

На правах рукописи



Юдинцев Богдан Сергеевич

**НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ
ТРАЕКТОРИЙ ДЛЯ ГРУППЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ**

Специальность:

**05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации
(информационные и технические системы)**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа – 2020

Работа выполнена на кафедре автоматизации технологических процессов ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент, **Даринцев Олег Владимирович**

Официальные оппоненты:

Мещеряков Роман Валерьевич, доктор технических наук, профессор РАН, ФГБУН Институт проблем управления РАН, заведующий лабораторией № 80

Собольников Сергей Александрович, кандидат технических наук, начальник лаборатории ФГУП «ВНИИА»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), г. Москва

Защита диссертации состоится 21 октября 2020 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.288.12 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» и на сайте www.ugatu.su.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сметанина Ольга Николаевна



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время роботы и робототехнические системы (РТС) получили широкое распространение в различных сферах человеческой деятельности, кроме того определены задачи, эффективное решение которых возможно только при организации гомогенных и гетерогенных коллективов роботов. К роботам-агентам коллектива предъявляются следующие требования: миниатюризация, наличие развитых средств коммуникации, высокая степень автономности и т.д., что, в свою очередь, приводит к появлению ряда специфических проблем управления как отдельными роботами, так и коллективом в целом.

Усилия многих исследовательских лабораторий в области робототехники направлены на построение автономных коллективов роботов различного назначения и на решение связанных с этой целью задач. Актуальность данного направления связана с тем, что при использовании роботов для выполнения большинства задач, предполагающих их автономное функционирование в течение продолжительного времени (сборка, строительство, грузоперевозка, исследование местности и т.д.), коллективные решения по сравнению с одиночным роботом отличаются большей эффективностью, низкой стоимостью, высокими надежностью и устойчивостью к внешним возмущениям.

При функционировании группы мобильных роботов (МР) в недостаточно известной обстановке становится актуальной проблема планирования безопасных траекторий, позволяющих строить безаварийные маршруты перемещения.

Степень разработанности темы. Различным аспектам данной проблемы посвящены работы как отечественных (Васильев С.Н., Гайдук А.Р., Каляев И.А., Капустян С.Г., Лохин В.М., Макаров И.М., Манько С.В., Даринцев О.В., Мунасыпов Р.А., Мигранов А.Б., Павловский В.Е., Романов М.П., Тимофеев А.В., Юревич Е.И., Ющенко А.С. и др.), так и зарубежных ученых (*Komoda A., Chang W.A., Foderaro G., Ferrari S., Gueaieb W., Lagoudakis M.G., Glasius R., Ramakrishna R.S., Wettergren T.A.*).

Исследования в данной области посвящены как способам применения классических алгоритмов поиска (алгоритм Дейкстры, «поиск в глубину», A^* и т.п.), так и интеллектуальных алгоритмов, построенных на базе нейронных сетей (НС), нечетких или генетических алгоритмов, основным преимуществом которых является скорость расчета при умеренной нагрузке на бортовые вычислительные комплексы. В ходе анализа было выявлено, что существующие подходы не учитывают специфику бортовых систем МР (вычислительные возможности, скорость реакции на внешние возмущения), что накладывает ряд ограничений для применения данных методов при наличии динамических препятствий в рабочей зоне и опасности столкновения с другими агентами группы. Таким образом, разработка системы планирования с учетом специфики группового управления и аппаратных возможностей МР представляется актуальной и своевременной задачей.

Настоящая работа посвящена решению задачи синтеза системы планирования бесконфликтных траекторий для группы МР.

Объектом исследования является система планирования траекторий мобильных роботов, перемещающихся в двумерном рабочем пространстве с наличием неподвижных и подвижных препятствий, и действующих в составе группы или автономно.

Предметом исследования являются архитектура, модели и алгоритмы системы планирования, обеспечивающей корректность и бесконфликтность траектории перемещения МР в условиях его функционирования в составе группы в двумерном рабочем пространстве с препятствиями.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности работы системы планирования траекторий, построенной на базе НС Хопфилда, а также разработка нейросетевой системы планирования траекторий для группы МР, действующей в двумерном рабочем пространстве с препятствиями.

Задачи исследования:

1. Разработать методический и программно-аппаратный базис информационного взаимодействия МР в группе на основе результатов анализа различных подходов к реализации системы планирования траекторий.

2. Модифицировать математическую модель НС Хопфилда с учетом специфики группового применения роботов и произвести отладку модифицированной математической модели системы планирования для одного робота-агента группы МР.

3. Разработать архитектуру и алгоритмы работы системы планирования, учитывающие особенности перемещения агента группы МР в условиях динамически меняющегося рабочего пространства и недостаточности информации об окружающей среде.

4. Разработать методику синтеза системы планирования безопасных траекторий для группы МР на основе программной модели, базирующейся на заданных правилах неконфликтного взаимодействия агентов с учетом различных методов группового управления.

5. Провести экспериментальную проверку работоспособности и эффективности разработанных алгоритмов, методик построения траекторий и программно-аппаратного комплекса системы планирования на базе полунатурного экспериментального стенда.

Научная новизна результатов:

1) Разработаны методика синтеза и прикладное программное обеспечение системы планирования траекторий на базе НС Хопфилда, отличающиеся тем, что они основаны на применении технологий мультипоточных и распределенных вычислений, что позволило эффективно решить задачу информационного обмена между агентами и проблему построения неконфликтных траекторий для группы МР с учетом реализуемых методов группового управления.

2) Предложена математическая модель модифицированной НС Хопфилда, отличающаяся тем, что она использует новые передаточную функцию нейронов и правила активации, что позволило ускорить процесс формирования нейронной карты, а также снизить риски возникновения локальных максимумов при работе системы в больших рабочих пространствах и(или) при сложной конфигурации препятствий.

3) Предложено методическое и алгоритмическое обеспечение для корректировки траектории, отличающиеся тем, что они позволяют системе планирования сохранять высокую эффективность при работе в условиях информационной недостаточности и при наличии динамических препятствий в рабочей зоне, а также сокращают время решения задачи позиционирования.

4) Предложена программно реализованная модель разрешения конфликтных ситуаций (между агентами) с помощью системы приоритетов, отличающаяся тем, что она основана на применении технологий многопоточной обработки данных, что обеспечивает эффективное решение задачи позиционирования в группе, построенной по централизованной или гибридной схеме управления, и сокращает время разрешения конфликтов между агентами.

Теоретическая значимость. Разработаны новая архитектура системы планирования на базе модифицированной НС Хопфилда и математическая модель НС, которые, благодаря новым алгоритмам функционирования нейросети и конструктора пути (КП), позволяют формировать неконфликтные и близкие к кратчайшим траектории для участников группы, а также обеспечивают оперативное реагирование МР при обнаружении новых препятствий в процессе движения по заданной траектории. В работе предложены модифицированная математическая модель НС Хопфилда, алгоритмы и созданное на их основе программное обеспечение (ПО), моделирующее систему планирования траекторий для групп МР, действующих в двумерном рабочем пространстве с препятствиями.

Практическая значимость. В работе приведена методика разработки специализированного программного обеспечения на базе языка *Python*, реализующего предложенный подход к решению задачи планирования траектории для группы МР на базе НС Хопфилда, которая может быть использована при синтезе и отладке алгоритмов работы бортовых систем планирования траекторий для агентов коллектива МР. Также практической полезностью обладает разработанный программно-аппаратный комплекс полунатурного стенда, позволяющий автоматизировать проводившиеся натурные/полунатурные эксперименты с различными типами систем планирования и получить данные, подтверждающие работоспособность и эффективность полученных решений.

Программные модули и алгоритмы, полученные в ходе диссертационного исследования, используются также при выполнении исследовательской работы по гранту РФФИ № 16-29-04165-офи_м, в рамках которого разрабатывается архитектура системы управления коллективом роботов на базе облачных технологий. Подтверждением практической ценности полученных результатов служат акт внедрения в учебный процесс, полученный на кафедре АТП ФГБОУ ВО УГАТУ, и акт об использовании результатов работы при проведении научных исследований, полученный в Институте механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН.

Методология и методы исследования. В работе использованы основные положения системного анализа, робототехники, теории нейронных сетей, а также методы математического моделирования, оптимизации и теории принятия решений. При разработке программного обеспечения применяются методы многопоточного программирования, имитационного моделирования и машинной графики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методическое и программно-аппаратное обеспечение системы планирования траекторий на базе НС Хопфилда, использующие технологии мультипоточных и распределенных вычислений и позволяющие эффективно решить задачу информационного обмена между агентами группы (соответствует п.2 паспорта специальности 05.13.01).

2. Математическая модель модифицированной НС Хопфилда и алгоритмы активации сети, учитывающие специфику аппаратных средств реализации и решаемых задач (соответствует п.5 паспорта специальности 05.13.01).

3. Архитектура и алгоритмы работы системы планирования, учитывающие особенности перемещения агента группы МР в условиях динамически меняющегося рабочего пространства и информационной недостаточности (соответствует п.5 паспорта специальности 05.13.01).

4. Методика синтеза системы планирования траекторий для группы МР и универсальная программная модель системы, базирующаяся на правилах неконфликтного взаимодействия агентов с учетом различных методов группового управления (соответствует п.5 паспорта специальности 05.13.01).

5. Результаты экспериментальной проверки работоспособности и эффективности разработанных алгоритмов, методик построения траекторий, полученные при помощи специализированного полунатурного экспериментального стенда (соответствует п.12 паспорта специальности 05.13.01).

Степень достоверности и апробация результатов. Основные материалы диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

VIII Международная молодежная научная конференция «Туполевские чтения», г. Казань, 2009 г.

IV и V Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения», г. Уфа, 2010-2011 гг.

Международная научно-техническая конференция «Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы» (ИИ-2010), Кацивели, 2010 г.

X Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами» г. Уфа, 2013 г.

II Международная конференция «Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений» (ITIDS'2014), г. Уфа, 2014 г.

X и XII Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ), г. Геленджик, Дивноморское, 2017, 2019 гг.

Основные результаты работы, выносимые на защиту, были получены в ходе работы исполнителем в Программах №15 ОЭММиПУ РАН «Управление движением, теория сложных информационно-управляющих систем», №1 ОЭММиПУ РАН «Научные основы робототехники и мехатроники», № I.31П Президиума РАН «Фундаментальные основы технологий двойного назначения в интересах национальной безопасности. Фундаментальные исследования процессов горения и взрыва. Актуальные проблемы робототехники», а также в рамках гранта РФФИ № 16-29-04165-офи_м «Развитие теоретического базиса, синтез и отладка программно-аппаратного распределенного комплекса для универсальных мобильных робототехнических платформ коллективного использования».

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует пунктам 2, 5, 12 паспорта специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (информационные и технические системы)».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 117 наименований, 3 приложений. Объем основной части диссертации составляет 159 страниц, включая 92 рисунка и 12 таблиц.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 19 научных работ, в том числе 4 работы в журналах, рекомендованных ВАК, и 1 статья в издании, входящем в системы цитирования *Scopus*.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю д.т.н., профессору Даринцеву О.В. и к.т.н. Мигранову А.Б. за постановку задачи; н.с. ИМех УФИЦ РАН Богданову Д.Р. за консультации при проведении численных экспериментов, Алексееву А.Ю. за помощь в проведении натуральных экспериментов. Автор также выражает признательность Налобиной Е.А. за огромный труд по редактированию и подготовке диссертации к печати.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность решаемой научной задачи, формулируются цель и задачи исследования, перечисляются подходы и методы решения задач, приводятся результаты, выносимые на защиту, отмечаются их научная новизна и практическая значимость.

Первая глава посвящена анализу современного состояния проблемы группового управления в робототехнике, а также проблеме выбора алгоритма поиска траекторий, близких к оптимальным.

Анализ современного состояния проблемы группового управления в робототехнике показал, что данная проблема является актуальной. Более того, в связи с ускоренным развитием промышленной микроэлектроники, появилась возможность миниатюризации робототехнических комплексов (РТК) и, соответственно, создания групп мини- и микророботов большой численности. Такие группы расширяют возможности РТК как в плане надежности и живучести, так и в скорости выполнения задач, а также значительно упрощают техническое обслуживание таких систем. Тем не менее, несмотря на очевидные преимущества РТК подобного типа, на текущем этапе проблема эффективного управления группой в условиях ограниченных вычислительных ресурсов агентов не решена.

Далее проводится анализ известных способов решения задачи планирования траектории для МР. Формально для методик, применение которых связано с дискретизацией рабочего пространства, требования к полученной траектории представляются в виде следующих условий:

$$\begin{cases} S \cap obst, \\ T \rightarrow min, \\ |S| \rightarrow min, \end{cases}$$

где $C = \{c_{00} \dots c_{mn}\}$ – множество, содержащее индексы (c) ячеек дискретного рабочего пространства, $obst$ – множество, содержащее индексы ячеек, занятых препятствиями ($obst \subset C$), S – множество, содержащее индексы ячеек, составляющих конечную траекторию ($S \subset C$) и T – время расчета траектории.

Результаты анализа существующих подходов представлены в виде достоинств и недостатков алгоритмов, полученных применением следующих критериев оценки:

1. Возможность формирования траекторий, близких к оптимальным (т.е. кратчайших или близких к кратчайшим, при заданной конфигурации рабочей зоны, $|S| \rightarrow \min$).

2. Минимизация затрат аппаратных, энергетических ресурсов МР ($T \rightarrow \min$).

3. Простота формализации задачи планирования (т.е. простота математического представления конфигурации рабочей зоны).

4. Быстродействие алгоритма и высокое качество траектории в условиях сложной конфигурации рабочего пространства (при наличии большого количества препятствий или препятствий сложной формы, $T \rightarrow \min$).

5. Возможность применения для планирования траекторий движения группы МР.

Проведенный сравнительный анализ различных алгоритмов планирования траекторий показал, что интеллектуальные алгоритмы (эволюционные, нечеткая логика, нейросетевые) имеют ряд ключевых преимуществ перед классическими подходами, а именно: простая форма задания исходных параметров для задачи планирования (достаточно корректно определить набор входных данных: сигналы нечеткого регулятора, генотипы, весовые коэффициенты НС и т.п.), умеренное расходование аппаратных ресурсов МР, высокая производительность и быстродействие.

Рассмотрена актуальность применения нейротехнологий в технических сферах деятельности, в том числе актуальность применения рекуррентных НС (как наиболее близких к биологическим НС) для решения задач в сложных динамических процессах, в частности, для решения одной из базовых задач робототехники – задачи поиска траектории, близкой к оптимальной.

Проведенный анализ интеллектуальных алгоритмов планирования выявил, что нейросетевой алгоритм планирования на базе рекуррентной НС Хопфилда («метод нейронных карт») наиболее полно соответствует последнему критерию, определяющему эффективность применения данного алгоритма для построения маршрутов группы МР. Данное преимущество определяется рядом ключевых особенностей нейросетевого подхода:

– оперируя значениями конечной матрицы состояний, возможно формирование траекторий, близких к оптимальным, с учетом взвешенных областей, а также построение неконфликтных маршрутов и гибких правил взаимодействия для групп МР;

– за счет неизменности архитектуры НС у всех агентов для их общего рабочего пространства значительно снижается сложность вычислительной задачи для каждого из участников группы;

– способность НС к быстрой параллельной обработке большого массива данных позволяет как всей группе, так и отдельным ее участникам оперативно

реагировать на динамически изменяющиеся события с учетом правил взаимодействия в коллективе.

На основе проведенного анализа формулируются цель и задачи исследования.

Во второй главе проводится анализ системы планирования траекторий на базе НС Хопфилда для одного МР, а также описание принципа работы основных функциональных блоков. На базе данной системы разрабатываются подходы к реализации системы планирования для группы МР, производится выбор основного подхода для дальнейших исследований. Также в этой главе описывается методика применения технологий параллельных вычислений для реализации программной части системы.

Система планирования траектории базируется на двух главных компонентах: НС Хопфилда и конструктор пути (КП) (рис. 1).

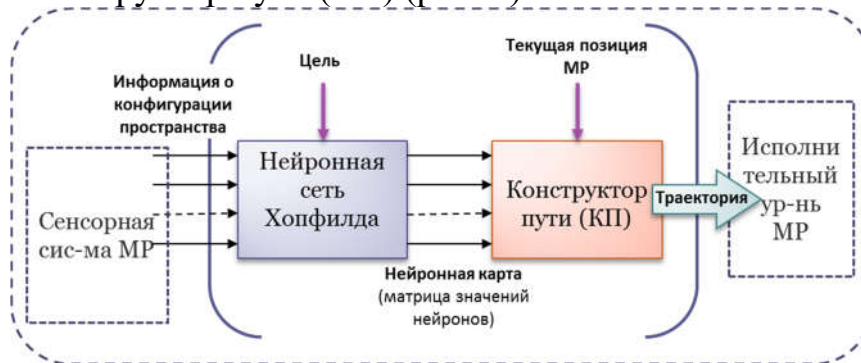


Рис. 1 – Архитектура системы планирования траектории на основе нейронной карты

Система работает следующим образом: координаты цели, а также информация об окружающей среде с сенсорной системы поступают на вход НС Хопфилда. В результате энергетических взаимодействий нейроны сети активируются и входят в состояние равновесия, т.е. дают на выходе постоянный по времени (устойчивый) сигнал. Устойчивые значения энергии нейронов на данной нейронной области формируют «нейронную карту» (матрицу состояния нейронов), которая подается на вход блока конструктора пути, формирующего, в свою очередь, конечную траекторию.

Энергетические взаимодействия нейронов сети обусловлены особой структурной организацией связей между нейронами (топология сети), а также конфигурацией окружающего пространства и координатами цели, которая является точкой активации.

В рассматриваемой НС Хопфилда (с n нейронами) нейроны размещены в ортогональной d -размерной решетке, равномерно распределенной по заданному пространству S , где d – размерность S . Таким образом, НС и созданная нейронная карта служат дискретным топологическим упорядоченным представлением S . Топология распределения и подключения нейронов в сети может меняться.

Каждый элемент i соответствует подмножеству («домену») C_i заданного

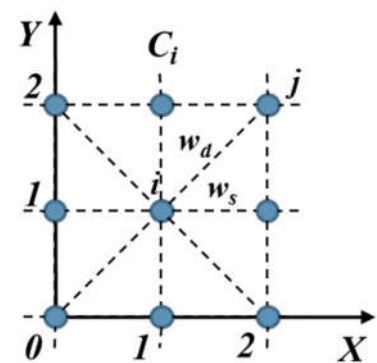


Рис. 2 – Структура «домена» НС Хопфилда

пространства C ; объединение всех ячеек C_i создает полную поверхность C (рис. 2). Таким образом, нейрон i взаимодействует только с соседними нейронами в пределах своего подмножества C_i . Следовательно, каждый нейрон в сети имеет связи лишь в пределах короткого диапазона расстояний (прямые (w_s) или диагональные (w_d) связи) с симметричным распространением активации, при этом весовые коэффициенты в каждом «домене» определяются функцией расстояния (рис. 2):

$$d(i, j) = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} = \sqrt{(1 - 2)^2 + (1 - 2)^2} = \sqrt{2} \approx 1,4142 \rightarrow w_d = \frac{1}{1,4142} w_s = 0,71071 w_s.$$

Блок конструктор пути (КП) циклично выполняет процедуру поиска и перехода по максимальному значению энергии нейрона в матрице состояния НС. Направление перехода на каждом расчетном шаге определяется максимальным градиентом ($grad_{max}$) по направлению от текущего значения нейрона i до соседнего нейрона j :

$$grad(i, j) = (E_j - E_i) w_{ij}, \quad (1)$$

где w_{ij} – весовой коэффициент связи в направлении от i к j ; E_i – величина активации i -го (текущего) нейрона; E_j – величина активации j -го нейрона.

Процесс повторяется для j -го нейрона и так далее вплоть до того, пока не будет найден целевой нейрон с максимальным значением энергии (E_{max}) и построена конечная траектория.

При построении системы расчета траекторий для группы МР в общем рабочем пространстве на КП также возлагается еще одна ключевая функция: разрешение конфликтных ситуаций с учетом приоритетов и соответствующая динамическая корректировка траекторий.

В зависимости от решаемых задач и имеющихся бортовых информационно-вычислительных ресурсов, выделены следующие основные подходы к синтезу системы планирования для группы МР, с учетом реализуемой парадигмы управления:

1) Централизованный – вычислительные операции блоков НС Хопфилда и КП производятся параллельно в центральном вычислительном блоке (ЦБ). ЦБ по имеющейся информации о конфигурации рабочего пространства выполняет формирование нейронных карт для каждого агента, а также расчет траекторий с учетом их скоростей и возможности появления конфликтных ситуаций. Агенты, в свою очередь, лишь принимают по каналам данных управляющие сигналы, в соответствии с которыми приводят в действие исполнительные механизмы, т.е. безальтернативно выполняют команды центра. Обмен информацией (опорными точками рассчитанных траекторий) для разрешения конфликтных ситуаций (возможных столкновений) между агентами происходит через общую область памяти.

2) Гибридный – каждый агент самостоятельно формирует собственную нейронную карту на основе данных с сенсоров, а разрешение конфликтных ситуаций и расчет траекторий производится параллельно с помощью ЦБ. В данной

реализации системы планирования агенты оснащены сенсорной системой и имеют обратную связь с ЦБ.

3) Децентрализованный (или мультиагентный) – каждый агент самостоятельно (на бортовой ВМ) рассчитывает и корректирует траекторию в процессе движения. Разрешение конфликтов осуществляется с помощью выделенного агента-координатора или с помощью взаимного обмена информацией с ближайшим окружением.

В качестве методики распараллеливания вычислительных операций НС и КП для каждого агента выбрана технология многопоточности, позволяющая наиболее эффективно распределять ресурсы внутри ЦБ.

В рамках диссертационного исследования для экспериментальной проверки были выбраны следующие подходы к реализации системы планирования для группы МР:

– централизованный – скорость и надежность передачи данных между потоками реализована за счет разделяемого доступа к общим аппаратным ресурсам ЦБ; отсутствуют особые требования к бортовому оснащению агентов группы. Исходя из указанных особенностей, данный подход позволяет провести экспериментальную проверку алгоритма планирования траекторий и логики разрешения конфликтных ситуаций в группе, исключив возможные ошибки передачи данных при информационном обмене между агентами.

– децентрализованный – исходя из анализа существующих подходов к групповому управлению, является наиболее перспективным. Данный вариант реализации системы позволяет провести экспериментальную проверку алгоритма планирования траекторий в условиях ограниченности вычислительных ресурсов бортового оборудования МР и при наличии динамических препятствий в рабочем пространстве (т.е. в условиях, приближенных к реальным).

В третьей главе строится математическая модель рассматриваемой системы планирования и проводится ее проверка на устойчивость, исследуется нейродинамика НС Хопфилда. На основании полученных результатов осуществляется модификация рассматриваемой модели, позволяющая применять ее для построения неконфликтных траекторий для группы МР в динамически меняющейся среде.

Согласно проведенному анализу математической модели НС Хопфилда, основным критерием оптимизации является минимизация величины T_A – длительности процесса активации НС, которая, исходя из итерационного характера протекания данного процесса (в цифровой реализации НС), может быть выражена следующей формулой:

$$T_A = t_c \cdot n, \quad (2)$$

где t_c – средняя длительность одного цикла активации (время вычисления $\Phi(u)$ на каждом этапе); n – количество итераций (циклов).

Для ускорения процедуры планирования применены следующие модификации метода:

1) Заменена функция активации нейронов НС Хопфилда ($\Phi(u_i)$) на линейную передаточную функцию с насыщением.

$$\Phi(u_i) = th(u_i) = \frac{e^{2u_i} - 1}{e^{2u_i} + 1} \rightarrow \Phi(u_i) = \begin{cases} 0, & \text{если } u_i \leq 0, \\ u_i, & \text{если } 0 < u_i \leq 1, \\ 1, & \text{если } u_i > 1. \end{cases}$$

Данная модификация позволила сократить время входа НС в состояние равновесия в 2,5 раза, а также снизить риски возникновения локальных максимумов.

2) Изменено условие сходимости сети – нейронная карта считается сформированной, если нейрон на стартовой позиции имеет ненулевой сигнал (E_i):

$$\vec{E}_{in} = \begin{cases} \vec{E}_{in}(0) = \vec{0}, & \text{если } n = 0 \wedge E_i = 0, \\ \vec{E}_{in}(n) = NET(\vec{E}_{in}(n-1)), & \text{если } n > 0 \wedge E_i = 0, \\ \vec{E}_{in}(n) = \vec{E}_{out}, & \text{если } n > 0 \wedge E_i > 0. \end{cases}$$

Данная модификация позволила минимизировать количество итераций активации НС, необходимых для формирования нейронной карты $n \rightarrow \min$ и сократить их количество в 1,3-3 раз в зависимости от конфигурации рабочего пространства.

3) Упрощена весовая функция сети, что позволило сэкономить вычислительные ресурсы (память) при вычислении суммарного входного сигнала для каждого нейрона сети (u_i):

$$u_i = \frac{\begin{bmatrix} u_{n-1,m-1} \cdot w_d + u_{n-1,m} \cdot w_s + u_{n-1,m+1} \cdot w_d + \\ u_{n,m-1} \cdot w_d + u_{n,m+1} \cdot w_d + \\ u_{n+1,m-1} \cdot w_d + u_{n+1,m} \cdot w_s + u_{n+1,m+1} \cdot w_d \end{bmatrix}}{w_d + w_s + w_d + w_s + w_d + w_s + w_d + w_s}$$

В данной главе также представлены результаты математического моделирования, подтверждающие эффективность модифицированной НС Хопфилда, в том числе и сравнительное моделирование с классическим алгоритмом планирования A^* .

При работе в условиях информационной недостаточности система планирования строит траекторию, исходя из имеющихся данных о конфигурации рабочего пространства. Если во время движения сенсорная система агента обнаруживает препятствие на заданной изначально траектории, то возможно применение 2-х основных алгоритмов динамической корректировки траектории:

1) Формирование новой нейронной карты с учетом обнуления сигналов нейронов, соответствующих позициям обнаруженных препятствий, и коррекция траектории от текущего местоположения агента.

2) Частичная коррекция карты, которая происходит при обнулении значений сигналов нейронов, соответствующих позициям обнаруженных препятствий, в существующей нейронной карте. Далее измененная матрица состояния нейронов вновь подается на вход НС n количество раз. Значение n зависит от того, какую «плавность» обхода препятствия необходимо получить.

Выбор алгоритма коррекции определяется быстродействием бортовых вычислительных систем МР (или ЦБ) и чувствительностью сенсорных систем.

Четвертая глава посвящена экспериментальной проверке разработанных алгоритмов планирования траектории с учетом различных подходов к групповому управлению. Также в данной главе проведен анализ эффективности и

вычислительной сложности разработанного алгоритма планирования траекторий для группы МР.

Для программного моделирования алгоритма планирования траекторий для группы МР разработано программное обеспечение (ПО) на языке *Python* (*CPython*) версии 3. Особенностью данного ПО является использование библиотеки *multiprocessing* для эффективной организации параллельных вычислений с общим доступом к разделяемой памяти. Взаимодействие каждого вычислительного потока (содержащего программные сущности НС Хопфилда→КП) с общей областью памяти обусловлено необходимостью получения данных о текущем местоположении других агентов, а также информации о следующем расчетном шаге каждого агента для проверки корректности и бесконфликтности формируемой траектории (рис. 3). Информационное взаимодействие программных модулей организовано через хранимый в памяти двумерный массив *shared_paths* размерностью $3 \times i$ (где i – количество агентов).

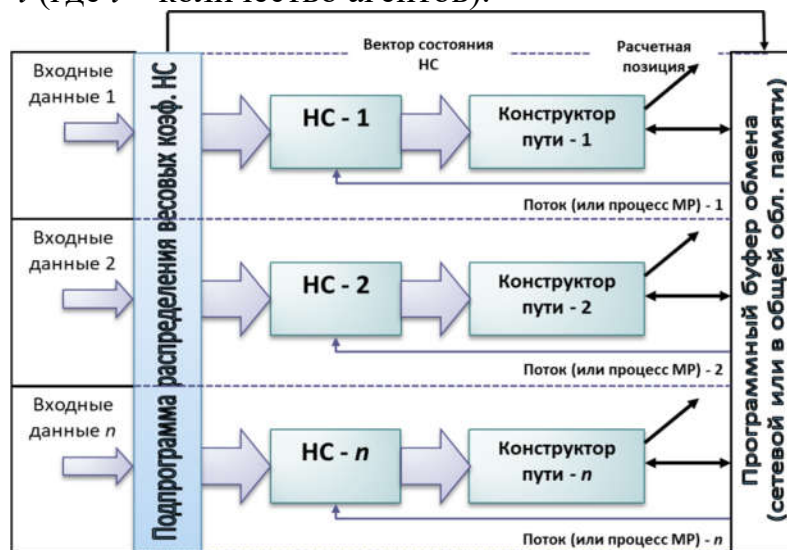


Рис. 3 – Архитектура ПО системы планирования

Для эффективного разрешения конфликтных ситуаций, а также для сокращения общего времени решения задачи перемещения каждому агенту назначается свой приоритет (P), причем значение приоритета в простейшем варианте может быть обратно пропорционально скорости агента.

Так как используется ортогональный вариант дискретизации рабочего пространства, то возможно возникновение следующих типовых конфликтных ситуаций между агентами (рис. 4).

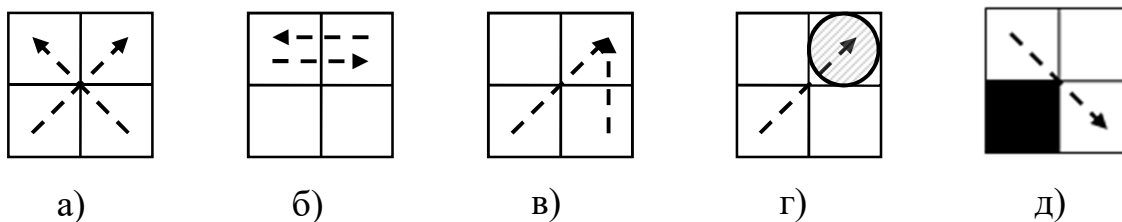


Рис. 4 – Виды конфликтных ситуаций: а) перекрестное пересечение траекторий; б) встречное пересечение траекторий; в) совпадение расчетных позиций; г) проход через «устойчивую» позицию другого агента; д) небезопасный диагональный обход препятствия

В ходе экспериментальной проверки корректности работы системы было установлено, что в сложных рабочих пространствах меньшая длина полученной траектории не всегда гарантирует перемещение робота в заданную точку рабочего пространства за наименьшее время, т.к. при построении траектории не учитывается, что роботу при смене направления движения (повороте) необходимо определенное время. Для учета данного условия в программной части системы планирования была реализована дополнительная функция контроля текущего направления движения («сглаживание» траектории), суть которой состоит в том, что при расчете каждого следующего шага робот будет считать свое текущее направление более приоритетным (рис. 5).

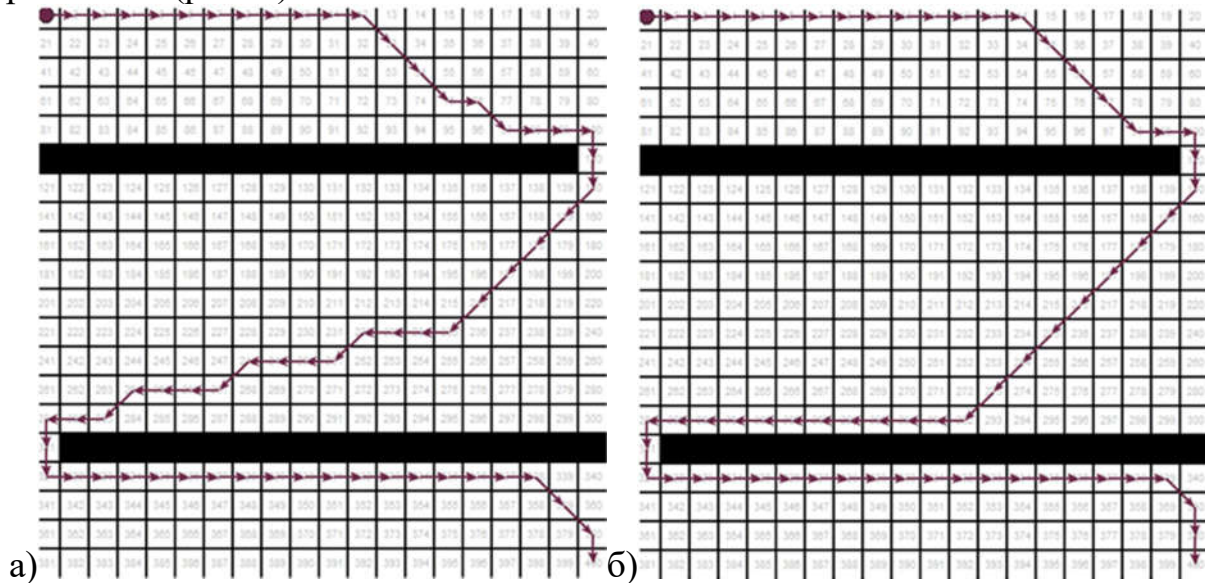


Рис. 5 – Форма траектории: а) сглаживание выключено (время решения: 44,5 с.); б) сглаживание включено (время решения: 42,9 с.)

Данное условие выполняется путем вычисления градиента по текущему направлению по следующей формуле (в соответствии с (1)):

$$\text{grad}(i,j)_{\text{cur}} = (E_j - E_i) \cdot (w_{ij} \cdot \sqrt{2}).$$

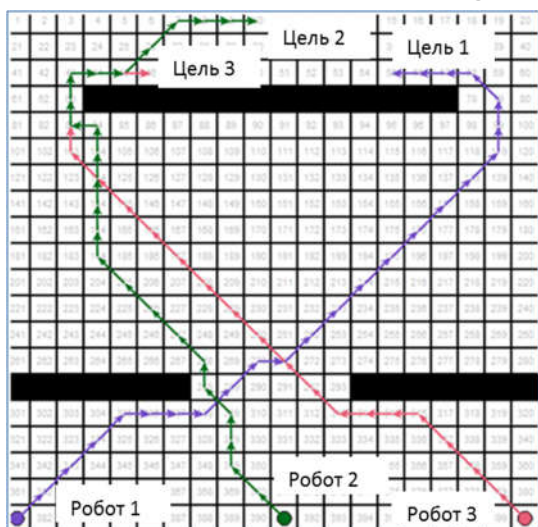


Рис. 6 – Результат программного моделирования

Применение функции сглаживания значительно сокращает количество поворотов робота, что, в конечном итоге, позволяет получить выигрыш по времени в 5-10%, несмотря на неизменную, или даже чуть большую, длину проложенного маршрута, а также положительно сказывается на проходимости МР и уменьшает износ механических частей шасси.

Анализ результатов моделирования показал, что предлагаемая система корректно генерирует бесконфликтные маршруты для группы роботов с учетом препятствий (рис. 6, табл. 1).

Таблица 1 – Выходные данные ПО системы планирования по рис. 6

| Агент | Скорость | Приоритет | Время (с) |
|-------|----------|-----------|-----------|
| 1 | 2 | 1 | 18,79 |
| 2 | 1 | 3 | 35,6 |
| 3 | 2 | 2 | 17,85 |

Для экспериментальной проверки полученных результатов был разработан испытательный полунатурный стенд на основе централизованного подхода при реализации системы планирования.

В качестве аппаратной базы для ЦБ системы планирования используется платформа *Intel NUC*. Агент представляет собой МР с модульной конструкцией на базе *ATmega32*. Для передачи сигнала роботу с системы управления используются инфракрасный передатчик, реализованный на базе микроконтроллера *ATmega88*, и преобразователь интерфейсов *USB-UART FT232*. Команда с компьютера обрабатывается микроконтроллером, который формирует пакет ШИМ-сигналов для инфракрасного приемника на МР (рис. 7).



Рис. 7 – Структурная схема экспериментального стенда

В ходе выполнения исследовательской программы (грант РФФИ № 16-29-04165-офи_м) для проверки алгоритмов коллективного взаимодействия между агентами была создана группа МР на основе платформы *Raspberry Pi 3* с интегрированной системой планирования траекторий в неизвестной среде на базе НС Хопфилда. Для компенсации информационной недостаточности о состоянии роботов (начальная и текущая позиция, угол поворота), а также автоматизации ввода начальных данных в группе был выделен координатор – отдельная платформа *Raspberry* с подключенной видеокамерой и программным модулем идентификации агентов по светодиодной подсветке (рис. 8). Координатор осуществляет информационный обмен между агентами и оператором, а также предоставляет полученную через СТЗ информацию оператору по беспроводному каналу связи (*Wi-Fi*) в реальном времени.



Рис. 8. – Видео-идентификация МР

С помощью данного испытательного стенда была успешно проверена рассмотренная во второй главе децентрализованная (мультиагентная) система планирования на базе НС Хопфилда.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в работе и выносимые на защиту:

1) Проведен анализ основных подходов к управлению группой МР, исследован вопрос эффективности различных алгоритмов планирования для решения проблемы позиционирования группы МР. На основе результатов проведенного анализа разработаны методическое и программно-аппаратное обеспечение системы планирования траекторий для группы МР на базе НС Хопфилда, использующие технологии мультипоточных и распределенных вычислений с учетом специфики программно-аппаратного базиса.

2) На основе экспериментального исследования нейродинамики НС Хопфилда проведена модификация математической модели сети, в частности: заменена функция активации нейронов, изменено условие сходимости сети. Программное моделирование системы планирования траектории для одного робота-агента с использованием модифицированной НС Хопфилда показало, что проведенные модификации позволили минимизировать время, необходимое для формирования нейронной карты.

3) Разработаны архитектура и алгоритмы работы системы планирования, учитывающие особенности перемещения агента группы МР в условиях динамически меняющегося рабочего пространства и информационной недостаточности.

4) Предложена методика синтеза системы планирования траекторий для группы МР на основе универсальной программной модели, которая обеспечивает построение траекторий перемещения с учетом заданных правил неконфликтного взаимодействия агентов в ортогональном дискретном рабочем пространстве. Также на основании данных правил взаимодействия получена методика синтеза траекторий МР, позволяющая получить выигрыш по времени движения до 10%.

5) Проведено экспериментальное моделирование модифицированной НС Хопфилда, в результате которого было установлено, что средняя длительность одного цикла активации сократилась до 1,5–2,5 раз, а количество циклов, необходимых для формирования нейронной карты, уменьшилось в 1,3–3 раз (в зависимости от конфигурации рабочего пространства). Также создан экспериментальный стенд, на базе которого проведен анализ эффективности предложенных методов оптимизации нейросетевой системы планирования, алгоритмов и методик. Получены результаты экспериментальной проверки системы планирования при функционировании группы МР, реализующей централизованный и децентрализованный подходы к управлению, на основании которых можно сделать вывод о том, что предлагаемая архитектура системы планирования, методы и алгоритмы расчета траекторий, и, в частности, логика выхода из конфликтных ситуаций и обхода препятствий, работают корректно.

Созданная в ходе работы нейросетевая система планирования имеет перспективы дальнейшего развития, а разработанные инженерные методики позволяют построить подобные системы практически для любых программно-аппаратных платформ бортовых информационно-управляющих систем МР. Характерной особенностью предлагаемого решения является его специализация для группового применения роботов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из списка ВАК:

1. Юдинцев Б.С. Интеллектуальная система планирования траекторий мобильных роботов, построенная на сети Хопфилда / Б.С. Юдинцев, О.В. Даринцев // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4. – С. 1-11.
2. Юдинцев Б.С. Модификация нейросетевой системы планирования траектории: методики и результаты / Б.С. Юдинцев, О.В. Даринцев // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11. – С. 2630-2635.
3. Юдинцев Б.С. Технологии расширенной и виртуальной реальностей как средства компенсации информационной недостаточности микророботов / А.Ю. Алексеев, Б.С. Юдинцев, О.В. Даринцев // Мехатроника, Автоматизация, Управление. – 2015. – № 6. – С. 2630-2635.
4. Юдинцев Б.С. Синтез нейросетевой системы планирования траекторий для группы мобильных роботов / Б.С. Юдинцев // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 4. – С. 163-186.

В изданиях, входящих в системы цитирования SCOPUS и Web of Science:

5. Yudinsev B.S., Alekseev A.Yu., Bogdanov D.R., Migranov A.B., Darintsev O. V. Methods of a Heterogeneous Multi-agent Robotic System Group Control // Proceedings of the 13th International Symposium “Intelligent Systems 2018” (INTELS’18). – St. Petersburg, 2019. – С. 687-694. doi: 10.1016/j.procs.2019.02.032.

Свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ:

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018612158. Программа для планирования траекторий для группы мобильных роботов, осуществляющих движение в общем двумерном рабочем пространстве с препятствиями / Юдинцев Б.С. М.: Роспатент, 13.02.2018.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018612793. Программа для тестирования алгоритмов планирования траекторий мобильных роботов / Юдинцев Б.С. М.: Роспатент, 27.02.2018.

В других изданиях:

8. Юдинцев Б.С. Планирование траектории с использованием нейронных карт // XVIII Туполевские чтения, Материалы международной молодежной научной конференции. – Казань, 2010. – С. 639-641.
9. Юдинцев Б.С. Разработка алгоритма планирования траекторий для группы роботов на базе рекуррентной нейронной сети // Мавлютовские чтения. – Уфа, 2010. – С. 215-216.
10. Даринцев О.В., Мигранов А.Б., Юдинцев Б.С. Интеллектуальное планирование траекторий для группы роботов на базе рекуррентной нейронной сети // Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы (ИИ-2010): материалы Междунар. науч.-техн. конфер. – Донецк, 2010. – С. 223-227.
11. Мигранов А.Б., Юдинцев Б.С., Даринцев О.В. Ультразвуковая сенсорная

система для реализации интеллектуального управления движением группы мобильных роботов // Труды Института механики Уфимского научного центра РАН. – Уфа, 2010. – С. 109-117.

12. Юдинцев Б.С. Оптимизация методов планирования траекторий групп мобильных роботов с использованием нейронной карты // Мавлютовские чтения. – Уфа, 2011. – Т. 3. – С. 188-189.

13. Юдинцев Б.С. Нейросетевой алгоритм планирования траекторий для группы мобильных роботов / Б.С. Юдинцев, О.В. Даринцев, А.Б. Мигранов, // «Искусственный интеллект». ІІІІ МОН і НАН України «Наука і Освіта». – 2011. – № 1. – С. 154-160.

14. Юдинцев Б.С. Интеллектуальная система построения неконфликтных траекторий для коллектива мобильных роботов // Управление большими системами. – Уфа, 2013. – Т. 3. – С. 326-329.

15. Даринцев О.В., Юдинцев Б.С. Экспериментальные исследования эффективности нейросетевой системы планирования траекторий для коллектива мини (микро) роботов // Proceedings of the 2nd International Conference “Information Technologies for Intelligent Decision Making Support” and the Intended International Workshop “Robots and Robotic Systems”. – Ufa, 2014. – Т. 3. – С. 274-278.

16. Даринцев О.В., Юдинцев Б.С., Алексеев А.Ю. Архитектура системы управления коллективом роботов на базе облачных технологий // Материалы 10-й Всероссийской мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2017). – Ростов-на-Дону, 2017. – Т. 3. – С. 169-171.

17. Юдинцев Б.С., Алексеев А.Ю. Синтез распределенной системы управления группой мобильных роботов // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. – Уфа, 2017. – Т. 12., № 2. – С. 199-205.

18. Даринцев О.В., Мигранов А.Б., Богданов Д.Р., Юдинцев Б.С. Аппаратно-программное обеспечение распределенной системы управления мобильными робототехническими платформами коллективного использования // Материалы Международной научно-практической конференции «Прогресс транспортных средств и систем – 2018» – Волгоград, 2018 – С. 18-19.

19. Юдинцев Б.С., Алексеев А.Ю., Даринцев О.В. Структура и программное обеспечение испытательного стенда для отработки коллективных задач роботами // XII мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2019): материалы XII мультиконференции: в 4-х т. – Ростов-на-Дону, 2019. – Т. 2. – С. 223-225.

Соискатель



Б. С. Юдинцев

ЮДИНЦЕВ Богдан Сергеевич

**НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ
ДЛЯ ГРУППЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ**

Специальность:

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(информационные и технические системы)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано в печать _____ г. Формат 60×84 1/16
Бумага офсетная. Печать ризографическая. Гарнитура «TimesNewRoman».

Усл. печ. л. ____ . Уч.-изд. л. ____ .

Тираж ____ экз. Заказ № ____ .

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»

Редакционно-издательский комплекс УГАТУ
450008, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12