

На правах рукописи

Доценко Антон Викторович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ДЛЯ СИНТЕЗА
УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность 05.13.01 — Системный анализ, управление и обработка информации (в технических системах)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва — 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов» (РУДН).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Дивеев Асхат Ибрагимович

Официальные оппоненты: **Карпенко Анатолий Павлович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
МГТУ им. Н. Э. Баумана,
Заведующий кафедрой “Системы автоматизированного проектирования”

Никольчев Евгений Витальевич,
доктор технических наук, профессор,
НОУ ВО МТИ,
Проректор по научной работе

Ведущая организация: **Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН)**

Защита состоится 01 июня 2021 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при МГТУ им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1, МГТУ им. Н. Э. Баумана.

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

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1, МГТУ им. Н. Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.02.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.02
кандидат технических наук, доцент

_____ Муратов И. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Основным препятствием на пути создания систем управления группой динамических объектов является проблема разрешения коллизий, или обеспечение отсутствия столкновений между объектами группы. Существующие подходы избегания столкновений можно разделить на два класса. Подходы, относящиеся к первому классу, осуществляют поиск управлений в реальном времени. К таким подходам относятся, например, независимые планировщики маршрутов и методы предикторного управления. Эти подходы подразумевают необходимость прогнозирования будущего столкновения сближающихся объектов и вычисление оптимальных управлений, регулирующих скорости этих объектов. Методы регулирования скоростей, основанные на решении задачи линейного программирования, подразумевают наличие высокоточных данных, считываемых с датчиков и сенсоров. Другим минусом этих методов является чувствительность к многочисленным параметрам алгоритма. В реальных условиях планировщики маршрутов являются ненадежными по той причине, что найденное управление не замкнуто обратной связью по состоянию. При воздействии возмущений найденный маршрут уже не будет являться оптимальным.

Во втором классе набор операций по разрешению коллизий встроен в систему управления до ее эксплуатации. К этому классу можно отнести методы на основе полей потенциалов, совместные планировщики маршрутов и управление с назначением приоритетов.

Подходы, осуществляющие поиск корректирующего управления объектами в реальном времени, зачастую неспособны найти оптимальное управление за отведенное время. Для этого в системе управления могут предусматривать возможность резкой остановки объектов. Добавление жестко запрограммированных условных операторов, в свою очередь, усложняет систему управления. Более того, поиск управлений, проводимый в реальном времени, не может не сказываться негативно на критерии оптимизации.

Существующие во втором классе подходы также не лишены изъянов. Методы на основе полей потенциалов приводят к колебательному движению динамических объектов при их близком расположении с препятствиями. Планировщики маршрутов, осуществляющие поиск управлений для всех объектов группы в совместном конфигурационном пространстве, способны находить оптимальные маршруты для небольших групп, однако этот подход неприменим в случае больших групп из-за проклятия размерности. Способ назначения приоритетов при одноименном подходе оказывает существенное влияние на критерий оптимизации. Существует множество способов назначения приоритетов, но несмотря на это, некоторые исследователи в своих работах осуществляют назначение приоритетов эвристическим путем.

Наличие множества различных методов, посвященных управлению группой динамических объектов и задаче разрешения коллизий, свидетельствует о

том, что для данной проблемы не существует универсального решения. Не существует легко масштабируемого, универсального подхода по созданию систем управления группой динамических объектов, в котором можно было бы использовать произвольную математическую модель объектов управления, задаваемую в виде дифференциальных уравнений. Проблема является важной и нерешенной, что определяет ее актуальность.

В отличие от существующих подходов, в настоящем диссертационном исследовании рассматриваются новые методы и алгоритмы создания адаптивной масштабируемой системы децентрализованного управления группой динамических объектов, которая способна обеспечивать отсутствие столкновений объектов независимо от их начальных и терминальных состояний. Методы и алгоритмы структурного и параметрического синтеза подразумевают полностью автоматический процесс создания системы управления. Более того, в работе предлагается новая парадигма принятия решений объектами управления, которая основывается на вероятностном отображении состояния в управляющее воздействие.

В диссертации задача управления группой динамических объектов рассматривается и решается в постановке задачи синтеза системы управления. Задана группа динамических объектов (более 3-х). Заданы их начальные состояния, критерий качества и ограничения на управления. В процессе эксплуатации каждому объекту задается терминальное состояние. Необходимо найти управление с учетом ограничений, которое переместит объекты из начальных состояний в терминальные с оптимальным значением критерия качества.

В диссертации представлена система управления группой объектов на основе модифицированного метода сетевого оператора. Особенностью данного подхода является ситуативное изменение вектора аргументов искомой функции управления. Вектор аргументов функции управления включает информацию о состоянии рассматриваемого объекта управления, если в его локальной окрестности нет других объектов. В противном случае, в вектор аргументов функции управления объектом добавляется информация о состоянии ближайшего объекта-помехи. Если в области видимости объекта управления находится несколько равноудаленных объектов, то может быть выбрано состояние любого из них.

В исследовании также представлена двухконтурная нейросетевая система управления группой динамических объектов. В ее основе лежат два нейросетевых контура управления: первый представляет систему стабилизации, осуществляющую управление объектом, при отсутствии в его локальной окрестности других объектов, второй – систему разрешения коллизий, которая осуществляет управление объектом с учетом состояния ближайшего объекта-помехи.

Для получения системы стабилизации проводится аппроксимация нейронной сетью (НС) замкнутой функции управления на множестве синтезированных данных. На первом шаге решается задача оптимального управления на конечном

множестве начальных условий. В качестве критерия оптимальности управления используется функционал интегрального типа с аддитивной сверткой двух компонент – отклонения текущего состояния от терминального (терминальная невязка) и времени достижения объектом терминального состояния. Результатом решения задачи оптимального управления на конечном множестве начальных условий является обучающее множество, состоящее из пар отображений «невязка – управление».

На втором шаге многослойный персептрон аппроксимирует функцию управления по размеченной базе данных, где в качестве критерия оптимальности выступает квадратичная функция ошибки. В ходе обучения методом обратного распространения ошибки получаем нейронную сеть, реализующую замкнутую функцию управления и доставляющую объект из любого начального состояния в любое терминальное состояние. Полученная система стабилизации успешно справляется с задачей в условиях воздействия на объект управления внешних возмущений.

В рамках данного подхода поиск оптимальных весовых коэффициентов НС не требует вмешательства опытного оператора, что характерно для полуаналитических методов синтеза на основе ПИД-регуляторов, методов АКОР, АКАР и бэкстеппинга. Пользователю необходимо задать математическую модель объекта управления, параметры генетического алгоритма для синтеза обучающего множества, архитектуру и параметры нейронной сети.

Нейросетевая система разрешения коллизий осуществляет управление динамическим объектом в случае нахождения объектов-помех в его локальной окрестности. Ее синтез проводится в парадигме обучения без учителя. На вход системы разрешения коллизий, которую реализует многослойный персептрон, подается терминальная невязка, отклонение состояния рассматриваемого объекта от текущего состояния объекта-помехи (невязка взаимодействия) и невязка взаимодействия в предшествующий момент времени. Необходимость учета невязки взаимодействия в разные моменты времени обусловлена тем, что объекты в группе не могут обмениваться информацией и, следовательно, не могут располагать информацией об углах поворотов других объектов. Также как в системе стабилизации, выходом персептрона является управление.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы для решения задач синтеза управления, в том числе группой динамических объектов.

Объект исследования: система управления группой динамических объектов.

Целью исследования являются методы и алгоритмы для решения задач синтеза универсальной системы разрешения коллизий.

Задачи исследования:

1. Провести аналитический обзор методов и алгоритмов для управления группой динамических объектов с учетом решения задачи избегания коллизий;

2. Исследовать методы символьной регрессии для решения задачи синтеза системы управления группой динамических объектов;
3. Исследовать аппарат нейронных сетей для решения задач синтеза системы управления группой динамических объектов;
4. Разработать методы и алгоритмы для структурно-параметрического синтеза адаптивного блока управления, обеспечивающего универсальное решение задачи разрешения коллизий для двух динамических объектов;
5. Разработать программный комплекс для решения задач структурно-параметрического синтеза и моделирования функционирования группы динамических объектов;
6. Провести вычислительный эксперимент с целью исследования эффективности применения универсального блока разрешения коллизий в системе управления группой мобильных роботов;
7. Разработать метод интеллектуального принятия решения на основе применения искусственных нейронных сетей в задаче избегания столкновений, наделяющий управляющие воздействия вероятностями, зависящими от состояния сблизившихся объектов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Новый метод разрешения коллизий на основе применения универсального блока разрешения коллизий в системе управления группой динамических объектов;
2. Алгоритмы для решения задачи структурно-параметрического синтеза на основе нового метода символьной регрессии;
3. Алгоритмы для решения задачи параметрического синтеза универсального блока оптимального разрешения коллизий на основе обучения многослойных нейронных сетей;
4. Программный комплекс для решения задач структурно-параметрического синтеза и моделирования функционирования группы динамических объектов;
5. Решение прикладной задачи синтеза системы управления группой динамических объектов, обеспечивающей перестроение из заданных произвольных начальных условий в заданные произвольные терминальные условия за минимальное время с обеспечением отсутствия коллизий;
6. Метод интеллектуального принятия решения на основе применения искусственных нейронных сетей в задаче избегания столкновений.

Научная новизна:

1. Метод разрешения коллизий на основе обучения нейросетевого блока управления;
2. Алгоритмы синтеза универсального блока разрешения коллизий на основе методов символьной регрессии;
3. Алгоритмы синтеза универсального блока разрешения коллизий на основе обучения нейронных сетей;

4. Метод принятия решений на основе нейронной сети, порождающей условное вероятностное распределение управляющих воздействий;
5. Метод синтеза на основе нового метода символьной регрессии, действующий новую структуру данных для кодирования математического выражения;
6. Разработана задача управления группой роботов для оценки эффективности методов разрешения коллизий.

Практическая значимость определяется следующим:

1. Предложенный метод разрешения коллизий на основе использования универсального блока разработан для применения в системе управления любыми динамическими объектами;
2. Алгоритмы реализованы в виде программных модулей на языке программирования Python.

Методы исследования. В качестве метода исследования использовался двухэтапный процесс, основанный на решении оптимизационных задач и оценки полученных результатов при помощи компьютерного моделирования.

Достоверность и обоснованность научных результатов обеспечивается за счет решения прикладных задач с использованием компьютерного моделирования.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

1. 13th International Symposium Intelligent Systems – 2018 (INTELS'18), 23.10.2018, Санкт-Петербург, Россия;
2. The 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2019), 20.06.2019, Сиань, КНР.

Личный вклад автора. Автор принимал активное участие в исследовании. Научные результаты получены автором диссертации лично. Ему удалось решить поставленные задачи и сделать необходимые научно обоснованные выводы.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 печатных изданиях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 3 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 2 — в тезисах докладов. Зарегистрированы 2 программы для ЭВМ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводятся недостатки имеющихся работ по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, определяется предмет исследования, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В первой главе представлена математическая постановка задачи управления группой динамических объектов, приведен аналитический обзор существующих методов решения задачи управления группой динамических объектов и разрешения коллизий.

Задана математическая модель объектов управления гомогенной группы динамических объектов

$$\dot{\mathbf{s}}^i = \mathbf{f}(\mathbf{s}^i, \mathbf{u}^i), \quad (1)$$

где $\mathbf{s}^i = [s_{i,1} \dots s_{i,n}]^T$ – вектор состояния объекта; $\mathbf{s}^i \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{u}^i = [u_{i,1} \dots u_{i,m}]^T$ – вектор управления; $\mathbf{u}^i \in U \subseteq \mathbb{R}^m$, U – ограниченное замкнутое множество, $i = \overline{1, N}$, N – количество динамических объектов в группе.

Заданы множество начальных состояний

$$S_{0,i} = \left\{ \mathbf{s}_{1,i}^{0,i}, \dots, \mathbf{s}_{k_i,i}^{0,i} \right\}, \quad (2)$$

множество терминальных состояний

$$S_{f,i} = \left\{ \mathbf{s}_{1,i}^{f,i}, \dots, \mathbf{s}_{r_i,i}^{f,i} \right\}, \quad (3)$$

где k_i и r_i – количество начальных и терминальных состояний объекта i соответственно. Подвектор $\mathbf{y}^i = [y_{i,1} \dots y_{i,p}]^T$ вектора \mathbf{s}^i определяет местоположение объекта i .

Заданы динамические фазовые ограничения в виде неравенства

$$R^2 - \sum_{c=1}^p (y_{c,i} - y_{c,j})^2 \leq 0, \quad (4)$$

где R – радиус сферы, задающей габариты динамических объектов, $i, j = \{1, \dots, N\}$, $i \neq j$.

Задан функционал качества

$$J = \int_0^{\hat{t}_{f,i}} f_0(\mathbf{s}^1(t), \dots, \mathbf{s}^N(t), \mathbf{u}^1(t), \dots, \mathbf{u}^N(t)) dt \rightarrow \min_{\mathbf{u}^i \in U}, \quad (5)$$

где $\hat{t}_{f,i} = \max\{t_{f,i} : i = \{1, \dots, N\}\}$ – ограниченное время процесса управления, которое может быть задано или определяться по достижению терминальных условий.

Требуется найти адаптивную функцию управления

$$\mathbf{u}^i = \begin{cases} \mathbf{h}(\mathbf{s}^i), & \text{если } R_o^2 - \sum_{c=1}^m (y_{i,c} - y_{j,c})^2 < 0, \\ \mathbf{g}(\mathbf{s}^i, \mathbf{s}^j) & \text{иначе,} \end{cases} \quad (6)$$

переводящую объекты управления в терминальные состояния (3) и удовлетворяющую функционалу качества (5) для всех возможных начальных условий (2) с соблюдением динамических фазовых ограничений (4). Здесь R_o – радиус сферы, задающей локальную область объектов, $\mathbf{h}(\mathbf{s}^i) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, $\mathbf{g}(\mathbf{s}^i, \mathbf{s}^j) : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, $\mathbf{h}(\mathbf{s}^i)$, $\mathbf{g}(\mathbf{s}^i, \mathbf{s}^j) \in U \subseteq \mathbb{R}^m$.

Подставив (6) в (1), получим модель объекта с функцией управления, зависящей от состояния

$$\dot{\mathbf{s}}^i = \begin{cases} \mathbf{f}(\mathbf{s}^i, \mathbf{h}(\mathbf{s}^i)), & \text{если } R_o^2 - \sum_{c=1}^m (y_{i,c} - y_{j,c})^2 < 0, \\ \mathbf{f}(\mathbf{s}^i, \mathbf{g}(\mathbf{s}^i, \mathbf{s}^j)) & \text{иначе.} \end{cases}$$

Избегание коллизий в постановке задачи синтеза системы управления задается как условие соблюдения динамических фазовых ограничений. Фазовые ограничения являются существенной проблемой при решении задачи оптимального управления. Известные подходы, основанные на численном решении задачи оптимального управления с фазовыми ограничениями, вводят дополнительные переменные, нахождение значений которых представляет определенную вычислительную сложность. Более практический способ решения задачи соблюдения фазовых ограничений состоит во включении этих ограничений в виде штрафных функций в функционал качества. Но здесь возникает проблема определения весовых коэффициентов, которые могут существенно исказить значение функционала.

Проблема соблюдения динамических фазовых ограничений возникает в задаче управления группой динамических объектов. Это означает, что нарушение фазовых координат может происходить в любой точке пространства состояний, что существенно усложняет поиск решения поставленной задачи. В работе рассматривается проблема разрешения коллизий для двух динамических объектов, так как столкновение большего количества объектов является частным случаем столкновения пары. Поэтому столкновение $N > 2$ динамических объектов можно представить как совокупность сталкивающихся пар.

Вторая глава посвящена обзору применения искусственных нейронных сетей в задачах управления динамическими объектами. Нейронные сети начали активно применяться для решения практических задач в таких областях, как распознавание образов и машинный перевод. На сегодняшний день важным фактором успешного применения нейронных сетей является наличие размеченного обучающего множества. Развитие интернета привело к росту размеченных данных в области мультимедиа. Современные НС способны генерировать изображения, тексты и взаимодействовать с человеком, однако применение НС в области управления не носит столь утилитарный характер. Основной причиной такого положения дел является специфика задач из области управления и отсутствие размеченных данных.

В **третьей главе** приведены подходы решения задачи синтеза управления группой динамических объектов на основе нейронных сетей и поиска функций управления с использованием нового метода символьной регрессии.

Методы символьной регрессии на сегодняшний день являются одним из немногих инструментов для решения задачи синтеза системы управления. Они способны находить сложные недифференцируемые функции управления в автоматическом режиме.

В диссертации представлен модифицированный метод сетевого оператора, предназначенный для поиска оптимальных функций управления. На базе модифицированного метода сетевого оператора представлен подход, в рамках которого осуществляется поиск функций управления динамическим объектом, адаптирующейся в реальном времени под меняющиеся условия рабочей среды. На основе данного численного метода разработан подход, при котором избегание столкновений между двумя динамическими объектами осуществляется за счет встраивания компонент состояния соседнего объекта-помехи в функцию управления рассматриваемого объекта.

Представлен новый подход к синтезу системы управления с универсальным блоком избегания коллизий на основе обучения НС. Предлагается отдельно синтезировать непрерывную динамическую систему стабилизации и систему разрешения коллизий. Непрерывная динамическая система стабилизации реализована в виде замкнутой функции управления и отвечает за доставку динамических объектов в их терминальные состояния. На рис. 1 представлены траектории движения мобильного робота из начальных условий, не принадлежащих обучающему множеству, в результате использования в качестве системы управления робота синтезированной системы стабилизации.

Из рис. 1 можно сделать вывод, что синтезированная система стабилизации способна доставлять мобильный робот в терминальное состояние при воздействии на компоненты состояния робота возмущений. Стоит отметить, что система стабилизации способна переводить робот в терминальное состояние из любого начального состояния в рамках диапазона обучения.

Универсальная система разрешения коллизий (УСРК) представляет нейросетевую замкнутую функцию управления, которая позволяет объектам реагировать на сближение с помехами таким образом, чтобы объекты уклонялись от столкновений и одновременно продвигались в направлении терминальных состояний. Данная система является универсальной, так как способна разрешать коллизии между динамическими объектами в при любых начальных и терминальных состояниях динамических объектов. Система стабилизации реализована в многослойном перцептроне. В качестве системы избегания коллизий рассматриваются две архитектуры: а) многослойный перцептрон, отображающий входной вектор состояния в выходной вектор управления и б) нейронная сеть, отображающая входной вектор состояния в смешанное вероятностное распределение, где в качестве случайной величины выступает управление (УВСРК).

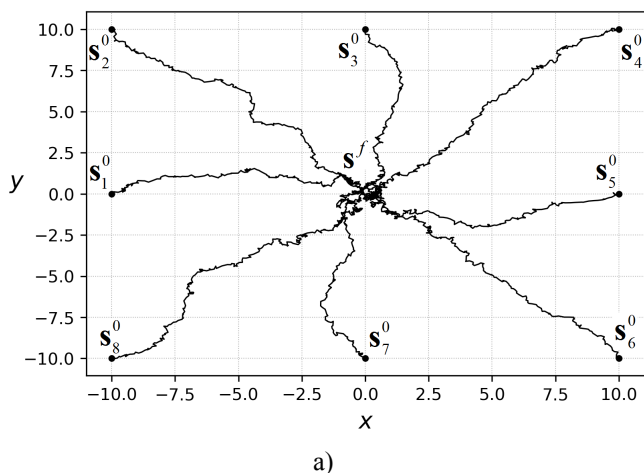


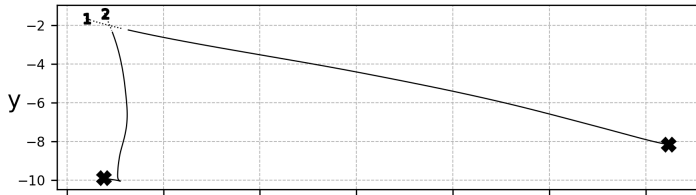
Рис. 1 — Траектории движения мобильного робота из начальных состояний s_k^0 , $k = \overline{1, 8}$ в терминальное состояние s^f при наличии возмущений.

Для синтеза УСРК и УВСРК генерируется множество начальных и конечных условий, при которых динамические объекты сталкиваются или входят в локальную область друг друга, не нарушая динамических фазовых ограничений. На данном множестве производится обучение нейронной сети, реализующей систему разрешения коллизий.

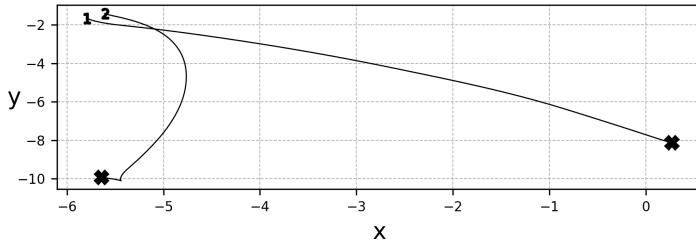
В случае функционирования группы динамических объектов, когда в локальной области рассматриваемого объекта нет объектов-помех, управление осуществляется системой стабилизации. Переключение между двумя системами реализовано в ступенчатой функции: если в локальной области динамического объекта возникает объект-помеха, то управление рассматриваемым объектом передается системе разрешения коллизий. После завершения маневра, если в локальной области объекта не обнаружено других объектов-помех, активируется система стабилизации.

На рис. 2 изображены траектории роботов в случаях: а) применения в качестве системы управления только системы стабилизации и б) применения системы стабилизации в связке с синтезированной УСРК. Как можно видеть из рис. 2, нейронная сеть, реализующая УСРК, произвела успешные маневры со стороны обоих роботов, что в результате позволило им избежать столкновения и одновременно продвинуться в направлении терминальных состояний.

Синтезированные системы управления могут применяться на группе объектов, состоящей из $N > 2$ роботов. На рис. 3 изображена группа мобильных роботов. Цветными окружностями обозначены роботы, черными квадратами — желаемые терминальные состояния.

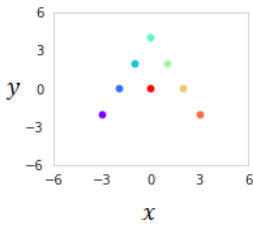


а)

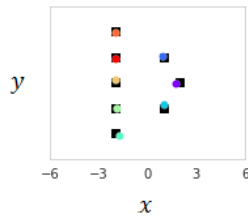


б)

Рис. 2 — Траектории движения роботов: а) без применения УСПК; б) с применением УСПК.



а)



б)

Рис. 3 — Состояние группы роботов: а) начальное; б) конечное.

Из рис. 3 можно сделать вывод, что все роботы попали в терминальные состояния в пределах заданной погрешности ($\epsilon = 0,01$). На рис. 4 изображены промежуточные состояния группы в разные моменты времени. Цветными крестами изображены роботы, которые в рассматриваемый момент времени нарушили фазовые ограничения. Из рис. 4 можно сделать вывод, что группа роботов, использующая УСПК у себя на борту, способна избегать коллизии.

Система избегания коллизий должна учитывать неоднозначные ситуации. Например, роботы могут одинаково оптимально объехать друг друга с разных

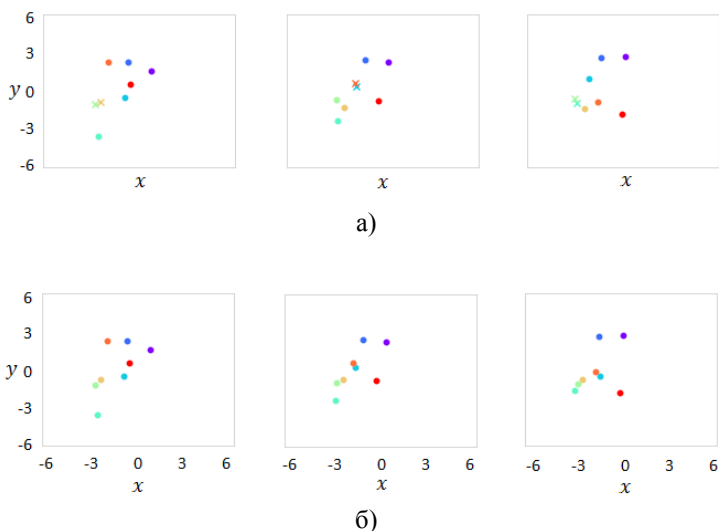


Рис. 4 — Состояние группы роботов в разные моменты времени: а) с применением УСРК; б) без применения УСРК.

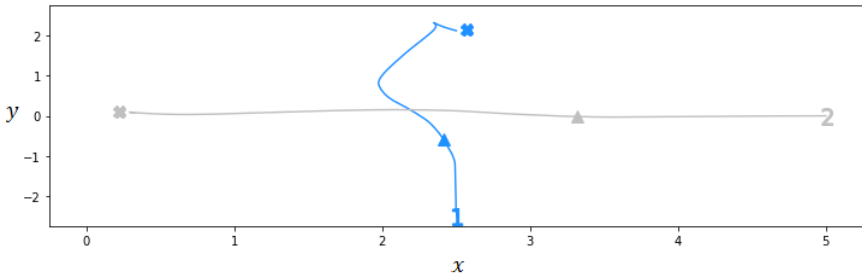
сторон. Для обучения системы управления на данных, в которых присутствует неоднозначное отображение входного вектора в выходной, необходимо моделировать условное вероятностное распределение выходного вектора. Нейронная сеть смешанных плотностей (НССП) способна представлять произвольные статистические распределения, также как персептрон Румельхарта способен представлять произвольные функции.

На рис. 5 изображены траектории роботов, избежавших столкновений при помощи УВСПК на основе НССП. На рис. 6 изображены вероятностные распределения управлений гусеницами роботов в момент времени начала их взаимодействия. Положения роботов, соответствующие данному моменту времени, отмечены на рис. 5 треугольниками.

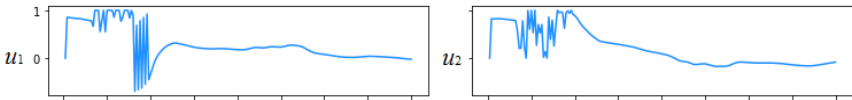
Как видно из рис. 5, робот под номером 1 производит маневр, что позволяет паре избежать столкновений. Из рис. 6 следует, что УВСПК присваивает некоторым диапазонам управления более высокую вероятность.

УВСПК можно поставить на борт каждого робота в группе, состоящей из более чем 2-х объектов. На рис. 7 изображены промежуточные состояния группы мобильных роботов, у которых на борту установлена УВСПК. Начальное и конечное состояния группы полностью идентичны тем, что изображены на рис. 3.

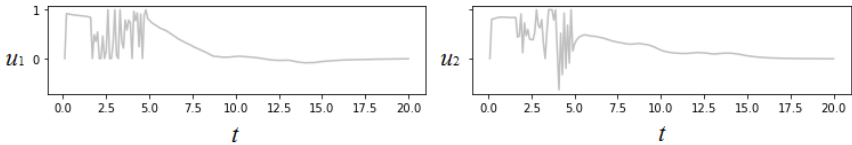
Как видно рис. 7, при высокой концентрации роботов на небольшом участке многие роботы избегают столкновения, в то время как без УВСПК часть



а)



б)



в)

Рис. 5 — Разрешение коллизий с применением УВСРК: а) траектории роботов, управления на гусеницах: б) первого, в) второго робота.

роботов сталкивается. Преимуществом УВСРК является возможность сравнения оптимальности управлений в допустимом диапазоне, а также способность следования разным одинаково оптимальным маршрутам объезда препятствия.

Представленный нейросетевой подход управления группой динамических объектов является децентрализованным: НС, реализующие системы управления, записываются в память объектов, за счет чего обеспечивается их автономность. Во время функционирования группы в каждый момент времени объекты обращаются к системе управления, вектор состояния поступает на вход НС, реализующей замкнутую функцию управления, а на выходе объект получает оптимальное управление.

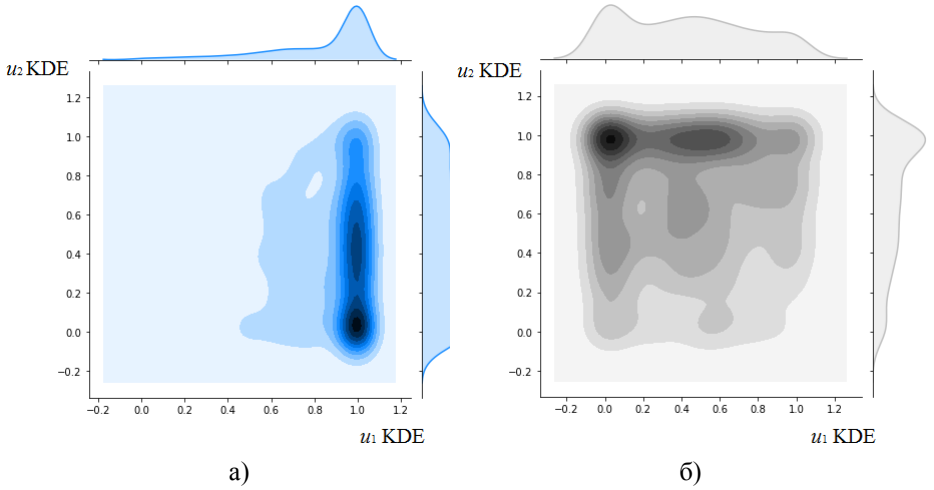


Рис. 6 — Двумерные ядерные оценки плотностей условных вероятностей для векторов управления: а) первым; б) вторым роботом.

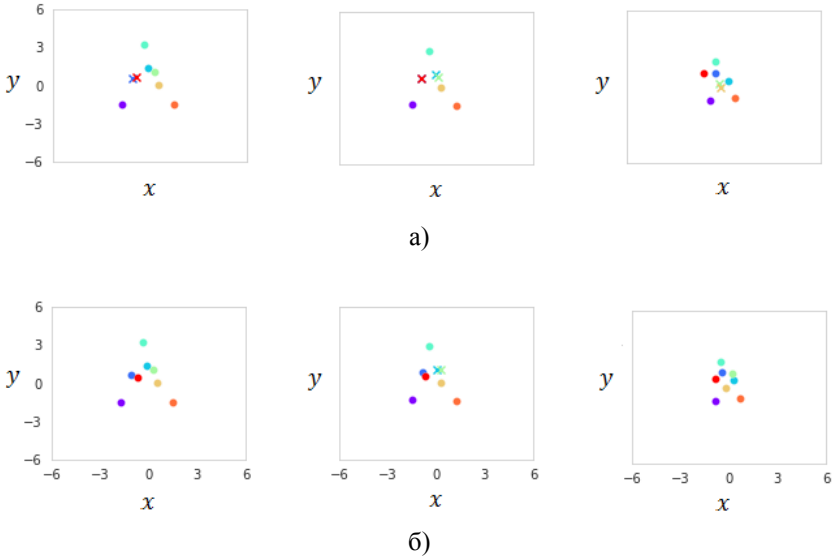


Рис. 7 — Состояние группы роботов в разные моменты времени: а) без применения УВСПК; б) с применением УВСПК.

В **заключении** диссертационной работы даны общие выводы, представлен анализ решения поставленных в диссертации задач и оценка достижения цели диссертации.

Результаты работы и основные выводы. Для достижения поставленных целей в диссертационной работе решены следующие основные задачи:

1. Проведен аналитический обзор методов и алгоритмов для управления группой динамических объектов с учетом решения задачи избегания коллизий;
2. Исследованы методы символьной регрессии для решения задачи синтеза системы управления группой динамических объектов;
3. Исследован аппарат нейронных сетей для решения задач синтеза системы управления группой динамических объектов;
4. Разработаны методы и алгоритмы для структурно-параметрического синтеза адаптивного блока управления, обеспечивающего универсальное решение задачи разрешения коллизий для двух динамических объектов;
5. Разработан программный комплекс для решения задач структурно-параметрического синтеза и моделирования функционирования группы динамических объектов;
6. Проведен вычислительный эксперимент с целью исследования эффективности применения универсального блока разрешения коллизий в системе управления группой мобильных роботов;
7. Разработан метод интеллектуального принятия решения на основе применения искусственных нейронных сетей в задаче избегания столкновений, наделяющий управляющие воздействия вероятностями, зависящими от состояния сблизившихся объектов.

Предложенные в диссертационной работе подходы коллективного управления, а также методы избегания коллизий учитывают недостатки существующих на сегодняшний день аналитических и численных методов. Система управления, созданная на базе решения задач синтеза, позволяет динамическим объектам не проводить вычислений, направленных на поиск оптимального управления в реальном времени. Динамические объекты могут достигать терминальных состояний и одновременно избегать коллизии благодаря двум обученным нейронным сетям, которые ставятся на борт каждого объекта. Децентрализованный характер рассмотренной системы управления позволяет каждому объекту свести вычисления, проводимые в реальном времени, до процедуры определения ближайшего объекта-помехи. При этом алгоритмическая сложность данной процедуры в худшем случае составляет $O(N)$.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

1. *Доценко А. В.* Разрешение коллизий в задаче группового взаимодействия мобильных роботов с изменением набора аргументов функции управления /

- А. В. Доценко, А. И. Дивеев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. — 2020. — 2 (129). — С. 9—17. — (ВАК).
2. *Доценко А. В.* Автоматический синтез непрерывной динамической системы стабилизации на основе искусственных нейронных сетей / А. В. Доценко // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. — 2020. — № 7. — С. 420—427. — (ВАК).
 3. *Доценко А. В.* Синтез системы разрешения коллизий для группы роботов в парадигме обучения без учителя / А. В. Доценко // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2020. — Т. 21, № 7. — С. 420—427. — (ВАК).
 4. *Доценко А. В.* Синтез универсальной вероятностной системы избегания столкновений в задаче перестроения группы динамических объектов / А. В. Доценко // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. — 2020. — (ВАК).
 5. *Diveev A.* Violation of object functional unimodality and evolutionary algorithms for optimal control problem solution / A. Diveev, E. Sofronova, A. Dotsenko // DEStech Transactions on Computer Science and Engineering. — 2018. — No. 1. — P. 128—140. — (WoS).
 6. Python package for the network operator implementation and its application for group control system synthesis problem / A. V. Dotsenko [et al.] // Procedia Computer Science. — 2019. — Vol. 150. — P. 679—686. — (Scopus, WoS).
 7. *Dotsenko A.* Collision avoidance at swarm regrouping using modified network operator method with various number of arguments / A. Dotsenko, A. Diveev, J. P. C. Cevallos // 2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). — IEEE. 2019. — P. 768—773. — (Scopus).
 8. *Доценко А. В.* 13th International Symposium Intelligent Systems - 2018 (INTELS'18) / А. В. Доценко // INTELS'18. — 2018.
 9. *Доценко А. В.* The 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2019) / А. В. Доценко // ICIEA 2019. — 2019.