть мобильные роботы движутся в плоскости OXY строем типа «конвой» (Рис. 1). Роботы пронумерованы от R_0 – ведущего робота (лидер) до R_N – замыкающего конвой. Этот тип движения требует, чтобы каждый i -ый робот, $i = 1, \dots, N$, двигался по траектории, вдоль которой движется $(i - 1)$ -ый робот, с некоторым заданным временным запаздыванием T .

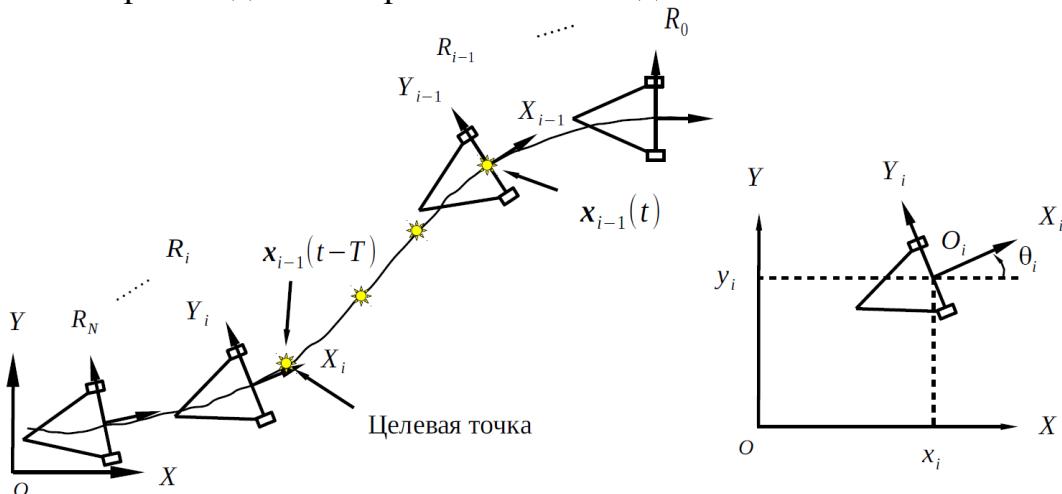


Рис. 1. Постановка задачи к главе 2

Ведущий робот R_0 либо управляет оператором, либо является полностью автономным. Когда ведущий робот автономен, он оснащен спутниковой системой навигации или сканирующим лазерным дальномером. Остальные роботы имеют систему одометрии и менее мощные лазерные сканеры. Кроме того, все роботы являются узлами беспроводной локальной сети, следовательно, могут обмениваться информацией друг с другом.

Для реализации такого типа движения были рассмотрены следующие подзадачи.

Во-первых, рассмотрим движение конвоя в виде модели масса-пружина-демпфер, при которых робот конвоя рассматривается как материальная точка. Были рассмотрены движения конвоя по прямой и в плоскости, особое внимание

уделено второму случаю. Пусть в плоскости три материальные точки P_0, P_1 и P_2 (Рис. 2, а), соединены пружинами и имеют координаты $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0)^T, \mathbf{r}_1 = (x_1, y_1)^T$ и $\mathbf{r}_2 = (x_2, y_2)^T$. Масса материальных точек равна m . На материальную точку P_0 действует внешняя сила $\mathbf{F} = (F_x, F_y)^T$. Силы взаимодействия пружин $\mathbf{T}_{01}, \mathbf{T}_{10}, \mathbf{T}_{12}, \mathbf{T}_{21}$. Длины пружин равны l при $\mathbf{T}_{01} = \mathbf{T}_{10} = \mathbf{T}_{12} = \mathbf{T}_{21} = 0$, k — коэффициент упругости пружин, c — коэффициент вязкости, устанавливающий соотношение между скоростью движения материальной точки и возникающей при этом силой сопротивления.

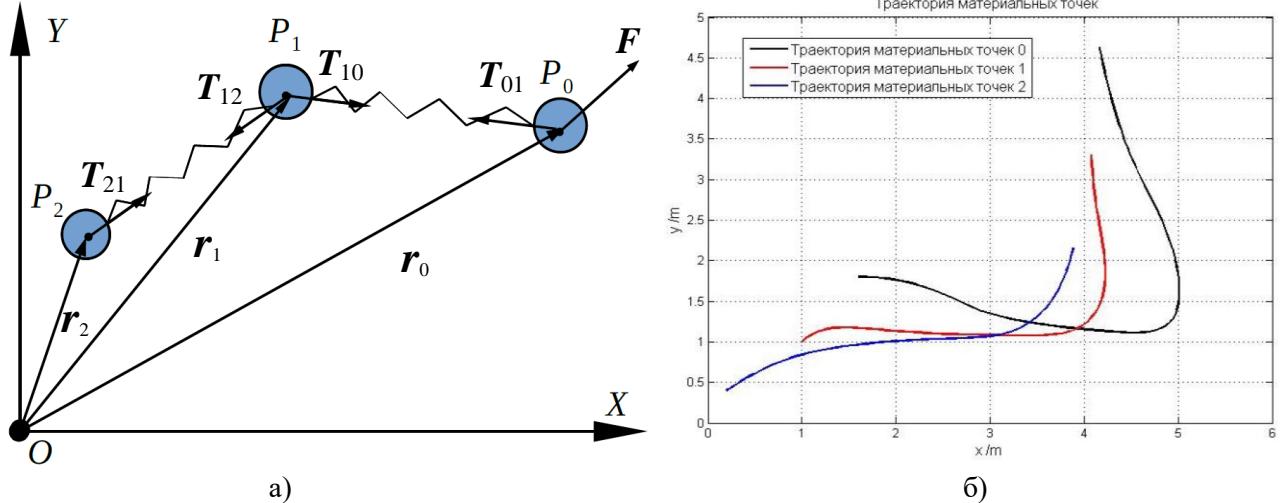


Рис. 2. а) Движение роботов конвоя в плоскости. б) Траектории роботов конвоя при избегании столкновений по модели масса-пружина-демпфер.

Обозначим $\mathbf{z} = (x_0, v_{0x}, y_0, v_{0y}, x_1, v_{1x}, y_1, v_{1y}, x_2, v_{2x}, y_2, v_{2y})^T, \mathbf{u} = (F_x, F_y)^T, d_{12} = \|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2\|, d_{01} = \|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_1\|, b = \frac{k(d_{01}-l)}{md_{01}}, p = \frac{c}{m}, q = \frac{k(d_{12}-l)}{md_{12}}$, тогда по закону Гука и второму закону Ньютона, окончательное уравнение движения трёх материальных точки имеет вид:

$$\dot{\mathbf{z}} = A(\mathbf{z})\mathbf{z} + B\mathbf{u} \quad (1)$$

где

$$A(z) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -b & -p & 0 & 0 & b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -b & -p & 0 & 0 & b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b & 0 & 0 & 0 & -b-q & -p & 0 & 0 & q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b & 0 & 0 & 0 & -b-q & -p & 0 & 0 & q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q & 0 & 0 & 0 & -q & -p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q & 0 & 0 & 0 & -q & -p \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1/m & 0 \\ 0 & 0 \\ 1/m & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Результаты численного моделирования (Рис. 2, б) показали, что при описании движения конвоя с использованием модели пружины в плоскости, траектории роботов в конвое не совпадают, что повышает риск столкновения роботов с препятствиями, и, следовательно, требуется разработка другого закона управления движением робота в конвое, например, в модели использовать

дополнительно пружин кручения. В связи с этим далее была использована не механическая, а аналитическая модель.

Во-вторых, разработан закон управления движением ведомых роботов конвоя, при котором кинематическая модель роботов конвоя имеет вид:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{\theta}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_i & 0 \\ \sin\theta_i & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_i \\ \omega_i \end{pmatrix} = J(\theta_i) \begin{pmatrix} v_i \\ \omega_i \end{pmatrix} \quad (2)$$

где x_i, y_i, θ_i — координаты и ориентация робота (Рис. 1), ω_i — угловая скорость робота, а v_i — линейная скорость начала связанной системы координат O_i .

Стратегия управления для каждого ведомого робота состоит в выполнении соотношений:

$$\begin{cases} x_i(t) = x_{i-1}(t - T) \\ s_{i,i-1} = \int_{t-T}^t \sqrt{\dot{x}_{i-1}^2(\tau) + \dot{y}_{i-1}^2(\tau)} d\tau \geq d_{min} \end{cases}$$

где $x_i(t)$ представляет собой положение робота R_i в текущий момент, $x_{i-1}(t - T)$ — положение робота R_{i-1} в момент времени $t - T$, $s_{i,i-1}$ — длина траектории робота R_{i-1} в интервале времени $[t - T, t]$, d_{min} — безопасное расстояние между двумя роботами.

Заметим, что такая стратегия предлагалась С. Л. Зенкевич в 1973-1976 гг. в работах, связанных с исследованием управления движением самолётов в строю типа конвой. Преимущество такого метода состоит в том, что, во-первых, расстояние между роботами является переменным, т.е. чем больше скорость движения конвоя, тем больше расстояние между роботами, при этом параметр управления T остается постоянным; во-вторых, при проходе через “узкую” область ведомый робот успешно обходит препятствия, которые уже обходил его ведущий робот.

Для реализации стратегии необходимо:

1. Запоминание фрагмента траектории своего ведущего робота

В процессе движения каждый ведомый робот R_i имеет в качестве программной траектории сдвинутую по времени траекторию своего ведущего робота R_{i-1} , динамически меняющуюся по времени. Характер этой траектории, учитывающий дискретность измерений, представлен на Рис. 3, где N — число точек, T/N — скважность измерений.

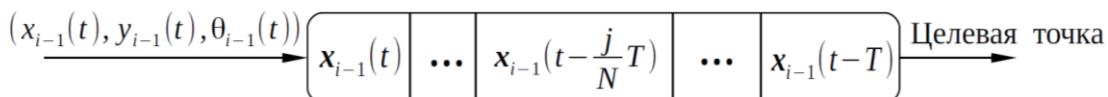


Рис. 3. Процесс формирования целевых точек для робота R_i

2. Формирование закона управления движением робота вдоль программной траектории

Закон управления состоит в способе движения робота вдоль динамически меняющейся траектории, заданной набором точек (Рис. 3), и представляющей собой очередь.

Следующая задача исследований — управление движением робота вдоль

заданной программной траектории. Будем считать, что время обновления данных T/N мало по сравнению с инерционными свойствами робота. Это означает, что на вход системы управления поступает непрерывная последовательность в виде программной траектории ($x^*(t), y^*(t), \theta^*(t)$), заданная на отрезке $[t, t + T]$. Тогда из уравнения (2) следует соотношение:

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = J^+(\theta) \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{x}\cos\theta + \dot{y}\sin\theta \\ \dot{\theta} \end{pmatrix}$$

где $J^+(\theta)$ — псевдообратная матрица, $J^+(\theta) = (J^T J)^{-1} J^T$, а линейная скорость равна проекции вектора (\dot{x}, \dot{y}) на направление движения робота. Принимая:

$$\dot{x} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} (x^* - x), \dot{y} = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} (y^* - y), \dot{\theta} = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} (\theta^* - \theta)$$

окончательно имеем закон управления в виде:

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1(x^* - x)\cos\theta + k_1(y^* - y)\sin\theta \\ k_2(\theta^* - \theta) \end{pmatrix} \quad (3)$$

где k_1, k_2 — параметры. На Рис. 4 представлена схема, иллюстрирующая формирование управляемых сигналов, обеспечивающих движение робота вдоль произвольной траектории.

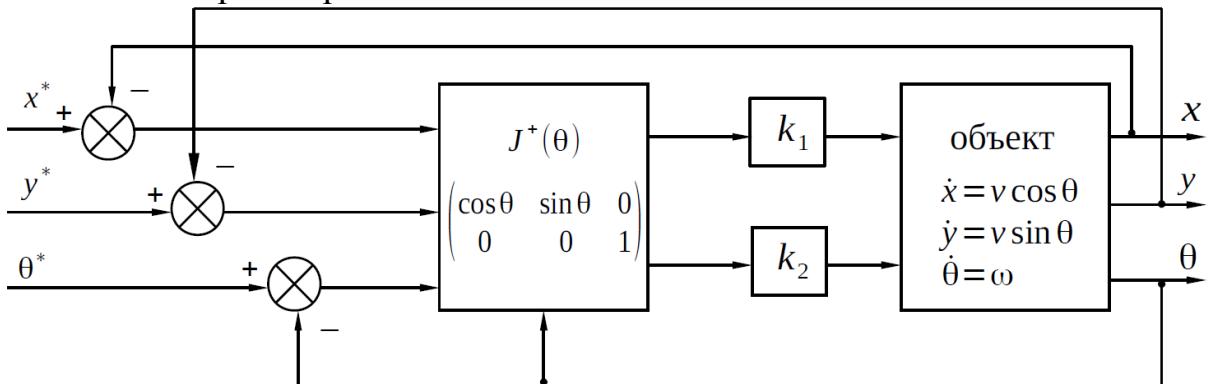


Рис. 4. Структурная схема управления роботом

Во-третьих, в работе проведен качественный анализ процесса управления движением роботов конвоя во времени, который определяется решением дифференциального уравнения динамики замкнутой системы, заданного структурной схемой управления роботом (Рис. 4.).

В первую очередь, это устойчивость. Исследование устойчивости движения строя имеет свои особенности, а именно, исследуемым объектом является управляемое движение строя, т.е., закон управления роботами строя + динамики роботов строя. Далее, при изменении топологии строя управляемое движение описано не только системой обыкновенных дифференциальных уравнений, но и с использованием другого математического аппарата — конечных автоматов. И наконец, управляемое движение строя с постоянной топологией описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений высокого порядка, как например, в гравитационной задаче с N телами. В диссертационной работе рассматривается устойчивость управляемого движения конвоя с постоянной топологией, а также предполагается, что движение роботов конвоя происходит в

одномерном пространстве — по прямой (т.е. $\omega_i = 0, \theta_i = 0$ в уравнении (2)). В этом случае, уравнение управляемого движения i -ого робота имеет вид:

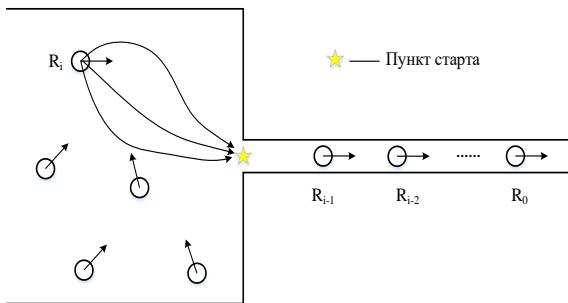
$$\begin{cases} \dot{x}_0(t) = v_0(t) \\ \dot{x}_i(t) = -k(x_i(t) - x_{i-1}(t - T)), i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (4)$$

Входящий в уравнение движения i -ого робота член $k * x_{i-1}(t - T)$ является для него известной функцией времени, то есть, для i -ого робота на отрезке $[t, t + T]$ имеем:

$$\dot{x}_i = -kx_i + f(t) \quad (5)$$

и, следовательно, этот член не влияет на устойчивость системы. Устойчивость же всех решений однородной системы (5) очевидна. Таким образом, если считать, что необходимым условием устойчивости строя является устойчивость движения каждого из его членов, то можно утверждать, что движение строя при принятых допущениях устойчиво. Но $f(t)$ влияет на другие качества управления, например, на точность и быстродействие.

Рассмотрим задачу формирования конвоя (Рис. 5.): в момент времени от начала старта t_0 до $t_0 + i * T$, не важно, где находился робот R_i и по какой траектории робот двигался к пункту «Старт», важно где находится робот R_i при $t = t_0 + i * T$, т.е., его координаты $x_i(t_0 + i * T)$, кроме того, до момента времени



$t_0 + i * T$ робот R_i должен сохранять фрагмент траектории своего ведущего робота R_{i-1} от момента $t_0 + (i - 1) * T$ до момента $t_0 + i * T$. Пусть $t_0 = 0$, тогда начальные условия уравнений (4) определяются $x_0(0) = 0, x_1(T) = x_{01}, \dots, x_i(iT) = x_{0i}, \dots, x_N(NT) = x_{0N}$.

Рис. 5. Формирование конвоя

Анализ качества процесса управления проведен для двух случаев.

При постоянной скорости лидера конвоя, т.е. $v_0(t) = v_0$. Аналитическое решение уравнений (4) имеет вид:

$$x_i(t) = P_{i-1}(t)e^{-kt} + v_0 t + B_i \quad t \geq iT \quad i = 1, \dots, N \quad (6)$$

где P_{i-1} представляет собой многочлен $u_{i,0} + u_{i,1}t + \dots + u_{i,q}t^q + \dots + u_{i,i-1}t^{i-1}$, коэффициенты которого удовлетворяют условиям:

$$\begin{cases} u_{i,0} = c_i & i \geq 1 \\ u_{i,q} = \frac{1}{q} k e^{kT} \sum_{j=q-1}^{i-2} u_{i-1,j} (-T)^j C_j^{j-q+1}, & i \geq 2 \text{ и } q = 1, \dots, i-1 \end{cases}$$

где c_i — коэффициент, значение которого зависит от начальных условий, т.е., $c_i = f(x_{01}, \dots, x_{0i})$, C_j^{j-q+1} — биномиальные коэффициенты, коэффициенты $B_i = B_{i-1} - \alpha$, $\alpha = v_0 T + \frac{v_0}{k}$, $B_1 = -\alpha$.

Решение (6) имеет асимптоту $x_i^{\text{асим}}(t) = v_0 t + B_i = v_0(t - iT) - \frac{iv_0}{k}$, а

программное движение роботов конвоя $x_i^{\text{жел}}(t) = v_0 * (t - i * T)$, т.е. существуют установившиеся погрешности $e_i^{\text{устан}} = |x_i^{\text{жел}}(t) - x_i^{\text{асим}}(t)| = \frac{iv_0}{k} = i * e$, значения которых зависят от расположения роботов в строю, т.е., погрешности накапливаются.

Для устранения установившихся погрешностей в закон управления ведомым роботом добавим скорость его ведущего робота, т.е. ПД-регулятор, тогда управляемое движение i -ого робота конвоя по прямой имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_0(t) = v_0(t) \\ \dot{x}_i(t) = -k(x_i(t) - x_{i-1}(t - T)) + \dot{x}_{i-1}(t - T), i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (7)$$

Аналитическое решение уравнения (7) имеет вид:

$$x_i^{\text{ПД}}(t) = c_i^{\text{ПД}} e^{-kt} + v_0 * (t - iT) \quad t \geq iT \quad i = 1, \dots, N$$

где значение коэффициента $c_i^{\text{ПД}}$ зависит только от начальных условий x_{0i} .

При периодически меняющейся скорости лидера конвоя, т.е., $v_0(t) = v_0(1 + a * \sin \omega t)$, $0 \leq |a| \leq 1$, аналитическое решение уравнений (4) имеет вид:

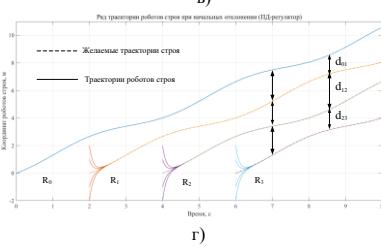
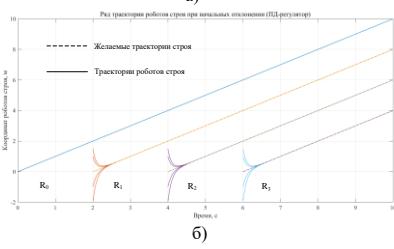
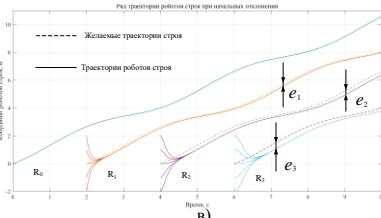
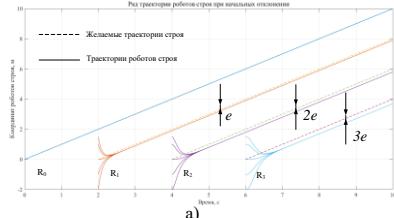
$$x_i(t) = P_{i-1}(t)e^{-kt} + v_0 t + B_i + C_i \cos \omega t + D_i \sin \omega t + \frac{av_0}{\omega} \quad t \geq iT \quad i = 1, \dots, N$$

где $P_{i-1}(t)$ и B_i такие же как в (6), коэффициенты C_i и D_i удовлетворяют рекуррентным соотношениям:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} C_i \\ D_i \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \beta & -\gamma \\ \gamma & \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{i-1} \\ D_{i-1} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} C_0 \\ D_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{av_0}{\omega} \\ 0 \end{pmatrix} \\ \beta &= \frac{-\omega k \sin \omega T + k^2 \cos \omega T}{\omega^2 + k^2} \quad \gamma = \frac{k^2 \sin \omega T + \omega k \cos \omega T}{\omega^2 + k^2} \end{aligned}$$

а решение уравнения (7) имеет вид:

$$x_i^{\text{ПД}}(t) = c_i^{\text{ПД}} e^{-kt} + v_0 (t - iT) - \frac{av_0}{\omega} \cos \omega(t - iT) + \frac{av_0}{\omega}$$



Графики (Рис.6) траекторий движения роботов конвоя, состоящего из четырёх членов, подтверждают наш анализ.

Рис. 6. Траектории роботов конвоя при начальном отклонении. а) и б) при $v_0(t) = v_0$ в) и г) при $v_0(t) = v_0(1 + a * \sin \omega t)$

В-четвертых, в процессе решения задачи управления движением каждого робота строя, возникает проблема определения собственного положения робота R_{i-1} относительно R_i . В лабораторных условиях эта проблема может быть решена путем установки систем зрения, определяющих декартовы координаты всех членов конвоя, что является невозможным при движении роботов в открытом пространстве. Предложенный в диссертации способ локализации роботов состоит в том, что каждый робот определяет собственное положение,

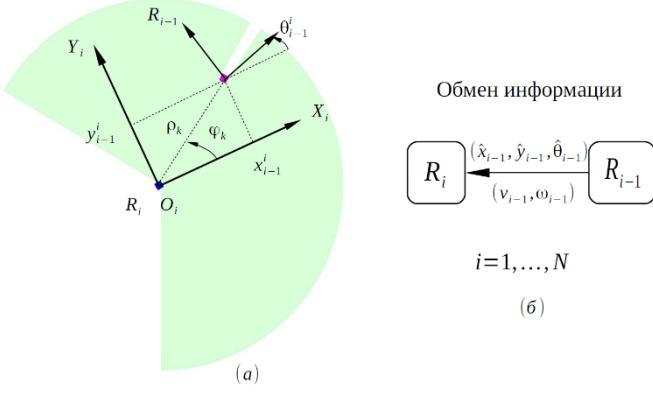


Рис. 7. а) Локальная окрестность робота R_i б) Обмен информацией между роботами

В работе используется расширенный фильтр Калмана для обработки измерений, проводимых лазерным сканером. На Рис. 8 показана зависимость погрешности локализации ведомых роботов в строю типа «конвой». Из результатов моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Из-за неизбежных неточностей измерений, полученных от лазерного сканера, погрешности накапливаются, что естественно.
2. Погрешности локализации ведомых роботов с 5 по 10 увеличиваются с течением времени, тогда как погрешности локализации роботов с 1 по 4 остаются почти постоянными.
3. С точки зрения локализации с использованием расширенного фильтра Калмана, можно сказать, что наилучшим количеством роботов в строю типа «конвой» является 5, т.е., один ведущий и четыре ведомых робота.

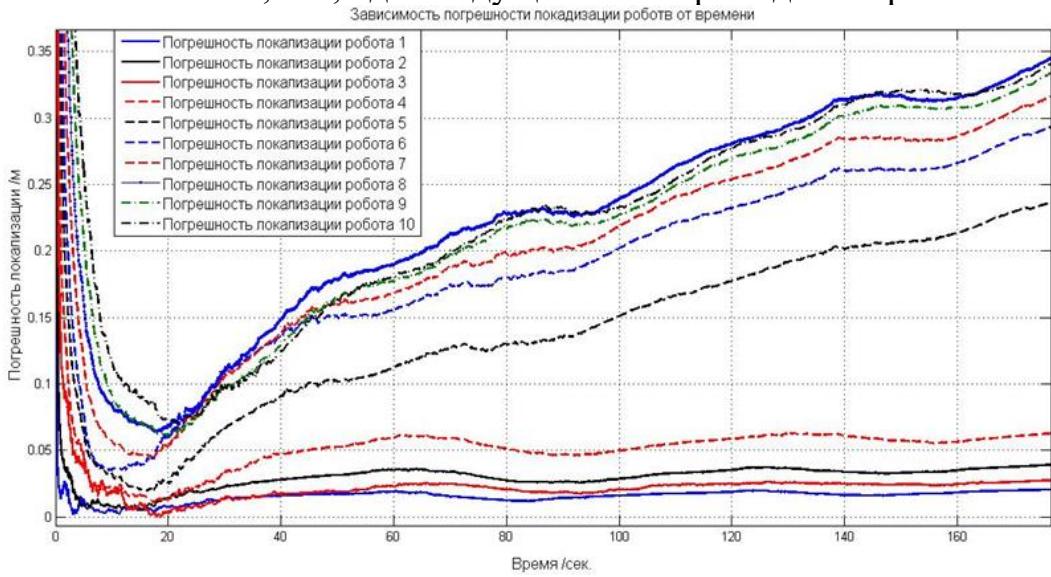


Рис. 8. Погрешности локализации ведомых роботов

В-пятых, для повышения точности оценки при локализации роботов использовались дополнительные измерения, полученные в интервале $[t - T, t]$, для получения оценки состояния $\hat{x}(t - T)$, то есть методы решения задачи сглаживания. Пусть поведение системы и измерения их состояний описываются:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \boldsymbol{\eta}(t) \quad (8), \quad \mathbf{z}(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{x}(t) + \boldsymbol{\xi}(t)$$

используя взаимное положение роботов. Для реализации такого способа требуется выполнение трёх условий (Рис. 7): знание глобального положения ведущего робота, знание положения ведущего робота относительно ведомого, и возможность передавать информацию о положении ведомому роботу.

где $\mathbf{A}(t)$ — матрица системы, $\mathbf{H}(t)$ — матрица наблюдений, $\boldsymbol{\eta}(t)$ и $\boldsymbol{\xi}(t)$ — гауссовые белые шумы. Тогда оценки сглаживания имеет вид:

$$\hat{\mathbf{x}}(\tau|t) = \Phi(\tau, t)\hat{\mathbf{x}}(t) \quad \tau = t - T$$

где $\hat{\mathbf{x}}(t)$ — оценка, полученная в результате применения метода теории рекуррентной фильтрации Калмана, $\Phi(\tau, t)$ — фундаментальная матрица системы (8), поиск которой представляет некоторую проблему, особенно для нестационарных систем. В работе предложен способ, позволяющий избежать построение фундаментальной матрицы. Метод состоит в использовании свойств этой матрицы:

$$\frac{\partial \Phi(t_1, t_2)}{\partial t_1} = \mathbf{A}(t_1)\Phi(t_1, t_2) \quad \frac{\partial \Phi(t_1, t_2)}{\partial t_2} = -\Phi(t_1, t_2)\mathbf{A}(t_2)$$

здесь t_1, t_2 — моменты времени.

Полученные оценки сглаживания с постоянным запаздыванием имеют вид:

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(\tau|t) = \mathbf{A}(\tau)\hat{\mathbf{x}}(\tau|t) + \mathbf{K}_3(t)(\mathbf{z}(t) - \mathbf{H}(t)\hat{\mathbf{x}}(t)) \quad (9)$$

где коэффициенты сглаживания $\mathbf{K}_3(t) = \mathbf{L}(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{R}^{-1}$, $\mathbf{L}(t) = \Phi(t, t)\mathbf{P}(t)$, а матрица $\mathbf{L}(t)$ удовлетворяет соотношению:

$$\dot{\mathbf{L}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{L}(t) + \mathbf{L}(t)\mathbf{A}^T(t) - \mathbf{L}(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}(t)\mathbf{P}(t) + \mathbf{L}(t)\mathbf{P}^{-1}(t)\mathbf{Q}.$$

На Рис. 9 показана структурная схема вычисления оценки сглаживания. Как видно, по поступающим зашумленным измерениям параллельно проводятся процессы фильтрации и сглаживания, в том числе, вычисление оценки сглаживания, зависящей от значений, полученных в процессе фильтрации. Результаты моделирования показывают, что погрешности оценки сглаживания меньше чем, погрешности оценки фильтрации.

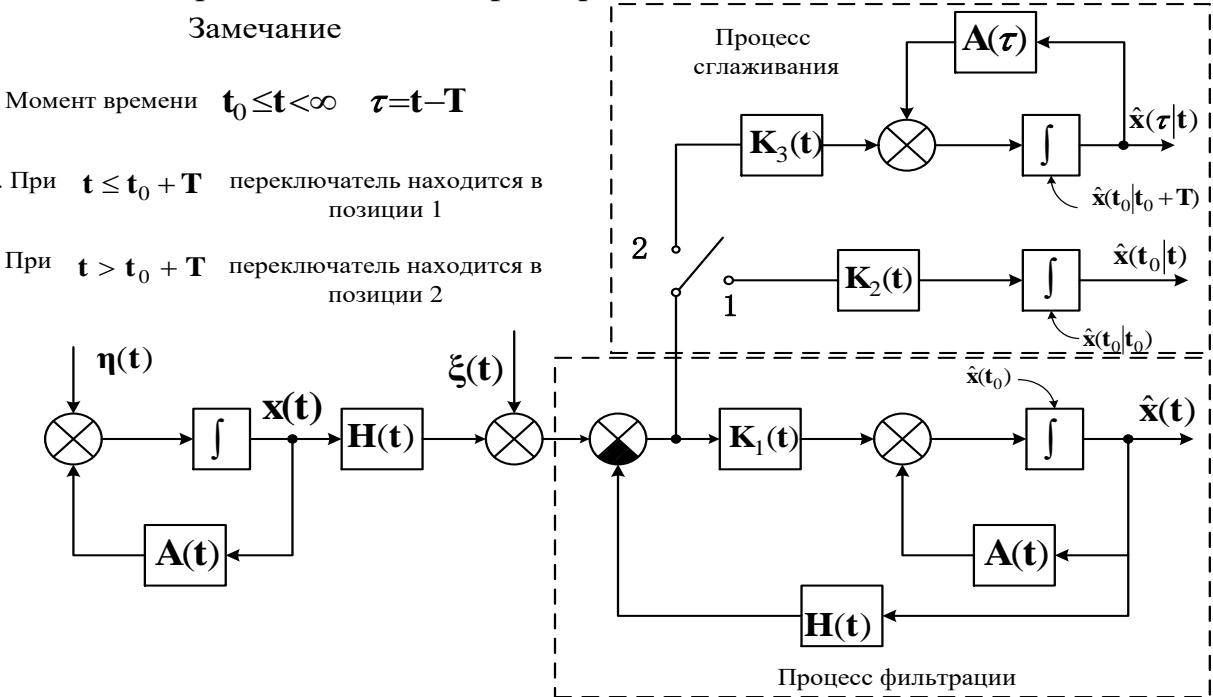


Рис. 9. Структурная схема вычисления оценки сглаживания с постоянным запаздыванием для линейной непрерывной системой

Третья глава посвящена решению задач логического управления строем как группой роботов. Во второй главе решен ряд задач управления движением

рбота конвоя с постоянной топологией. Однако непосредственное использование разработанного подхода может оказаться неработоспособным из-за специфики, поставленной перед строем задачей. Возможные задачи такого типа имеют вид:

1. Перевозка грузов из пункта А в пункт В, в процессе движения в пункте С выходит из строя робот R_i , а в пункте D входит в строй робот R_j (Рис. 10, а).
2. Перевозка грузов из пунктов А и В в пункт С с использованием двух групп мобильных роботов, движущихся в строю типа «конвой». В пункте D обе группы объединяются в одну (Рис. 10, б).
3. Перевозка грузов из пункта А в пункты назначения В и С, при этом в пункте D конвой разделяется на две группы (Рис. 10, в).

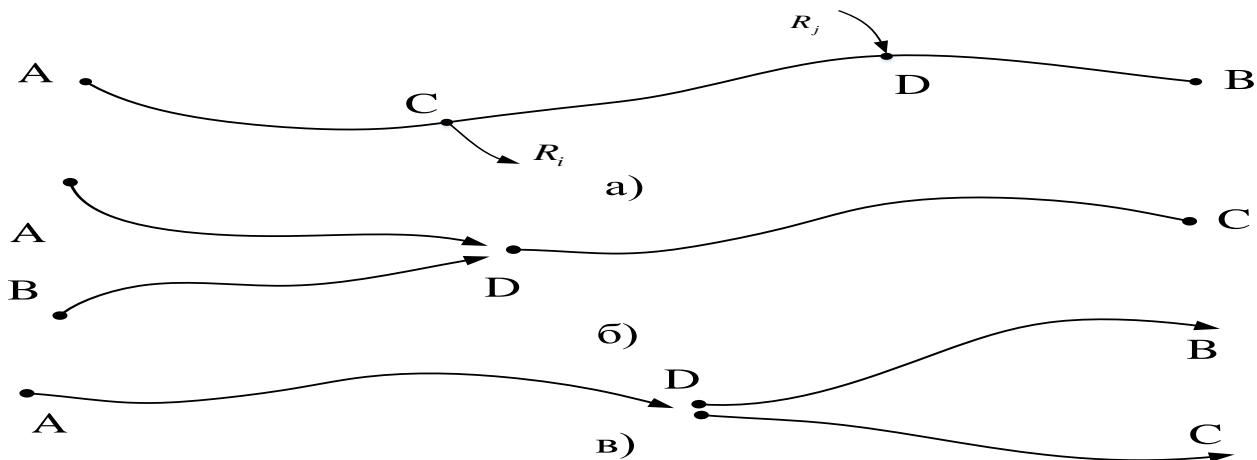


Рис. 10. Поставленные задачи к третьей главе

Поставленные выше задачи требуют выполнения следующих действий (Рис. 11):

1. *Формирование конвоя* (Рис. 11, а). Такое действие состоит в перегруппировке нескольких «неорганизованных» роботов от стайного движения к движению в строю типа «конвой».
2. *Движение конвоя* (Рис. 11, б). Суть такого движения заключается в том, что ведущий робот движется автономно, а остальные роботы должны следить за положением своего ведущего робота. Более того, группа может совершить останов и перезапуск конвоя из-за динамически изменяющей внешней среды; группа должна продолжать свое движение при неисправности одного или некоторых ведомых роботов (кроме ведущего робота).
3. *Вход робота в конвой* (Рис. 11, в). Цель этого действия состоит в том, что при движении конвоя, необходимо обеспечить «пробел» в траектории для входа дополнительного робота между роботами конвоя или назначить новый робот финальным в конвое.
4. *Выход робота из конвоя* (Рис. 11, г). В отличие от предыдущего действия, необходимо заполнить «вакансию» после выхода из конвоя.
5. *Разделение конвоя* (Рис. 11, д). Номера роботов в новых конвоях либо определены заранее, либо выбираются по какому-либо критерию.
6. *Объединение конвоев* (Рис. 11, е). В этом случае, один из двух ведущих

роботов конвоев назначается лидером.

7. *Расформирование конвоя* (Рис. 11, а). После выполнения задания роботы могут двигаться произвольным образом или остановиться.

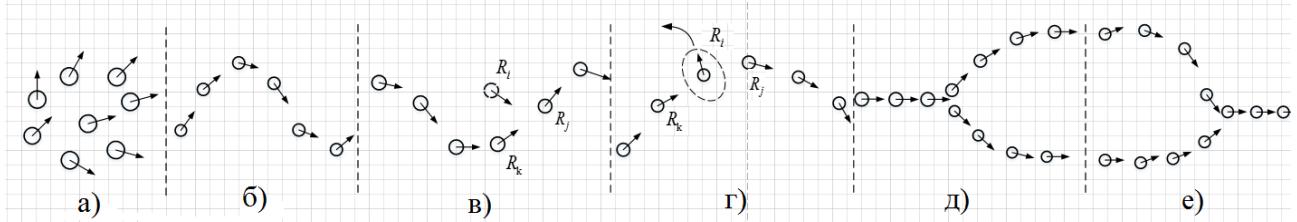


Рис. 11. Поведение группы мобильных роботов

Автором разработан метод управления, использующий аппарат теории конечных автоматов. В работе используется функциональный конечный автомат, в описание которого входит дополнительно функция, исполняемая в каждом состоянии. Функциональным конечным автоматом $A = [U, X, Z, Exec(), f, h]$ будем называть набор из шести объектов: $U = \{u_1, \dots, u_r\}$ —множество входных сигналов; $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ — конечное множество состояний; $Z = \{z_1, \dots, z_m\}$ — множество выходных сигналов; $Exec() = \{exec1(), \dots, execi(), \dots execp()\}$ — множество выполняемых действий, соответствующих состоянию автомата; f — функции одношагового перехода в следующее состояние $x(t+1) = f(t, x(t), u(t))$; h — функции выхода $z(t+1) = h(x(t), u(t))$ (автомат Мили, выходные сигналы которого зависят от состояния автомата и входных сигналов) или $z(t+1) = h(x(t+1))$ (автомат Мура, выходной сигнал в котором зависит лишь от текущего состояния данного автомата). Заметим, что в нашем случае используются асинхронные автоматы, то есть параметр t характеризует не время, а признак появления на входе автомата сигнала из множества U .

На Рис. 12 показана структурная схема логического управления роботами.

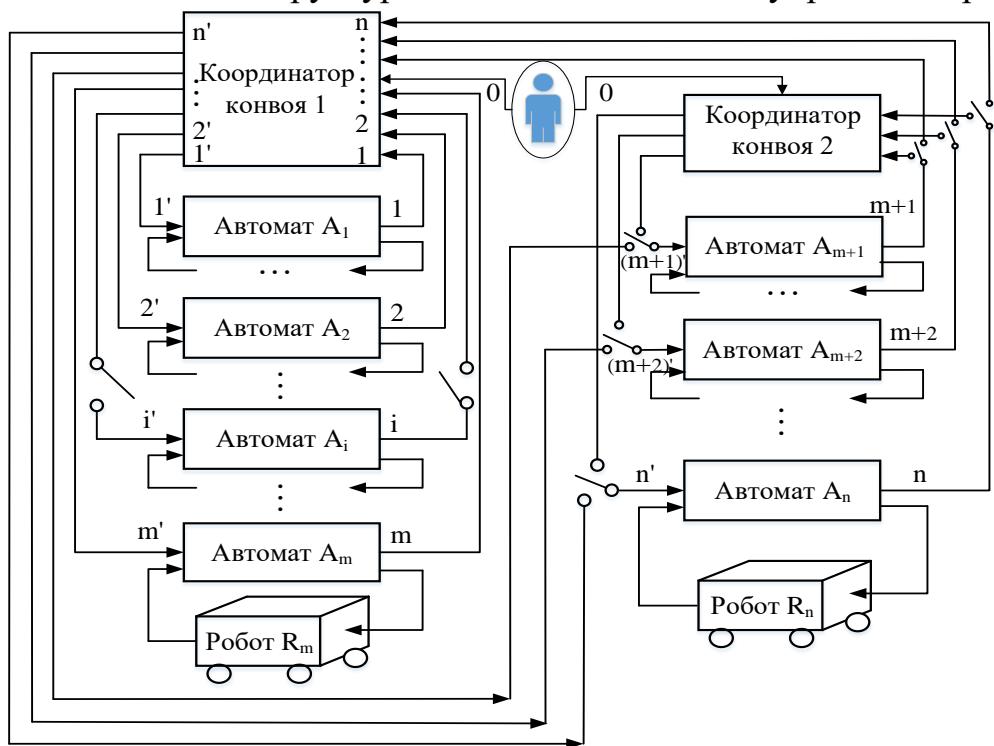


Рис. 12. Структурная схема логического управления роботами конвоя

Координатор конвоя выполняет функцию управления поведением отдельного робота строя по командам оператора, а также координацию их действий в зависимости от результата выполнения маневра соответствующим роботом. Координатор конвоя описывается многовходовым конечным автоматом (автомат Мили, Рис. 13, а), входом которого является значение логического выражения, а выходами являются логические команды соответствующим роботам.

Автомат A_i используется для описания логической модели отдельного робота, представляющей собой автомат Мура (Рис. 13б). Таким образом, система управления отдельным роботом становится двухуровневой: нижний уровень обеспечивает непосредственное управление исполнительным механизмом в силу выбранного закона управления, а верхний (логический) выбирает один из этих законов в зависимости от команды группового координатора.

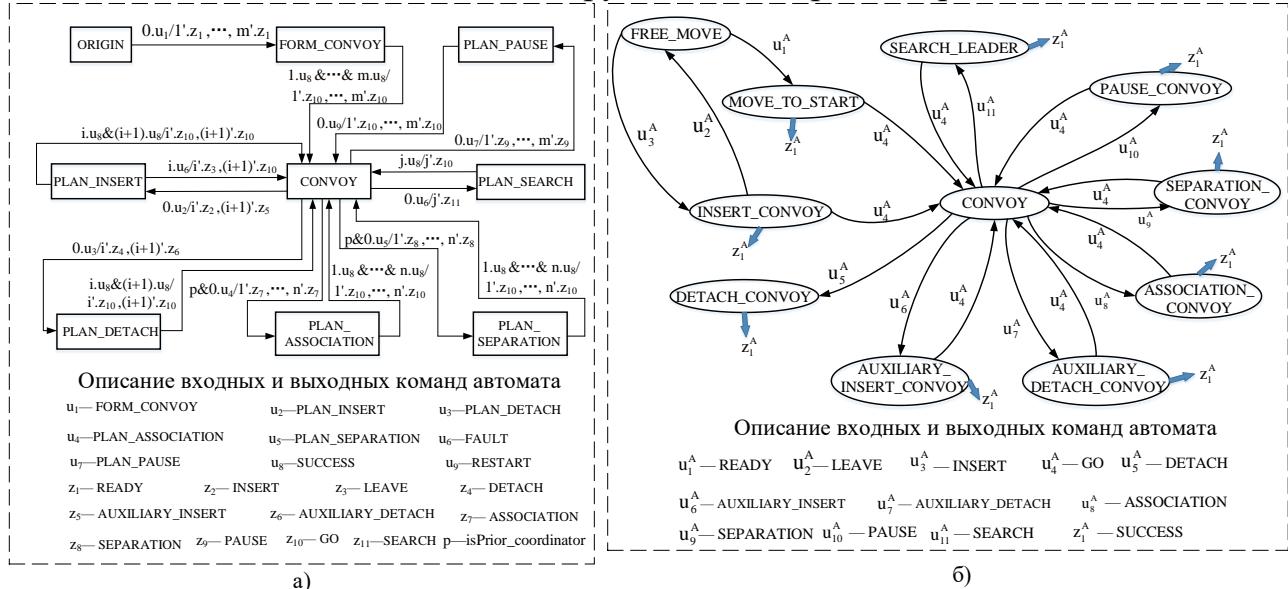


Рис. 13. а) Координатор конвоя как управляющий автомат б) Логическая модель отдельного робота R_i

Моделирование поведения строя при смене структуры выполнялось в среде `stage_ros`, при этом была сформирована иерархическая структура программного обеспечения системы управления, в состав которой входят четыре уровня: верхний уровень — интерфейс оператора конвоя (интеллектуальный уровень); стратегический уровень, задача которого состоит в том, чтобы по команде верхнего уровня определить подзадачи для каждого робота (координатор конвоя); тактический уровень, выходами которого являются сигналы управления движением роботов; нижний уровень — модель внешней среды и роботов (исполнительный уровень). Полученные результаты компьютерного моделирования продемонстрировали работоспособность предложенного подхода.

Четвертая глава посвящена компьютерному моделированию и экспериментальным натурным исследованиям с участием группы мобильных роботов.

Программное моделирование проводилось в среде ROS с помощью

симулятора Stage/Gazebo (в Stage учитываются только кинематические ограничения роботов, в Gazebo учитываются динамические характеристики роботов). Ведущий робот R_0 совершает движение с постоянной линейной скоростью $v_i = 1 \text{ m/s}$ и угловой скоростью $\omega_i = 0.1 \text{ rad/s}$ при $t < 62.8\text{s}$, $\omega_i = -0.1 \text{ rad/s}$ при $t > 62.8\text{s}$, т. е. движется по траектории типа «восьмерка». Скорости остальных роботов вычисляются в соответствии с (3), где $k_v = 1, k_\omega = 1, T = 2\text{s}$. Как видно из результатов моделирования, траектории роботов (Рис. 14.) в группе почти совпадают, причем движение последнего робота не имеет колебаний.

Натурный эксперимент проводился с участием мобильных роботов, внешний вид которых представлен на Рис. 15, а, а их аппаратный состав — на Рис. 15, б. Лидер конвоя оснащен лазерным сканером. Для реализации системы в масштабе реального времени, роботы оснащены операционной системой Ubuntu 14.04, совместно с ROS

В среде ROS построена распределённая система управления роботами (Рис. 15, в), в которой каждый модуль является процессом, отвечающим за выполнение определенных функций. Например, процесс /robot_1/follower используется для управления роботом R_1 , процесс /robot_1/odometry используется для определения координат робота R_1 в пространстве.

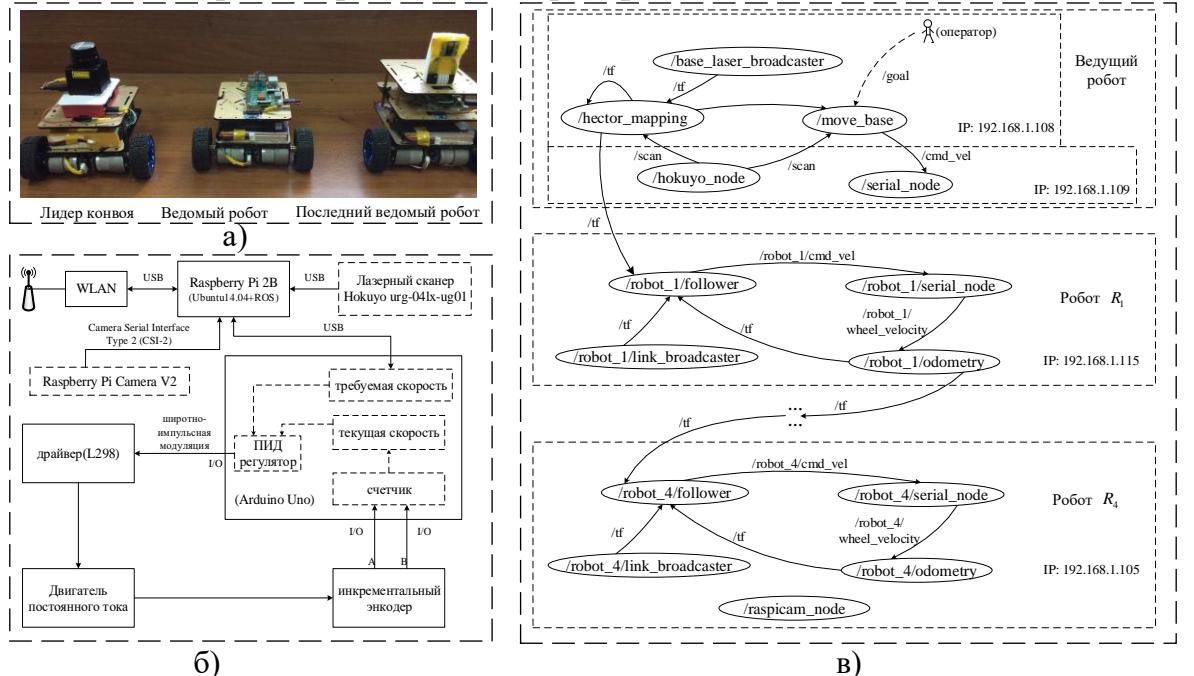


Рис. 15. а) Внешний вид роботов. б) Аппаратный состав роботов.
в) Распределённая система управления роботами

Было проведено два эксперимента:

а) Проверка функционирования в автономном режиме ведущего робота

Ведущий робот автономно проходил по заданной оператором последовательности целевых точек А, В, С, Д, в процессе движения распознавая

окружающую среду и планируя траекторию. Реальная траектория робота показана на Рис. 16, а.

б) Проверка работоспособности закона управления движением группы роботов в строю типа «конвой»

При движении роботов в строю линейная скорость ведущего робота ограничена в диапазоне $[0.1 \frac{m}{s}, 0.2 \frac{m}{s}]$, угловая скорость ограничена в диапазоне $[-1,5 \frac{rad}{s}, 2 \frac{rad}{s}]$. Безопасное расстояние между роботами установлено 0.15 m . Результаты движения показаны на Рис. 16, б.



Рис. 16. а) Траектория ведущего робота в построенной карте.
б) Траектории роботов R_0 (чёрная), R_1 (синяя) и R_2 (жёлтая)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Исследованы характеристики движения конвоя с использованием модели масса-пружина-демпфер. Показано, что характеристики движения конвоя удовлетворительны в случае движения конвоя по прямой, при движении в плоскости в модели необходимо дополнительно использовать пружины кручения.
2. Разработан способ управления движением ведомого робота вдоль траектории своего ведущего робота. Метод позволяет обеспечивать движение робота вдоль произвольной программной траектории.
3. Проведен качественный анализ системы управления движением группы роботов в строю типа «конвой». Исследована устойчивость движения строя в случае прямолинейного движения, а также получены точностные характеристики.
4. Разработан метод локализации роботов с помощью измерения относительных положений роботов, учитываяшего шумы измерений.
5. Разработан алгоритм сглаживания с фиксированной задержкой для повышения точности оценки при локализации роботов. Разработанный метод позволяет обойти трудоемкую процедуру нахождения фундаментальной матрицы.
6. Разработан логический уровень системы управления группой роботов, обеспечивающий выполнение последовательности действия группы.
7. Проведено программное моделирование и экспериментальные натурные исследования с участием группы мобильных роботов, подтвердившие эффективность разработанных методов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Зенкевич С. Л., Чжу Хуа. Управление движением группы роботов в строю типа «конвой» // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. №1. С. 30-34. (0.25п.л./0.125п.л.)
2. Зенкевич С. Л., Назарова А. В., Чжу Хуа. Моделирование и анализ движения группы мобильных роботов в среде ROS // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. №5. С. 317-320. (0.25п.л./0.1п.л.)
3. Зенкевич С. Л., Чжу Хуа, Хо Цзяньвень. Экспериментальное исследование движения группы мобильных роботов в строю типа «конвой» // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. (в печати) (0.5п.л./0.17п.л.)
4. Зенкевич С. Л., Чжу Хуа, Чжай Мэйсинь. Один способ получения оценки сглаживания фазового вектора в задаче управления движением строя // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. (в печати) (0.5п.л./ 0.17п.л.)
5. Зенкевич С. Л., 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» (БТС-ИИ-2017, 5-6 октября 2017 г., г. Казань, Республика Татарстан, Россия): тр. семинара. / под ред. Е. А. Магида, В. Е. Павловского, К. С. Яковлева. Казань: Центр инновационных технологий, 2017. 240с. С. 136-147. (0.75п.л./0.25п.л.)
6. Зенкевич С. Л., Чжу Хуа, Чжай Мэйсинь. Управление движением роботов в группе на основе сглаживания траектории. // Экстремальная робототехника: сборник тезисов Международной научно-технической конференции. СПб.: Издательско-полиграфический комплекс «Гангут». 2017. С. 143-145. (0.2п.л./0.1п.л.)
7. Чжу Хуа. Система управления коллективом мобильных роботов. // Молодежный научно-технический вестник (электронный журнал). 2014. № 12. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/750233.html>. (0.5п.л.)