На правах рукописи

Котов Константин Юрьевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГРУППИРОВОК ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ

05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск — 2009

Работа выполнена в Институте автоматики и электрометрии
Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель	доктор технических наук Золотухин Юрий Николаевич
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук Александров Владимир Михайлович
	кандидат технических наук Иванов Владимир Алексеевич
Ведущая организация	Новосибирский государственный технический университет

Защита диссертации состоится «____» декабря 2009 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 003.005.01 в Институте автоматики и электрометрии СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института автоматики и электрометрии СО РАН.

Автореферат разослан «____» ноября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д. ф.-м. н. Насыров К. А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В течение последних двух десятилетий наблюдается возрастающий интерес к исследованиям в области управления группировками подвижных автономных объектов — мобильных роботов. Для таких задач как поиск, наблюдение, транспортировка, аварийно-спасательные и военные операции, исследование океана совместное использование подвижных роботов в группе более эффективно, чем применение одиночного робота. Замена сложного робота, способного решать комплекс задач, группой, состоящей из относительно простых и недорогих устройств, позволяет обеспечить свойства устойчивости и гибкости (адаптации) при решении разнообразных задач. Примерами таких групп являются группировки спутников, автономных подводных, наземных или воздушных аппаратов.

Одной из весьма актуальных является задача исследования океана. Это обусловлено необходимостью изучения и освоения его минеральных, биологических и энергетических ресурсов. Важную роль в решении данной задачи играют автономные необитаемые подводные аппараты, способные осуществлять длительные и трудоемкие работы по сбору информации в условиях сложной среды. Развитие средств вычислительной техники, спутниковой навигации и связи позволяет создавать подводные роботы, способные длительное время автономно работать в океане. Перспективным является совместное использование таких аппаратов для изучения активных придонных источников, обследования нефтяных разработок, инспекции трубопроводов, исследования широкомасштабных океанических структур и т. д.

При групповом управлении автономными подвижными объектами, в том числе подводными аппаратами, возникает необходимость разработки алгоритмов децентрализованного управления, обеспечивающих выполнение таких задач, как формирование заданной конфигурации (относительного расположения объектов в пространстве) группы, поддержание конфигурации группы при маневрировании, перемещение группы по предписанной траектории, а также движение группы с использованием информации об измеряемых параметрах среды.

В настоящее время можно выделить три основных подхода к управлению конфигурацией группы подвижных объектов: с применением концепции лидер-ведомый, ситуационный подход, использование виртуальных структур. Концепция лидер-ведомый предполагает разделение членов группы на объекты-лидеры и объекты-ведомые. Задачей объектов-ведомых является следование за лидером. Достоинством данного метода является относительная простота законов управления, а недостатком — зависимость успеха миссии группы от состояния объекта-лидера. Ситуационный метод основан на обнаружении ситуаций из заранее определенного множества и принятия управленческих решений, ассоциированных с ситуациями. При этом действия каждого робота могут разбиваться на несколько основных этапов: достижение цели, обход препятствий, сохранение заданной дистанции между роботами в группе и т. п. Сложность получения аналитических результатов определяет основной недостаток данного метода. В подходе с применением виртуальных структур траектория движения каждого робота задана с помощью виртуальной структуры, например, некоторой функции. Движение робота может осуществляться в направлении минимума данной функции. Вычисление функции предполагает централизованное определение координат роботов во время движения группы.

Коммуникационные возможности автономных подводных аппаратов накладывают существенные ограничения при использовании данных подходов, связанные с конечной областью взаимодействия объекта с окружением. Для решения задачи формирования заданной конфигурации группы, состоящей из таких объектов, разработаны децентрализованные алгоритмы управления с применением потенциальных функций (A. Jadbabaie, H. Tanner, A. Kumar), а также ситуационных алгоритмов (T. Balch, M. Mataric). Однако эти подходы обеспечивают решение для ограниченного класса начальных условий.

Помимо управления группой в целом, возникает задача управления маневрированием отдельного объекта. Как правило, математическое описание объекта группы — мобильного робота — включает в себя уравнения неголономных связей, препятствующих использованию стандартных алгоритмов планирования и управления, разработанных, например, для манипуляционных роботов. В частности, особенностью неголономных систем является существенный дефицит доступных управлений. Задача стабилизации для таких систем является нетривиальной: неголономные системы не могут быть стабилизированы относительно положения равновесия стационарной обратной связью по состоянию.

В общем случае задача совместного управления подвижными объектами в группе и перемещения группы к целевому положению не предполагает явного задания траектории движения объекта, т. е. желаемая траектория может быть задана последовательностью операций или реперными точками. Также может отсутствовать или быть минимальной априорная информация о существенных для выполнения задачи характеристиках и параметрах окружающей среды, например, наличии препятствий. Важным требованием при управлении маневрирующей группой подвижных объектов является устойчивость, которая может трактоваться как ограниченность переменных состояния объектов, в частности, относительных расстояний между объектами.

Описанные в литературе подходы к решению таких задач основаны на методах линеаризации обратной связи, функций Ляпунова, адаптивного и нечеткого управления и приводят к синтезу сложных, существенно нелинейных законов управления (A. Aguiar, J. Lawton, S. Sastry, P. Kokotovic, A. Morse, J. Hespanha).

Для перемещения группировки по предписанной траектории, заданной в аналитическом виде, разработаны алгоритмы, основанные на сложных нелинейных преобразованиях модели объекта (C. Samson, A. Aguiar, A. Morse, J. Hespanha).

При управлении автономными подводными роботами важной задачей является пространственное движение с использованием информации об изменениях различных измеряемых параметров окружающей среды (солености, температуры и т. п.). Здесь задача управления заключается в определении направления движения объекта или группы, зависящего от изменения измеряемого параметра, например, его градиента. Управление скоростью может быть сведено к поддержанию требуемых величин скоростей объектов при маневрах группы. В остальное время движение считается равномерным. Как правило, решение в этом случае приводится для кинематических моделей подвижных объектов, при этом полученные траектории движения далеки от оптимальных (E. Burian, N. Leonard, J. Silva).

Таким образом, является актуальной задача управления пространственным движением группы автономных подвижных объектов с поддержанием заданной конфигурации группы, в том числе, при отсутствии аналитического описания желаемой траектории.

Цель и задачи диссертационной работы. Целью работы является моделирование движения и разработка децентрализованных алгоритмов управления движением группировок динамических объектов. Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие задачи:

- Разработать имитационную кинематическую модель группы подвижных объектов с распределенным алгоритмом управления, обеспечивающим формирование заданной конфигурации группы.
- Разработать алгоритмы управления движением, провести моделирование и проанализировать свойство сохранения заданной конфигурации группы динамических объектов при отсутствии аналитического описания траектории движения.
- Разработать алгоритмы управления движением группировки динамических объектов вдоль желаемой траектории, заданной в аналитическом виде.
- Осуществить разработку, провести моделирование и проанализировать свойства системы управления движением автономного объекта и группировки объектов при исследовании скалярного поля.

Методы исследования. В работе использовались методы теории автоматического управления, неголономных механических систем, систем с переменной структурой, методы математического моделирования.

Научная новизна работы:

- Для кинематической модели группы подвижных объектов предложен алгоритм управления объектом, позволяющий организовать движение к заданному положению в составе группы при условии ограниченной области взаимодействия каждого объекта с окружением.
- Предложен алгоритм децентрализованного управления группировкой динамических объектов в режиме следования за лидером, обеспечивающий отслеживание траектории цели с желаемой динамикой изменения пространственных отклонений объекта относительно цели.
- Предложен алгоритм управления группировкой динамических объектов, обеспечивающий перемещение по предписанной траектории, заданной в аналитическом виде. Предложенная постановка задачи управления объектом позволяет рассматривать стабилизацию объекта относительно заданной траектории как простую задачу компенсации отклонения курсового угла объекта.

- Разработан алгоритм управления динамическим объектом, обеспечивающий перемещение к изолинии и дальнейшее движение вдоль изолинии скалярного поля на основе непрерывного оценивания градиента по дискретным измерениям интенсивности поля.

Практическая ценность. Результаты диссертационной работы могут быть использованы при построении систем управления группами автономных мобильных роботов, функционирующими в условиях неопределенности, в том числе и в задании траектории движения.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на следующих семинарах и конференциях:

- VIII Школе – семинаре молодых ученых "Математическое моделирование и информационные технологии" (Иркутск, 2006).
- Научно-практической конференции молодых ученых и студентов "Информационно – вычислительные системы анализа и синтеза изображений" (Новосибирск, ИАиЭ, 2006).
- VIII Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения", АПЭП – 2006 (Новосибирск, НГТУ, 2006).
- IX Международной Четаевской конференции "Аналитическая механика, устойчивость и управление движением" (Иркутск, ИДСТУ, 2007).
- IX Международной конференции "Проблемы управления и моделирования в сложных системах" (Самара, ИПУСС, 2007).
- IV Всероссийской школе-семинаре молодых ученых "Проблемы управления и информационные технологии" (Казань, КГТУ, 2008).
- IX Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" АПЭП – 2008 (Новосибирск, НГТУ, 2008).
- XI Международной конференции "Проблемы управления и моделирования в сложных системах" (Самара, ИПУСС, 2009).

Основные положения, выносимые на защиту:

- Алгоритм управления объектом, использующий информацию о структуре графа описания взаимодействий в группе, позволяет организовать движение к заданному положению в составе группы при условии ограниченной области взаимодействия каждого объекта с окружением.
- Алгоритм управления объектом, основанный на организации вынужденного движения вдоль желаемой траектории в пространстве состояний объекта, позволяет обеспечить отслеживание перемещения цели и экспоненциальное уменьшение пространственных отклонений объекта относительно цели.
- Алгоритм управления объектом, основанный на использовании градиента аналитической функции, описывающей как заданную траекторию движения, так и препятствия, обеспечивает перемещение объекта по предписанной траектории с обходом препятствий.
- Алгоритм управления движением объекта с использованием дополнительного тестового сигнала обеспечивает непрерывное вычисление полного зна-

чения градиента скалярного поля на основе дискретных измерений интенсивности поля.

Личный вклад автора. Все научные результаты, выносимые на защиту и изложенные в тексте диссертации, получены автором лично либо при его непосредственном участии.

Публикации работы. По материалам диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 8 докладов в сборниках трудов научных конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5-и глав, заключения и списка литературы. Содержит 124 страницы основного текста, 39 рисунков. Список литературы составляет 89 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, формулируются цель и задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрены основные понятия и элементы описания систем подвижных автономных объектов, представлена классификация математических моделей динамики агентов в группе, излагаются положения неголономной механики, используемые для построения математических моделей мобильных роботов, а также задачи и методы управления движением агентов в группе.

Значительный интерес к управлению группами подвижных объектов вызван исследованиями в области мобильной робототехники. Основными элементами математического описания таких систем являются дифференциальные или разностные уравнения движения объектов в группе, а также графы геометрического описания группы и информационного взаимодействия между объектами.

Для упрощения синтеза и анализа законов управления динамика объекта может не учитываться, и в этом случае уравнения движения представляют собой кинематические соотношения с управлением по скорости или по ускорению. Другой тип моделей учитывает динамику объекта и различные возмущающие воздействия. При этом часто делается предположение о полной управляемости объекта и отсутствии неголономных связей. Большинство реальных подвижных роботов имеют неголономные ограничения движения и число управляющих входов меньшее, чем число степеней свободы. Автономные подводные роботы, кроме этого, обладают сложной динамикой, обусловленной взаимодействием робота со средой. Исходя из этого, в данной работе в качестве объекта исследования принята динамическая модель колесного робота с дифференциальным приводом, учитывающая неголономные ограничения. Кинематика и динамика такого объекта описываются простыми соотношениями, в то же время структурная модель такой системы аналогична сложным объектам, например, подводным роботам.

Основные подходы к выводу уравнений движения колесных роботов базируются на общих теоремах динамики или аппарате неголономной механики. В последнем случае весьма удобна векторно-матричная форма уравнений, ориентированная на использование систем компьютерной алгебры для построения математических моделей неголономных механических систем.

Важными свойствами математических моделей мобильных роботов являются достижимость, управляемость и стабилизируемость, т. е. свойства, связанные с принципиальной возможностью реализации алгоритмов управления.

Установлено, что для рассматриваемых неголономных моделей движения не существует гладкого или непрерывного статического закона управления в виде обратной связи. Один из подходов стабилизации нелинейных управляемых систем заключается в использовании неавтономных законов управления с обратной связью. Другой подход предполагает введение разрывных законов управления, не зависящих от времени. Свойство инвариантности по отношению к внешним возмущениям и изменениям параметров объекта управления делает перспективным использование скользящих режимов при управлении подвижными объектами.

Управление объектом в группе может быть представлено как одновременное достижение трех целей: перемещение в заданное положение в составе группы, движение с заданной скоростью, обход препятствий, а также движение в составе группы к целевому положению. При решении такой задачи управления широко используются методы потенциальных функций, линеаризации обратной связи и ситуационный подход.

Свойства устойчивости и управляемости являются необходимыми при синтезе законов управления группой подвижных объектов. Устойчивость группы в общем случае может предполагать ограниченность состояний системы (например, относительных расстояний между объектами). Теория графов является важным инструментом в изучении устойчивости и управляемости группы. Топология графа, соответствующая определенной структуре группы, может быть использована при синтезе закона управления или проверке факта существования такого закона. Также для анализа устойчивости применяются функции Ляпунова.

Вторая глава посвящена решению проблемы управления конфигурацией (относительным расположением в пространстве) объектов в группе. Каждый объект имеет ограниченный радиус видимости и определяет относительное положение всех остальных объектов (непосредственно или через другие объекты). Взаимодействие между объектами описывается с помощью потенциальных функций. Предложен распределенный алгоритм управления, обеспечивающий формирование заданной конфигурации группы при условии сохранения взаимодействия между всеми объектами.

В качестве модели принята кинематическая модель группы, состоящей из N подвижных объектов. Положение i-го объекта описывается переменной $x_i \in \Re^2$. Каждый объект имеет ограниченный радиус видимости r. Объект j является соседом объекта i, если он находится внутри окружности радиуса r, центр которой совпадает с положением объекта i. Предполагается синхронное движение объектов и отсутствие запаздывания во времени, т. е. все объекты движутся одновременно, и им известно точное относительное положение остальных объектов в каждый момент времени (непосредственно или через другие объекты). Движение

i-го объекта описывается уравнением в непрерывном времени:

$$\dot{x}_i = u_i, \tag{1}$$

где u_i — управляющее воздействие.

Представим взаимодействие между объектами в виде неориентированного графа G_p: каждый объект является вершиной графа и вершина i соединяется дугой с вершиной j, если объект i является соседним по отношению к объекту j. Так как набор соседних объектов для объекта i может меняться с течением времени, структура графа G_p, определенная такими наборами, также может изменяться во времени. Обозначим символом $N_i(t)$ множество индексов соседних объектов для объекта i.

Целью управления будем считать перемещение объекта к заданному относительному положению в группе. Для определения относительного положения объектов в группе воспользуемся методом потенциальных функций. Введем функцию взаимодействия между объектами i и j:

$$J_{ij} = \alpha_I(\ln(h_{ij}) + \frac{d_{ij}}{h_{ij}}), \tag{2}$$

где $h_{ij}, d_{ij} > 0$ — текущее и заданное расстояние между объектами i и j в группе; $\alpha_I > 0$ — постоянная величина. Задание управления u_i в виде

$$u_i = -\sum_{j \in N_i(t)} \nabla_{x_i} J_{ij} \tag{3}$$

обеспечит движение объектов в направлении заданной конфигурации группы при условии сохранения свойства связности для объединения множества графов G_p на всем интервале времени (A. Jadbabaie).

Заметим, что с помощью уравнения (3) возможно задание только ограниченного набора конфигураций группы. Для полного описания относительного расположения объектов в группе необходимы дополнительные связи (взаимодействия) между объектами. Потребуем более строгого выполнения условия связности графа G_p: граф G_p является связным графом в каждый момент времени. Также будем считать, что объект получает информацию о координатах всех объектов группы (непосредственно или через другие объекты). Тогда запишем закон управления (3) в виде:

$$u_i = -\sum_{j=1, j \neq i}^{N} \nabla_{x_i} J_{ij}. \tag{4}$$

Сформулируем правило взаимодействия соседних объектов в группировке: объект i может удаляться от объекта j на расстояние, превышающее радиус видимости r в случае, если звено, образованное парой вершин (i, j), принадлежит циклу с длиной $l > 1$ в графе G_p. Это правило следует из возможности удаления ребра из цикла без потери его связности. В случае $l = 1$ внесем поправку в потенциальную функцию J_{ij}:

$$\begin{cases} \tilde{J}_{ij} = J_{ij} + J_{ij}^S \text{ при } l = 1; \\ \tilde{J}_{ij} = J_{ij} \text{ при } l > 1, \end{cases} \tag{5}$$

Закон управления (4) можно представить в виде:

$$u_i = -\sum_{j=1, j\neq i}^{N} \nabla_{x_i} J_{ij} - \sum_{j \in N_i(t)} \nabla_{x_i} J_{ij}^S = -\sum_{j=1, j\neq i}^{N} \nabla_{x_i} \tilde{J}_{ij}. \tag{6}$$

В работе показано, что закон управления (6) обеспечивает переход группы в равновесное состояние, соответствующее остановке всех объектов группы, из произвольных начальных условий (расположения объектов в пространстве). При этом вводится допущение, что не происходит одновременной потери коммуникации между объектами группы, приводящей к нарушению свойства связности графа G.

На рис. 1а,б приведены траектории движения объектов к заданной конфигурации вида 'линия' при условии ограниченного радиуса взаимодействия каждого объекта $r = 1.3$. Маркерами 'o' и 'x' отмечены начальное и конечное положение объекта соответственно. На рис. 1а используется алгоритм (4). Видно, что группа распадается и заданная конфигурация не достигается. На рис. 1б используется алгоритм (6), обеспечивающий достижение заданного расположения объектов в группе.

а) б)

Рис. 1: Формирование заданной конфигурации вида 'линия'.

В третьей главе представлен алгоритм управления движением с поддержанием заданной конфигурации группы неголономных мобильных роботов при отсутствии аналитического описания траектории движения. Для построения заданной конфигурации группы используется подход лидер-ведомый с применением метода потенциальных функций для описания взаимодействия объектов в группе и препятствий. Предложен робастный алгоритм отслеживания траектории цели, основанный на применении скользящего режима вдоль желаемой траектории в пространстве состояний объекта. Получены условия возникновения скользящего режима при движении объекта вдоль желаемой траектории. Выполнение этих условий обеспечивает устойчивость в целом системы управления.

Согласно рис. 2 робот будем рассматривать как систему трех (платформа и колеса) абсолютно твердых тел. Колеса находятся в точечном контакте с поверхностью; робот движется без проскальзывания колес. Два двигателя обеспечивают независимое вращение ведущих колес платформы. В точке B платформа имеет абсолютно гладкую опору. Вектор обобщенных координат робота имеет вид

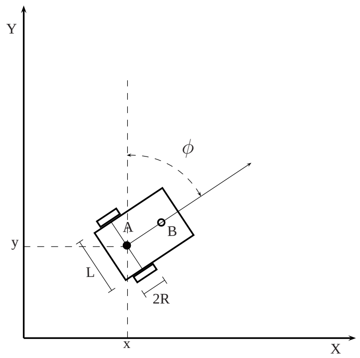


Рис. 2: Мобильный робот с дифференциальным приводом.

$q = (x, y, \phi, \theta_1, \theta_2)^T$, где x, y — координаты точки A — середины отрезка, соединяющего центры колес, ϕ — угол поворота оси симметрии платформы вокруг вертикали, отсчитываемый от оси Y, θ_1 и θ_2 — углы поворота правого и левого колеса соответственно. Отсутствие проскальзывания колес выражается неголономными ограничениями в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{x}\cos\phi + \dot{y}\sin\phi - \dfrac{R}{2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) = 0; \\ \dot{x}\sin\phi - \dot{y}\cos\phi = 0. \end{cases} \tag{7}$$

Запишем уравнения кинематики мобильного робота в скалярной форме:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cdot \sin\phi; \\ \dot{y} = v \cdot \cos\phi; \\ \dot{\phi} = w, \end{cases} \tag{8}$$

где $v = \dot{x}\cos\phi + \dot{y}\sin\phi$ определяет величину скорости точки A, w — величину угловой скорости вращения платформы в точке A. После исключения множителей Лагранжа уравнения динамики мобильного робота принимают следующий вид:

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = \dfrac{M}{J}; \\ \dot{v} = \dfrac{F}{m}. \end{cases} \tag{9}$$

К управляющим (входным) переменным относятся продольная движущая сила F и вращающий момент M.

В работе показано, что система (8), (9) является управляемой в классе ограниченных управлений. Задача управления движением мобильного робота может быть сведена к задаче стабилизации отклонений по переменным x, y, ϕ в кинематической модели (8).

Рассмотрена задача управления группой мобильных роботов, состоящая из следующих подзадач: формирование заданного относительного расположения объектов в группе и маневрирование группы при отслеживании траектории цели.

а) б)

Рис. 3: Движение объекта относительно заданного положения на траектории.

Выделим в составе группы объект-лидер группы, относительно которого остальные члены группы определяют свое положение и за которым они следуют. Поставим перед лидером задачу выйти в точку с координатами $(x_0(t), y_0(t))$ на некоторой кривой в плоскости (x, y) с дальнейшим движением вдоль этой кривой. Направление на точку $(x_0(t), y_0(t))$ определяется углом $\phi_0(t)$, $0 \leq \phi_0 \leq 2\pi$(см. рис. 3а). Определим ошибку в положении лидера относительно точки $(x_0(t), y_0(t))$ тремя величинами:

$$\begin{cases} \Delta x(t) = x(t) - x_0(t); \\ \Delta y(t) = y(t) - y_0(t); \\ \Delta\phi(t) = \phi(t) - \phi_0(t). \end{cases} \tag{10}$$

Желаемую траекторию движения в пространстве переменных $x, \dot{x}, y, \dot{y}, \phi, \dot{\phi}$ определим уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{x} + k_1 \Delta x = 0; \\ \dot{y} + k_1 \Delta y = 0; \\ \dot{\phi} + k_2 \Delta\phi = 0. \end{cases} \tag{11}$$

С помощью двух параметров F и M, не воздействующих непосредственно на $\dot{x}$, $\dot{y}$, $\dot{\phi}$, невозможно обеспечить одновременное выполнение условий (11). Однако мы можем организовать вынужденное движение системы в скользящем режиме вдоль траектории, определяемой уравнениями (11). Определим отклонение объекта от траектории (11) функциями

$$\begin{cases} S_1(x, \dot{x}) = \dot{x} + k_1 \Delta x; \\ S_2(y, \dot{y}) = \dot{y} + k_1 \Delta y; \\ S_3(\phi, \dot{\phi}) = \dot{\phi} + k_2 \Delta\phi; \\ S(x, \dot{x}, y, \dot{y}, \phi, \dot{\phi}) = \dfrac{1}{2}(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2) \end{cases} \tag{12}$$

и будем выбирать управляющие параметры F, M, исходя из условия

$$\frac{dS}{dt} \leq 0. \tag{13}$$

Знак равенства в (13) допустим только при $S = 0$, что гарантирует выполнение условий (11). В случае $S \neq 0$ выполнение условия $\dot{S} < 0$ вынуждает движение системы в окрестности траектории, определяемой уравнениями (11). Положим

$$u = -(S_1 \sin\phi + S_2 \cos\phi). \tag{14}$$

При отсутствии ограничений на управляющие параметры F и M и с учетом требования (13) и условия $v \geq 0$ определим управляющий параметр $\frac{F}{m}$ следующим образом:

$$\frac{F}{m} = \begin{cases} c_1 u & \text{при } v > 0 \text{ или } u \geq 0; \\ 0 & \text{при } v = 0 \text{ и } u < 0. \end{cases} \tag{15}$$

Здесь c_1 — коэффициент усиления по каналу управления скоростью. Аналогично:

$$\frac{M}{J} = -c_2 S_3, \tag{16}$$

где c_2 — коэффициент усиления по каналу управления курсом (углом ϕ).

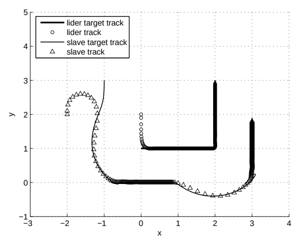
В работе показано, что при достаточно больших значениях коэффициентов c_1 и c_2 можно выполнить условие (13), если u и S_3 не равны нулю тождественно. Для возникновения скользящего режима при движении системы вдоль траектории (11) необходим переход от непрерывного управления к управлению в виде разрывной функции. При этом объект должен обладать достаточными ресурсами управления по отношению к динамике целевой точки.

В главе также рассмотрен вопрос управления скоростью объекта при маневрах. Получены соотношения для управляющего воздействия (15). Задача обхода препятствий и исключения коллизий между объектами в группе решена с помощью метода потенциальных функций.

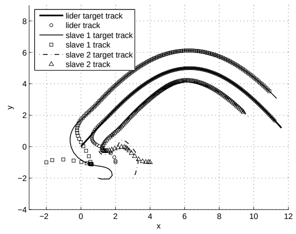
Для определения места i-го объекта в группе введены параметры: d_i — расстояние до лидера, α_i — направление на лидера относительно направления движения последнего. В соответствии с рис. 3б значения координат требуемого положения i-го объекта в группе определяются соотношениями:

$$\begin{cases} x_{i\_ref} = x - d_i \sin(\phi + \alpha_i); \\ y_{i\_ref} = y - d_i \cos(\phi + \alpha_i). \end{cases} \tag{17}$$

Законы управления для i-го объекта имеют вид соотношений (15)-(16) с индексированием соответствующих переменных. Таким образом, сохраняется единообразие структуры системы управления для всех членов группы, что обеспечивает их взаимозаменяемость при выходе из строя какого-либо члена группы. На рис. 4 представлены результаты моделирования движения группы для различных случаев задания траектории движения цели.



а)



б)

Рис. 4: а) Движение группы в составе ведущий - ведомый ($\alpha_1 = -pi/4$, $d_1 = \sqrt{2}$) вдоль траектории, заданной отрезками прямых. Начальные условия: $x(0) = 0$; $x_1(0) = -2$; $y(0) = y_1(0) = 2$; $\phi(0) = -\pi$; $\phi_1(0) = 0$. б) Сопровождение группировкой ($\alpha_1 = pi/4$, $\alpha_2 = -pi/4$, $d_1 = d_2 = \sqrt{2}$) точки, движущейся по синусоидальной кривой амплитуды 5 из начала координат. Начальные условия: $x(0) = 2$, $x_1(0) = -2$, $x_2(0) = 4$; $y(0) = y_1(0) = y_2(0) = -1$; $\phi(0) = \phi_1(0) = \phi_2(0) = 0$.

В четвертой главе рассмотрена задача управления движением группировки роботов при движении вдоль траектории, заданной в аналитическом виде. Предложен алгоритм управления объектом-лидером, обеспечивающий выход на траекторию и дальнейшее движение по предписанной траектории с обходом препятствий. Задача стабилизации относительно желаемой траектории сводится к компенсации отклонения курсового угла объекта.

Рассмотрим задачу автономного управления движением объекта (8), (9) на плоскости. Целью управления будем считать перевод объекта из точки (x, y) плоскости X, Y на линию L, описываемую уравнением

$$g(x, y) = 0. \tag{18}$$

Функцию $g(x, y)$ считаем непрерывной и непрерывно дифференцируемой на некотором множестве $G \in \Re^2$. Полагаем также, что линия L делит множество G на подмножества $G+$ и $G-$ такие, что:

$$g(x, y) = \begin{cases} > 0 \text{ при } (x, y) \in G+; \\ < 0 \text{ при } (x, y) \in G-. \end{cases} \tag{19}$$

Пренебрегая инерционностью системы управления курсом объекта, законы управления запишем в виде:

$$\begin{cases} \dot{v} = k_v(v_{ref} - v); \\ \dot{\phi} = k_\phi(\phi_{ref} - \phi). \end{cases} \tag{20}$$

Движение описанного таким образом объекта определяется заданием v_{ref} на линейную скорость v и заданием ϕ_{ref} на курсовой угол ϕ. Угол ϕ_{ref} зависит от положения объекта относительно линии L, т. е. объект должен двигаться в направлении возрастания значений $g(x, y)$ при $(x, y) \in G-$ и в противоположном направлении при $(x, y) \in G+$. В таком случае естественно воспользоваться градиентом функции $g(x, y)$. Полученное выражение для ϕ_{ref}:

$$\phi_{ref} = Arctg\frac{-sign\, g(x, y)(1 - h(x, y))\nabla_x g(x, y) + \beta h(x, y)\nabla_y g(x, y)}{-sign\, g(x, y)(1 - h(x, y))\nabla_y g(x, y) - \beta h(x, y)\nabla_x g(x, y)} \tag{21}$$

обеспечивает выход объекта на изолинию (18), с последующим движением вдоль этой изолинии. Здесь $h(x, y)$ — функция, зависящая от степени близости объекта к линии L, β — параметр, определяющий направление движения после выхода на изолинию.

Требование обхода препятствий во время движения обуславливает необходимость введения дополнительных процедур в алгоритмы управления. В случае обнаружения препятствия управление будем вести в соответствии с градиентом модифицированной функции:

$$\tilde{g}(x, y) = g(x, y) + \Pi(x, y), \tag{22}$$

где $\Pi(x, y)$ — функция, описывающая влияние препятствия на объект. Для преодоления седловых точек, в которых $\nabla\tilde{g}(x, y) = 0$, необходимо ввести локальную поправку в угол ϕ_{ref}:

$$\tilde{\phi}_{ref} = \phi_{ref}(1 - h_2(x, y)) + \beta \cdot \frac{\pi}{2} h_2(x, y). \tag{23}$$

Здесь функция $h_2(x, y)$ определяет окрестность седловой точки.

При соответствующем выборе функции $h(x, y)$ в выражении (21) и в случае замены $g(x, y)$ на потенциальную функцию, описывающую взаимодействие объекта с окружением, соотношение (21) может использоваться также для определения направления движения остальных объектов группы. Это говорит о возможном единообразии системы управления курсовым углом для всех объектов в группе.

В пятой главе рассмотрена задача управления движением группировки роботов при исследовании скалярного поля. Подобные задачи являются типичными в управлении автономными объектами, не имеющими датчиков относительного положения и располагающими только результатами измерений различных характеристик окружающей среды. Окружающая среда рассматривается также в контексте среды, в которой находятся автономные подводные аппараты — океана.

В главе рассмотрена задача применения алгоритма (21) к исследованиям физических полей океана. Так как измерения характеристик физических полей океана производятся в отдельных точках пространства, то функция $g(x, y)$ задается в дискретном виде и для нахождения производных $\frac{\partial g(x,y)}{\partial x}$ и $\frac{\partial g(x,y)}{\partial y}$ в выражении (21) используются методы численного дифференцирования.

Целью управления также считаем перевод объекта из точки (x, y) плоскости X, Y на линию L, описываемую уравнением

$$g_i(x_i, y_i) \approx 0. \tag{24}$$

Полагаем, что объект имеет возможность измерять одно значение поля $g_i(x_i, y_i)$ в некоторый момент времени t_i.

В работе применяется метод на основе использования полного дифференциала функции, позволяющий получать оценку градиента первого порядка точности с помощью только трех измерений поля. Для функции $g(x, y)$ мы можем записать полный дифференциал:

$$\Delta g(x, y) \approx \frac{\partial g(x, y)}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial g(x, y)}{\partial y}\Delta y. \tag{25}$$

Относительная погрешность равенства (25) становится сколь угодно малой при достаточно малых $\Delta x, \Delta y$. При наличии трех измерений поля $g_i(x_i, y_i)$ в точках с координатами (x_i, y_i), $i = 1, ..., 3$ выполняется:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial g(x,y)}{\partial x} = \dfrac{\Delta g_1 \Delta y_2 - \Delta g_2 \Delta y_1}{\Delta x_1 \Delta y_2 - \Delta x_2 \Delta y_1}; \\ \dfrac{\partial g(x,y)}{\partial y} = \dfrac{\Delta g_2 \Delta x_1 - \Delta g_1 \Delta x_2}{\Delta x_1 \Delta y_2 - \Delta x_2 \Delta y_1}. \end{cases} \tag{26}$$

Для вычисления величин $\frac{\partial g(x,y)}{\partial x}, \frac{\partial g(x,y)}{\partial y}$ с помощью выражения (26) необходимо выполнение условия:

$$\Delta = \Delta x_1 \Delta y_2 - \Delta x_2 \Delta y_1 \neq 0. \tag{27}$$

При нахождении точек измерений поля на одной прямой условие (27) нарушается.

Предполагая, что объект имеет возможность "помнить"два предыдущих измерения поля, мы можем воспользоваться соотношениями (26) для оценки градиента $\nabla g(x, y)$. Заметим, что при движении объекта с курсовым углом $\phi = const$ условие (27) нарушается. В этом случае необходимо введение тестового сигнала в систему управления. Для этого закон управления (20) запишем в виде:

$$\dot{\phi} = k_\phi(\phi_{ref} - \phi) + \dot{\delta\phi}, \tag{28}$$

где $\dot{\delta\phi}$ — аддитивно малая функция (тестовый сигнал).

В работе показано, что условие (27) выполняется при наличии тестирующего сигнала $\dot{\delta\phi}$ и ненулевой задержки Δt между моментами измерений поля, при этом существуют оптимальные значения параметров тестового сигнала, минимизирующие ошибку оценивания градиента.

Также рассмотрено движение группы в составе лидер-ведомые при перемещении к изолинии скалярного поля. Управление лидером формируется на основе оценки градиента поля $g(x, y)$ по данным измерений поля объектами группы. Рассмотрена группа, состоящая из трех объектов. Здесь для оценки $\nabla g(x, y)$ использованы полученные ранее соотношения (26).

Заметим, что в случае использования зашумленных реализаций поля $g(x, y)$ при вычислении ϕ_{ref} с помощью выражения (21) величина ϕ_{ref} изменяется с частотой, пропорциональной частотной составляющей аддитивного шума, что вызывает значительные отклонения заданного положения для объектов-ведомых. Для решения этой проблемы предложен модифицированный алгоритм (21), основанный на замене плавного изменения функции $h(x, y)$ переключениями в ограниченной окрестности линии L.

На рис. 5 представлены результаты моделирования движения одиночного объекта по направлению к изолинии квадратичного поля $S(x, y) = (x/10)^2 + (y/10)^2$. Слева на рисунке показана траектория движения объекта, а справа — изменение величины координат x, y, ϕ объекта и интенсивности поля S во временной области для случая движения объекта по направлению антиградиента поля.

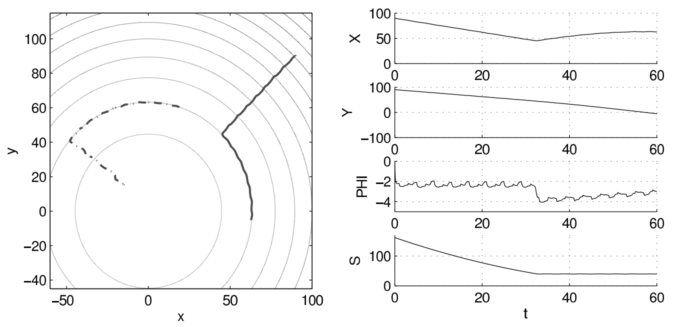


Рис. 5: Перемещение объекта к изолинии по направлению градиента (рис. слева, штрихпунктирная линия, $x(0) = -15, y(0) = 15, \phi(0) = 0$) и антиградиента (рис. слева, сплошная линия, $x(0) = -15, y(0) = 15, \phi(0) = 0$).

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

1. Разработана имитационная кинематическая модель группы подвижных объектов и предложен децентрализованный алгоритм управления объектом, позволяющий организовать движение к заданному положению в составе группы при условии ограниченной области взаимодействия объекта с окружением и сохранении взаимодействия между объектами.
2. Предложен алгоритм децентрализованного управления группой динамических объектов в режиме следования за лидером, обеспечивающий отслеживание траектории цели и экспоненциальное уменьшение пространственных отклонений объекта относительно цели.
3. Проведенный анализ и моделирование движения показали, что предложенный алгоритм управления группой объектов с выделенным лидером обеспечивает сохранение заданной конфигурации группы при отслеживании объектом-лидером траектории цели.
4. Разработан алгоритм управления движением группировки динамических объектов, обеспечивающий перемещение по предписанной траектории, заданной в аналитическом виде, с обходом препятствий. Показано, что пространственное отклонение объекта-лидера от траектории не превышает заданной величины, т. е. движение осуществляется в определенной окрестности данной траектории.
5. Предложен алгоритм управления автономным объектом и группировкой объектов, обеспечивающий перемещение к изолинии и дальнейшее движение вдоль изолинии скалярного поля.
6. На основе математического моделирования и проведенного анализа показана устойчивость предложенной системы управления объектом и группировкой объектов при исследовании скалярного поля, а также существование параметров системы управления, минимизирующих ошибку оценивания градиента поля.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. *Золотухин Ю.Н., Котов К.Ю., Нестеров А.А.* Децентрализованное управление подвижными объектами в составе маневрирующей группы // *Автометрия.* — 2007. — № 3. — С. 31–39.
2. Управление плоским движением автономного объекта при исследовании скалярных полей / Ю.Н. Золотухин, К.Ю. Котов, А.А. Нестеров, А.П. Ян // *Автометрия.* — 2008. — № 6. — С. 109–115.
3. *Котов К.Ю., Шпилевая О. Я.* Переключаемые системы: устойчивость и проектирование (обзор) // *Автометрия.* — 2008. — № 5. — С. 71–87.
4. *Котов К. Ю.* Математические модели взаимодействия агентов в коллективах // В кн. материалы VIII школы – семинара молодых ученых "Математическое моделирование и информационные технологии". — Иркутск: 2006. — С. 82–86.
5. *Котов К. Ю.* Алгоритм 2d управления группировкой автономных агентов // *В кн. материалы научно-практической конференции молодых ученых и студентов "Информационно – вычислительные системы анализа и синтеза изображений".* — 2006. — С. 54–56.
6. *Котов К. Ю.* Алгоритм управления группировкой подвижных автономных агентов // *В кн. материалы VIII международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" АПЭП – 2006.* — 2006. — Т. 7. — С. 230–235.
7. *Золотухин Ю.Н., Котов К.Ю., Нестеров А.А.* Децентрализованное управление подвижными объектами в составе маневрирующей группы // *В кн. Труды IX Международной Четаевской конференции "Аналитическая механика, устойчивость и управление движением".* — 2007. — С. 162–169.
8. *Золотухин Ю.Н., Котов К.Ю., Нестеров А.А.* Управление автономным объектом при плоском движении по заданной траектории с обходом препятствий // *В кн. Труды V Международной конференции "Проблемы управления и моделирования в сложных системах".* — 2007. — С. 213–219.
9. Управление движением автономного объекта в режиме поиска и отслеживания изолинии скалярного поля / Ю.Н. Золотухин, К.Ю. Котов, А.А. Нестеров, А.П. Ян // *В кн. материалы конференции "Проблемы управления и информационные технологии".* — 2008. — С. 247–250.
10. Управление автономным объектом при исследовании скалярных полей / Ю.Н. Золотухин, К.Ю. Котов, А.А. Нестеров, А.П. Ян // *В кн. материалы IX международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" АПЭП – 2008.* — 2008. — Т. 7. — С. 143–146.
11. Управление группировкой подвижных объектов в задаче преследования / Ю.Н. Золотухин, К.Ю. Котов, А.А. Нестеров, А.П. Ян // *В кн. Труды XI Международной конференции "Проблемы управления и моделирования в сложных системах".* — 2009. — С. 66–74.