

На правах рукописи

КАЛАГИН Илья Николаевич

**АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНОГО И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО
УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ МОБИЛЬНЫХ МИКРОРОБОТОВ**

Специальность 05.13.01

«Системный анализ, управление и обработка информации»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Уфа 2004

Работа выполнена на кафедре технической кибернетики
в Уфимском государственном авиационном техническом университете

Научный консультант д-р техн. наук, доц.
МУНАСЫПОВ Рустем Анварович

Официальные оппоненты д-р техн. наук, проф.
ЮСУПОВА Нафиса Исламовна
канд. техн. наук, доц.
КИРЮШИН Олег Валерьевич


Ведущая организация ФГУП Уфимское научно-производственное
предприятие «Молния»

Защита диссертации состоится «___»_____2004 г.
в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.288.03
Уфимского государственного авиационного технического универси-
тета по адресу: 450000, Уфа-центр, ул. К.Маркса, 12, УГАТУ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан «___»_____2004г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, проф.


В.В. Миронов

2005-4
20123

915586

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

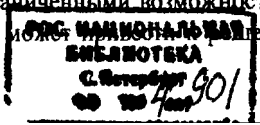
Актуальность темы

В связи с бурным развитием новых технологий наблюдается тенденция к минитюризации электромеханической продукции, используемой при создании устройств и приборов различного назначения. Микроэлектромеханические системы (МЭМС) находят все более широкое применение в медицине, атомной энергетике, космической отрасли, военной промышленности, робототехнике, системах связи, авиации, автомобилестроении и других областях науки и техники. Сборка таких устройств человеком на последних этапах технологической цепочки является трудоемким процессом, требует немалых временных и материальных затрат, что сказывается на себестоимости продукции при невысоком уровне ее точности и надежности. Поэтому с увеличением объемов производства потребность в автоматизации производства МЭМС становится все более актуальной.

Решение данной задачи потребовало разработки нового поколения микроманипуляционных систем прецизионной сборки - микропозиционирующих устройств и микророботов, высокоточные приводы которых построены на базе прямых механических преобразователей энергии. Появление мобильных микроманипуляционных роботов, способных выполнять не только манипуляции под микроскопом, но также решать задачи транспортировки микрообъектов в большом диапазоне перемещений, привело к разработке на их основе ряда прототипов настольных автоматических микросборочных станций, которые открывают хорошие перспективы для решения комплекса задач по внедрению в промышленность сложных микроробототехнических комплексов (МРК) нового поколения.

Промышленность предъявляет жесткие требования по уменьшению веса, объема, потребления энергии и стоимости к инструментам и средствам производства миниатюрных устройств. Эта тенденция приводит к объединению отдельных микророботов, высокоточных позиционирующих устройств и т.д. в компактную производственную систему - «микрофабрику», обеспечивающую полный технологический цикл производства микросистем.

Характерной особенностью функционирования таких МРК является фактор неопределенности, связанной с недетерминированностью обстановки в рабочей зоне и нестационарностью условий эксплуатации. К ним можно отнести, например, отсутствие точных данных о расположении и ориентации деталей и роботов в рабочей зоне, недостаток информации о массо-инерционных характеристиках объектов, износ или поломка рабочего инструмента микроробота, возникновение непредвиденных для движения препятствий и т.д. Кроме того, при создании МРК одной из важнейших является задача группового управления, поскольку, как правило, каждый отдельный микроробот обладает ограниченными возможностями и поэтому только их групповое применение



поставленных перед ними задач. Однако решение задачи группового управления сопряжено с рядом дополнительных технических трудностей, вызванных малыми габаритами микророботов, что делает невозможным размещение сложных вычислительных систем на их борту.

Таким образом, неизбежная на практике вариантность условий функционирования МРК, порождающая структурную и параметрическую неопределённость, порождает и специфические требования к их системе управления, заключающиеся в том, что эти системы обязательно должны быть адаптивными. Однако использование сложных алгоритмов управления затруднено вследствие дефицита временных и энергетических ресурсов, характерного для работы сложных РТС. Поэтому возникает необходимость в том, чтобы системы управления обладали не только адаптивными, свойствами, но и определенными элементами искусственного интеллекта, и строились на основе мультиагентного подхода.

Цели и задачи исследования

Целью работы является разработка и исследование адаптивных и интеллектуальных алгоритмов управления группой мобильных микророботов, функционирующих в составе микроробототехнических комплексов.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих задач:

1. Разработать обобщенную структуру системы управления МРК, обеспечивающую на основе использования адаптивных и интеллектуальных алгоритмов планирования и управления эффективное мультиагентное управление группой мобильных микророботов.
2. Разработать алгоритмы распределения задач между микророботами в составе МРК.
3. Разработать алгоритмы адаптивного управления группой мобильных микророботов при решении задач транспортировки объектов.
4. Разработать интеллектуальные алгоритмы управления мобильной платформой пьезоэлектрического микроробота на основе методов мягких вычислений.
5. Разработать архитектуру и соответствующее программное обеспечение информационно-управляющей системы МРК, исследовать эффективность предложенных адаптивных и интеллектуальных алгоритмов управления мобильными пьезоэлектрическими микророботами.

Методы исследования

Для решения поставленных в диссертационной работе задач были применены методы системного анализа, робототехники, теории автоматического управления, теории искусственного интеллекта, теории мультиагентных систем.

Научную ценность представляют

1. Предложенная обобщенная структура системы управления МРК, содержащая стратегический, тактический, исполнительный, координирующий и экспертный уровни, «бъединенные единой универсальной базой данных и

знаний в единую систему. Данная структура обеспечивает эффективное мультиагентное управление технологическим процессом производства микросистем в условиях неопределенности, выполняемым в автоматическом режиме группой мобильных микроманипуляционных роботов на основе использования адаптивных и интеллектуальных алгоритмов планирования и управления.

2. Следующие разработанные алгоритмы:

- генетический алгоритм распределения задач между роботами в составе МРК, обеспечивающий выбор оптимальной комбинации роботов и компонентов сборки с учетом их соответствия по количеству, типам, статусам (занятости) и степени пространственной близости роботов-претендентов к детали и месту проведения рассматриваемой операции;

- алгоритм адаптивного управления группой мобильных микророботов для решения задач транспортировки микрообъектов в МРК, обеспечивающий на основе использования обобщенной линеаризованной динамической модели группового движения, желаемую геометрическую форму расположения роботов в рабочем пространстве;

- интеллектуальные алгоритмы управления мобильной платформой пьезоэлектрического микроробота на основе самоорганизующихся карт Кохонена и нечеткой логики.

Практическая ценность и реализация результатов работы

1. Разработана архитектура информационно-управляющей системы МРК, позволяющая реализовать групповое управление микророботами на основе мультиагентного подхода, оптимально распределять задачи между вычислительными компонентами и обеспечивающая открытость системы для дальнейших расширений ее функциональных возможностей.

2. Разработано программное обеспечение, реализующее предложенные интеллектуальные и адаптивные алгоритмы планирования и управления группами мобильных микророботов.

3. Предложена методика использования единого пространства моделирования и разработки программно-аппаратных средств с помощью среды Матлаб и языка высокого уровня VC++.

Эффективность разработанных алгоритмов, реализованных в виде алгоритмического и программного обеспечения, подтверждена экспериментальными исследованиями на микросборочной станции, разработанной на кафедре Технической кибернетики УГАТУ совместно с Институтом управляющих вычислительных систем и робототехники Технического университета г. Карлсруэ (Германия), а также на наноманипуляционной станции, разработанной на кафедре Микроробототехники Технического университета Карл фон Осичкого г. Ольденбург (Германия).

Связь исследований с научными программами»

Исследования в данном направлении выполнялись в рамках:

- научно-технической программы «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники», проект

03.01.021 по теме «Разработка настольного микроборочного производственного комплекса» в 2000-2002 гг.;

- федеральной целевой программы «Интеграция науки и высшего образования Российской Федерации на 2002-2006 годы», программное мероприятие 14 - «Привлечение иностранных партнеров к проведению совместных исследований и развитию интегрированных научно-образовательных структур»; проект № П0039 «Фундаментальные исследования и новые технологии проектирования сложных технических систем», раздел 7 - «Интеллектуальное адаптивное планирование и управление микроборочными комплексами»;

- договора о сотрудничестве между Техническим университетом г. Карлсруэ и УГАТУ на 2002-2006 годы, раздел 2 - «Разработка микроботов, микроманипуляционных устройств и микроинструмента».

На защиту выносятся

1. Обобщенная структура иерархической системы управления МРК, которая содержит стратегический, тактический, исполнительный, координирующий и экспертный уровни, объединенные единой универсальной базой данных и знаний в единую систему, и позволяет обеспечить эффективное мультиагентное управление группой мобильных микроботов на основе адаптивного и интеллектуального подхода.

2. Генетический алгоритм распределения задач между роботами в составе МРК, обеспечивающий выбор оптимальной комбинации роботов и компонентов сборки с учетом их соответствия по количеству, типам, статусам (занятости) и степени пространственной близости роботов-претендентов к детали и месту проведения рассматриваемой операции.

3. Алгоритм адаптивного управления группой мобильных микроботов для решения задач транспортировки микрообъектов в МРК, обеспечивающий на основе использования обобщенной линеаризованной динамической модели группового движения, желаемую геометрическую форму расположения роботов в рабочем пространстве.

4. Интеллектуальные алгоритмы управления мобильной платформой микробота на основе самоорганизующихся карт Кохонена и нечеткой логики, обеспечивающие движение вдоль заданной траектории с учетом заданной скорости и точности позиционирования.

5. Архитектура информационно-управляющей системы МРК, методика использования единого пространства моделирования и разработки программно-аппаратных средств с помощью среды Матлаб и языка высокого уровня VC++, включая разработку управляющего программного обеспечения, результаты экспериментальных исследований разработанных алгоритмов на примере управления платформой мобильного пьезоэлектрического микробота в составе наноманипуляционной станции.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались на следующих научно-технических конференциях:

- Всероссийская молодежная научно-техническая конференция «Молодые ученые Волго-Уральского региона на рубеже веков». Уфа, 2001 г;
- Международная молодежная научно-техническая конференция «Интеллектуальные системы управления и обработки информации», Уфа, УГАТУ 2001г;
- Международная конференция по компьютерным наукам и информационным технологиям. (CSIT 2001), Уфа, УГАТУ 2001г;
- Всероссийский научно-технический фестиваль молодежи имени профессора Е.А. Девянина «Мобильные роботы 2002», Москва, 2002г;
- Научная конференция DAAD стипендиатов из России и Белоруссии. Берлин, 2003г;
- Всероссийский научно-технический фестиваль молодежи имени профессора Е.А. Девянина «Мобильные роботы 2003» Москва, 2003г;
- Международная конференция по компьютерным наукам и информационным технологиям. (CSIT 2003), Уфа, УГАТУ 2003г;
- Международная молодежная научно-техническая конференция «Интеллектуальные системы управления и обработки информации», Уфа, УГАТУ 2003г.

Публикации

Основные материалы диссертационной работы опубликованы в 10 научных трудах.

Объём и структура работы

Диссертационная работа состоит из 197 страниц машинописного текста, включающего в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы из 116 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность задач исследований, их цель, новизна и практическая ценность выносимых на защиту результатов.

В первой главе рассматривается актуальность проблемы создания микроробототехнических комплексов, способных за счет полной автоматизации, универсальности и гибкости технологического процесса обеспечить производство микроизделий в промышленных масштабах. Проводится анализ принципов построения МРК и показывается, что решение данной проблемы предполагает широкое использование мобильных микророботов, обеспечивающих выполнение микроманипуляций и перемещения с высокой точностью за счет использования в качестве приводов прямых преобразователей рода энергии, в частности, на основе обратного пьезоэлектрического эффекта.

Отмечается, что МРК следующих поколений следует рассматривать как сложную робототехническую систему, в которой в силу ограниченности возможностей отдельных микророботов предполагается их групповое при-

менение, что порождает функционирование системы в условиях структурной и параметрической неопределенности и накладывает специфические требования к процессу управления. Решение такой сложной задачи как управление группой мобильных микроботов требует построения иерархической системы управления на основе мультиагентного подхода с широким использованием адаптивных и интеллектуальных алгоритмов планирования и управления.

Во второй главе предложена обобщенная структура системы управления МРК (рисунок 1), содержащая стратегический, тактический, исполнительный, координирующий и экспертный уровни, объединенные универсальной базой данных и знаний в единую систему. Данная структура позволяет обеспечить эффективное мультиагентное управление технологическим процессом производства МЭМС в условиях неопределенности, выполняемым в автоматическом режиме группой мобильных микроманипуляционных роботов на основе использования адаптивных и интеллектуальных алгоритмов планирования и управления.

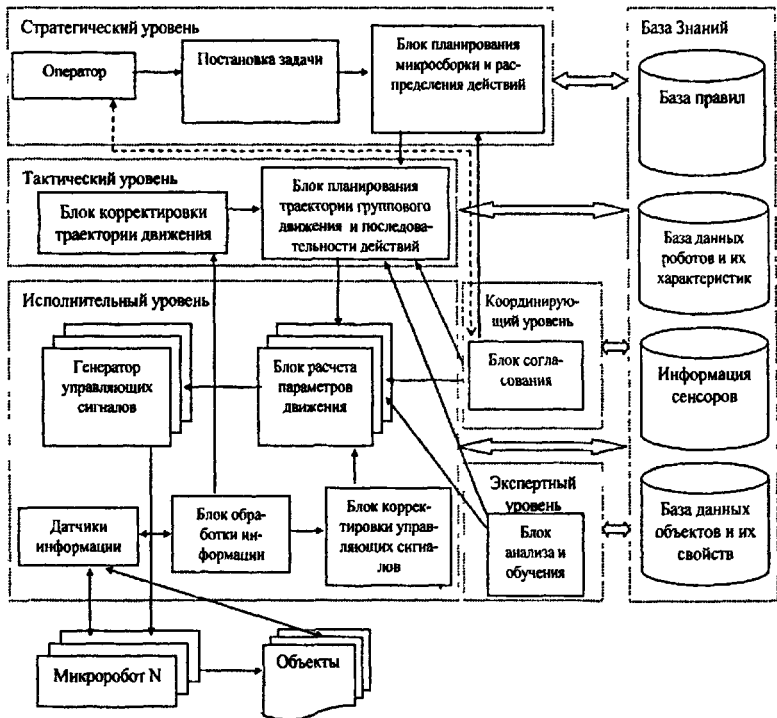


Рисунок 1

Описывается разработанный генетический алгоритм распределения задач на каждом этапе сборочных работ между роботами в составе МРК, обеспечивающий выбор оптимальной комбинации роботов и компонентов сборки с учетом их соответствия по количеству, типам, статусам (занятости) и степени пространственной близости роботов-претендентов к детали и месту проведения рассматриваемой операции.

Популяция состоит из набора N_c строк, в качестве которых рассматриваются комбинации номеров роботов. Каждая строка содержит определенное количество генов N_g . В качестве гена рассматривается претендент на одно из мест в группе роботов, необходимых для выполнения новой задачи. Каждый ген содержит три поля: поле робота, поле операции, в которой должен участвовать данный робот, поле детали, рисунок 2.

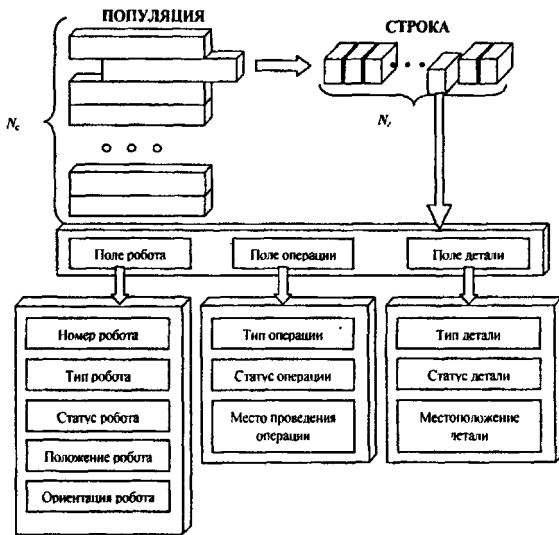


Рисунок 2

Главным требованием при выборе оптимального решения на каждом этапе эволюции является его соответствие следующему неравенству: $S_{\max i} \geq S_{\max i-1}$, где $S_{\max i}$ и $S_{\max i-1}$ максимальные значения критериев выживания на i -ом и $(i-1)$ -м эволюционных этапах.

В качестве функции пригодности служит следующий функционал:

$$S = \sum_{k=1}^4 \beta_k S_k, \quad \sum_{k=1}^4 \beta_k = 1,$$

где $\beta_k = \text{const} \in [0,1]$ – весовые коэффициенты, S_k – функции соответствия, вычисляемые для проверки степени соответствия рассматриваемой строки – комбинации роботов, необходимой по всем параметрам группе роботов.

Функция S_1 характеризует степень соответствия строки желаемой комбинации роботов по их количеству и типам:

$$S_1 = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_t} \left(\frac{1}{N_{p_i}} R_i \right), \text{ где } N_T - \text{ количество типов роботов необходимых}$$

для проведения рассматриваемого набора операций, N_{p_i} – требуемое число роботов i -го типа, R_i – число роботов i -го типа в строке.

Функция S_2 характеризует степень соответствия строки желаемой комбинации роботов по их статусам (занятости):

$S_2 = \frac{1}{N_r} \sum_{k=1}^{N_r} S_{2k}$, где N_r – число роботов-претендентов в рассматриваемой строке,

$$S_{2k} = \begin{cases} 1, & \text{если } k\text{-й робот свободен,} \\ 0, & \text{в других случаях.} \end{cases}$$

Функция S_3 характеризует степень пространственной близости роботов-претендентов к детали и месту проведения рассматриваемой операции:

$$S_3 = \frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^{N_r} F_{3i}, \text{ где } N_r - \text{ число роботов в группе,}$$

$$F_{3i} = \begin{cases} 0, & D_i \geq D_{\max}, \\ 0.5, & D_{\min} \leq D_i \leq D_{\max}, \\ 1, & D_i \leq D_{\min}, \end{cases} \text{ где } D_i - \text{ расстояние от } i\text{-го робота до детали и от}$$

детали до места проведения операции, D_{\max} – размер зоны проведения операции, D_{\min} – размер зоны безопасности проведения операций.

В идеале величина D_i является длиной траектории движения микроробота с учетом обхода препятствий. Эта информация поступает из блока планирования траекторий.

Функция S_4 характеризует степень соответствия строки желаемой комбинации деталей по их статусам (занятости):

$$S_4 = \frac{1}{N_d} \sum_{z=1}^{N_d} D_{4z}, \text{ где } N_d - \text{ число деталей в строке,}$$

$$D_{4z} = \begin{cases} 1, & \text{если } z\text{-ая деталь свободна,} \\ 0, & \text{в других случаях.} \end{cases}$$

Далее в главе разрабатывается алгоритм адаптивного управления движением группы мобильных микророботов при решении в МРК задач транспортировки микрообъектов с обработкой заданной геометрической формы их группового расположения в рабочей плоскости. В такой постановке задачи индивидуальное поведение каждого робота можно определить как его положение, ориентация и действия в рабочей группе. Так, положение i -го робота на рабочей плоскости в базовой декартовой системе координат (БСК) группы можно представить вектором $Z_i = (Zx_i, Zy_i)^T$. В качестве БСК рассматривается подвижная система координат ведущего робота, который выбирается на основе критериев, учитывающих степень загруженности роботов и минимизирующих необходимые перемещения в рабочей области.

Для описания движения каждого мобильного робота используется уравнение линейной автономной системы (LAS), в соответствии с которым поведение каждого робота координируется по следующему закону:

$$\frac{dz_{i,v}}{dt} = \sum_{k \in M} [\tau_{ik} \cdot (z_{ik} - z_{i,v})] + d_{i,v}, \quad v \in \{x, y\}, \quad (1)$$

где $z_{i,v}$ – управляемый параметр i -го робота; M_i – набор роботов, с которыми координирует свои действия i -й робот; τ_{ik} – временная константа, характеризующая инерционность взаимодействия i -го робота с набором роботов M_i ; $d_{i,v}$ – соответствующее искомое управление i -м роботом в алгоритме группового управления.

В этом случае закон управления всей группой роботов в матричной форме представляется следующим образом:

$$\frac{dZ_v}{dt} = B_v Z_v + d_v, \quad (2)$$

где B_v – матрица взаимодействия, размерность которой $n \times n$; d_v – искомый вектор, состоящий из $d_{i,v}$ ($i=1..n$).

Матрица взаимодействия B_v может быть получена путем перемножения матрицы M_v , задающей тип взаимодействия роботов внутри группы (например, «каждый с каждым», «сосед с соседом», «ведущий с ведомыми» и др.), и матрицы T_v , содержащей константы τ_{ik} :

$$B_v = M_v \cdot T_v, \quad (3)$$

где k_m – количество роботов, непосредственно взаимодействующих с i -м роботом.

$$T_v = \{\tau_{i,k}\} = \{\tau_i\}, \quad (5)$$

Далее проводится синтез алгоритмов управления, обеспечивающих асимптотическую сходимость процесса движения группы мобильных роботов к желаемой форме их расположения в рабочей плоскости.

С этой целью вводится вспомогательный вектор $R_v = (S^1 \dots \hat{S}_i)^T$, который представляется в следующем виде:

$$R_v = H_v \cdot Z_v, \quad (6)$$

где H_v – матрица преобразования размерностью $n \times n$;

$S_i = (s_{v1}, s_{v2}, \dots, s_{in})^T$ – вектор, характеризующий относительное положение каждого робота в группе (расстояния между роботами);

$$\hat{S}_i = z_{i,1} + z_{i,2} + \dots + z_{i,n}.$$

Матрица $H_v B_v H_v^{-1}$ представляется в следующем виде:

$$H_v \cdot B_v \cdot H_v^{-1} = \begin{pmatrix} A_v & 0 \\ a_v & 0 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где A_v – $(n-1) \times (n-1)$ матрица, которая получена удалением n -ой строки и n -го столбца $H_v B_v H_v^{-1}$.

С учетом последнего уравнение (2) в БСК описывается в относительной системе координат с помощью следующего уравнения:

$$\frac{dS_v}{dt} = A_v \cdot R_v + P_v \cdot d_v, \quad (8)$$

где $P_v - (n-1) \times n$ матрица, которая получена удалением n -ой строки из H_1 .

Отклонение группы от желаемого состояния S_v^* представляется выражением $\tilde{S}_i = S_v - S_v^*$. С учетом последнего уравнение (8) переписывается в следующем виде:

$$\frac{d\tilde{S}_i}{dt} = A_i \cdot \tilde{S}_i + A_i \cdot S_v^* + P_i \cdot d_i. \quad (9)$$

При условии соблюдения равенства:

$$A_i \cdot S_v^* + P_i \cdot d_i \approx 0, \quad (10)$$

выражение (9) представляется в следующем виде:

$$\frac{d\tilde{S}_i}{dt} = A_i \tilde{S}_i, \quad (12)$$

где A_i - асимптотически устойчивая матрица, обеспечивающая левые корни в характеристическом уравнении $\det[I_p - A_v] = 0$ (следовательно, \tilde{S}_i становится нулевой, т.е. группа роботов принимает желаемую форму).

Искомая обратная модель движения группы мобильных роботов, определяющая вектор управления d_v относительно желаемой формы их расположения в рабочей плоскости и обеспечивающая выполнение условия (10), описывается следующим матричным выражением:

$$d_i = -B_i \cdot H_i^{-1} \cdot (S_i^{*f}, \tilde{S}_i)' . \quad (13)$$

Для компенсации параметрических возмущений $\Delta \tau_i(t)$ по коэффициентам τ_i , влияющих на выполнение группового движения роботов вида (1), далее вводится контур адаптации, структура и интегральные алгоритмы самонастройки которого синтезируются с помощью прямого метода Ляпунова с учетом обеспечения асимптотической устойчивости процесса адаптации.

В третьей главе представлено описание конструкции трехногого пьезоэлектрического мобильного микроробота AMIR, созданного на основе анализа преимуществ и недостатков конструкций микророботов типа PRO-NAM, MINIMAN в университете Карл фон Осичкого города Ольденбург (Германия), кафедры микроробототехники. Мобильный микроробот состоит из мобильной платформы и манипулятора. Для выполнения перемещений по рабочей плоскости она оснащена тремя металлическими шарами (ноги микроробота); платформа опирается на каждый из них посредством трех рубиновых шариков, приклеенных к разным сегментам пьезодиска, рисунок 3 а. Движение платформы основано на stick-slip принципе. В зависимости от полярности управляющих напряжений (рисунок 3 б) на сегментах диска, соответствующий рубиновый шарик движется вверх или вниз, вращая металлические шары. Одним из эффективных способов решения задачи управления является использование методов теории искусственного интеллекта и, в первую очередь, аппарата нечеткой логики и искусственных нейронных сетей, которые позволяют системе работать в условиях неопределенности и действиях случайных возмущений со стороны внешней среды.

На основе аппарата нечеткой логики разработана обратная модель мобильной платформы микробота для управления его движением по желаемой траектории. Для организации обратной связи по положению используется CCD-камера с большим разрешением и сканирующий электронный микроскоп. Так как робот обладает тремя приводами, то для реализации его перемещения по заданной траектории необходимо сгенерировать шесть выходных управляющих напряжений.

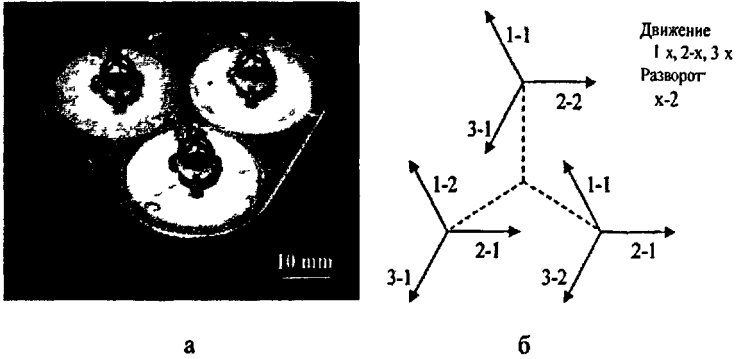


Рисунок 3

Для определения напряжений, подаваемых на сегменты пьезопривода при линейном перемещении, необходимо ввести понятие сегмента направления. Все возможные для данной системы направления движения можно разбить на шесть сегментов направляющих векторов управляющих напряжений, которые представлены в декартовой системе координат на рисунке 4, где приняты следующие обозначения: a - угол направления движения, $gdes$ - желаемая позиция платформы с координатами (x_{des}, y_{des}) в локальной системе координат микробота.

Алгоритм расчета векторов амплитуд управляющих напряжений можно разделить на несколько этапов:

1. Нахождение сектора движения.

2. Для каждого сектора строится нечеткий регулятор с двумя входами и тремя выходами. Можно заметить, что для секторов 1 и 4, 2 и 5, 3 и 6, соответствующие управляющие сигналы одинаковы по модулю, но противоположны по знаку. Поэтому для управления в сопряженных секторах можно использовать один и тот же нечеткий регулятор. Первая входная переменная - это $tg(a) = y_{des}/x_{des}$ (для секторов 1, 4, 3, 6) или $ctg(a) = x_{des}/y_{des}$ (для 2 и 5 сектора). Вторая переменная $dist$ - это расстояние до желаемой точки перемещения. Выходные переменные - это значение вектора напряжения для сектора и количество шагов для достижения желаемой позиции микробота, являющейся функцией переменной $dist$. Выбор такого подхо-

да обусловлен удобством использования значений углов в локальной системе координат управляющих напряжений.

Следующим шагом алгоритма является оптимизация скорости движения мобильной платформы микроробота с учетом заданной точности позиционирования в целевой точке путем коррекции значений векторов амплитуды управляющих напряжений. Для решения данной задачи также воспользуемся аппаратом нечеткой логики.

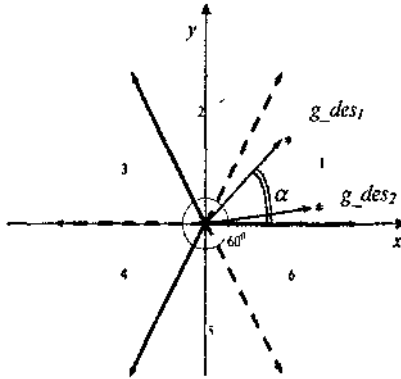


Рисунок 4

На вход предлагаемого нечеткого регулятора подаются значения векторов амплитуд напряжений и расстояние до желаемой позиции, предварительно вычисленные с помощью рассмотренного выше нечеткого алгоритма. На выходе получаем коэффициент (множитель) для коррекции величины вектора амплитуд управляющих напряжений, пропорциональный скорости движения платформы.

Экспериментальные результаты показывают, что при использовании алгоритмов на основе нечеткой логики удалось улучшить качество процесса управления, уменьшить величину ошибки следования по требуемой траектории, но одним из недостатков данного подхода является отсутствие возможности самонастройки системы при изменяющихся условиях функционирования.

Поэтому рассматривается возможность построения системы управления движением мобильной платформы микроробота вдоль заданной траектории на основе использования самоорганизующихся карт Кохонена (SOFM). Сеть Кохонена, состоит из N пронумерованных нейронов, образующих матрицу C (рисунок 4). В сети Кохонена каждый нейрон i соединен со входным весом $g_i \in G$ желаемое местоположение мобильной платформы. С другой стороны, выходной вес $p_i \in P$ ассоциируется с каждым нейроном i , параметром исполнительного механизма для достижения же-

лаемого местоположения. Когда на вход сети подается вектор g_{trgt} , выходной вектор $p_{act} = p_i$, т.е. на выходе активизируется нейрон i , чей входной вес g_i наиболее близок к g_{trgt} . Таким образом, сеть осуществляет преобразование $G \mapsto P$, где N подпространств из пространства G принадлежат N векторам из пространства P . Кроме такого отображения карты Кохонена имеют свойство самоорганизации, т.е. перехода в такое состояние, которое наилучшим образом представляет распределение входных векторов. Это означает, что плотность распределения весов g_i выше в области, где входной вектор g_{trgt} в предыдущие итерации появлялся чаще. Такое поведение сети описывается правилом обучения Кохонена, которое выполняется после нахождения выходного значения p_{act} .

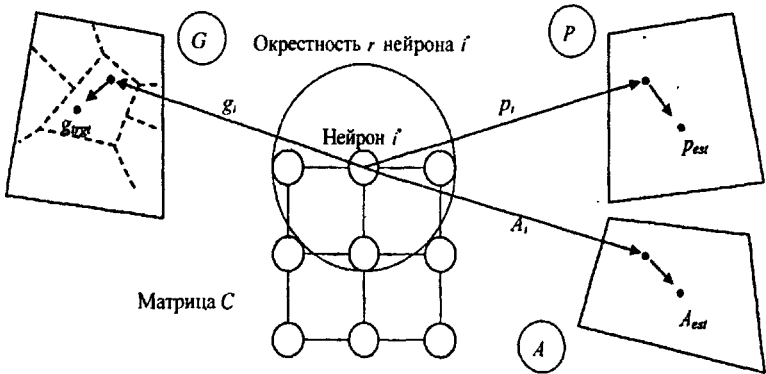


Рисунок 4

Входные веса g_i на шаге v изменяются следующим образом: $g_i^{(v)} = g_i^{(v-1)} + \varepsilon_g \cdot h(i^*, i, r_g) \cdot (g_{trgt}^{(v)} - g_i^{(v-1)})$, где ε_g и $h(i^*, i, r_g)$ - константы, характеризующие обучение, $h(i^*, i, r_g)$ не равно нулю для всех нейронов i , находящихся в радиусе r_g от нейрона-победителя i^* (рисунок 4). По этому методу веса g_i всех нейронов i , находящихся по соседству с нейроном-победителем i^* , подтягиваются к весу g_i нейрона i^* . Задав оценку выходного веса p_{ests} которая принадлежит выигравшему входному весу g_i , выходной вес p_i может быть обучен так же, как и g_i :

$$p_i^{(v)} = p_i^{(v-1)} + \varepsilon_p \cdot h(i^*, i, r_p) \cdot (p_{ests}^{(v)} - p_i^{(v-1)})$$

Множество p_i также показывает свойство соседства, которое означает, что нейроны-соседи в матрице c выдают похожие векторы.

Так как выходные векторы p_i постоянны для подпространств G около соответствующих им векторов g_i , то предложено ассоциировать с каждым нейроном i якобиан A_i в точке g_i/p_i , который преобразует небольшую разницу $g_{trgt} - g_i$ в небольшое расхождение параметров $p_{act} - p_i$. Параметры актуатора рассчитываются следующим соотношением:

$$p_{act} = p_i + A_i(g_{trgt} - g_i)$$

Матрицы A , могут быть рассмотрены как третье множество весов. Задав оценку матрице A_{cs} , которая принадлежит выигравшему входному весу g , обучается так же, как и g , и p .

Предложенный алгоритм адаптивный, способен компенсировать нелинейности, а также разработан без использования математической модели поведения системы, но первоначальная настройка регулятора занимает очень много времени.

Поэтому предлагается подход комплексного (совместного) применения нейронных сетей и нечеткой логики для построения самообучающихся систем автоматического управления мобильной платформой микроробота.

Для обеспечения требуемого качества функционирования самообучающейся системы и его поддержания при изменении параметров внешней среды предлагается использовать самоорганизующиеся карты Кохонена - для построения обратной модели, и нечеткую логику - для настройки весовых векторов SOFM. Моделирование показало лучшую сходимости средней ошибки позиционирования по отношению к использованию самоорганизующихся карт Кохонена без модуля обучения на основе нечеткой логики.

В четвертой главе предложена многоуровневая архитектура информационно-управляющей системы микросборочной фабрики. Исходя из принципов разделения обработки информации система управления группой мобильных микророботов строится мультиагентной. В качестве основного подхода к проектированию программного комплекса группового управления мобильными микророботами был выбран объектно-ориентированный подход. Подробно описываются основные классы системы и их взаимодействия и схема функционирования системы. Предлагается общее описание программной реализации алгоритмов группового движения микророботов, распределение задач между роботами для моделирования в среде Matlab 6.0. Предлагается структурная схема методики создания единого пространства моделирования и разработки программно-аппаратных средств с помощью среды Матлаб и языка высокого уровня VC++. Проведены экспериментальные исследования алгоритмов группового движения мобильных микророботов AMIR на примере групп, состоящих из четырех и пяти роботов. Моделирование, проведенное в системе MATLAB, подтверждает высокую эффективность предлагаемых адаптивных алгоритмов группового управления, использование которых обеспечивает точность позиционирования роботов в желаемую форму не хуже 200 мкм.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана обобщенная структура системы управления МРК, которая состоит из стратегического, тактического, исполнительного, координирующего и экспертного уровней, объединенных единой универсальной базой данных и знаний в единую систему. Данная структура обеспечивает эффективное мультиагентное управление технологическим процес-

сом производства микросистем в условиях неопределенности, выполняемым в автоматическом режиме группой мобильных микроманипуляционных роботов на основе использования адаптивных и интеллектуальных алгоритмов планирования и управления.

2. Разработан генетический алгоритм распределения задач между роботами в составе МПК, обеспечивающий выбор оптимальной комбинации роботов и компонентов сборки с учетом их соответствия по количеству, типам, статусам (занятости) и степени пространственной близости роботов-претендентов к детали и месту проведения рассматриваемой операции.

3. Разработаны алгоритмы адаптивного управления группой мобильных микророботов при решении задач транспортировки микрообъектов в МПК из условия обеспечения в рабочем пространстве желаемой геометрической формы движения группы роботов с использованием обобщенной модели линейной автономной системы LAS.

4. Представлено описание конструкции трехногого пьезоэлектрического мобильного микроробота AMIR, созданного на основе анализа преимуществ и недостатков конструкций микророботов типа PRONAM, MINIMAN в университете Карл фон Осичкого города Ольденбург (Германия), кафедра микроробототехники. Рассмотрены особенности применения нечеткого алгоритма в обратной модели мобильной платформы микроробота для управления его движением по желаемой траектории. На основе проведенных экспериментов доказана эффективность разработанного алгоритма. Предложены алгоритмы управления мобильной платформой на основе самоорганизующихся карт Кохонена, эффективность которых подтверждена результатами моделирования. Предложен подход комплексного применения самоорганизующихся нейронных сетей Кохонена и нечеткой логики для построения самообучающихся систем автоматического управления мобильной платформой микроробота.

5. Разработана архитектура и соответствующее программное обеспечение информационно-управляющей системы МПК. Предложена методика создания единого пространства моделирования и разработки программно-аппаратных средств с помощью среды Матлаб и языка высокого уровня VC++. Путем моделирования и экспериментальных исследований с использованием разработанного программного обеспечения проведен анализ эффективности предложенных адаптивных и интеллектуальных алгоритмов на примере управления мобильным пьезоэлектрическим микророботом в составе реальной наноманипуляционной станции, разработанной на кафедре микроробототехники Университета Карл фон Осичкого г. Ольденбург (Германия), а также в составе МПК, разработанного на кафедре Технической кибернетики Уфимского государственного авиационного технического университета.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Калагин И.Н.** Методология синтеза нечетких систем управления // Молодые ученые Волго-Уральского региона на рубеже веков: Всерос. молодеж. науч.-техн. конф. Уфа: БГУ, 2001. Т. II. С 26-27.
2. **Калагин И.Н., Мунасыпов Р.А.** Синтез сложных систем управления на основе нечеткой логики // Интеллектуальные системы управления и обработки информации: Междунар. молодеж. науч.-техн. конф. Уфа: УГАТУ, 2001. С 129.
3. **Ильясов Б.Г., Мунасыпов Р.А., Челушкина Л.П., Калагин И.Н.** Экспертная система для настройки нечеткого регулятора // Матер. 3-й междунар. конф. по компьют. наук, и информ. техн. (CSIT 2001). Уфа: УГАТУ, 2001. С. 332-338. (Статья на англ. яз.)
4. **Мунасыпов Р.А., Калагин И. Н., Дарянцев О.В.** Интеллектуальное управление движением мобильного микроробота на основе использования нейронной сети Кохонена // Мобильные роботы и мехатронные системы: Матер, науч. шк.-конф. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. С. 102-114.
5. **Калагин И.Н., Мунасыпов Р.А.** Расширенное применение нейронных сетей Кохонена для управления движением мобильной платформы микроробота // Вопросы управления и проектирования в информационных и кибернетических системах: Межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 2003. С.71-78.
6. **Гарника С, Хьюльзен Х., Калагин И., Фатиков С.** Система управления наноманипуляционного робота внутри сканирующего электронного микроскопа // Матер. 5-й междунар. конф. по компьют. наук, и информ. техн. (CSIT 2003). Уфа: УГАТУ, 2003. Т. 1. (Статья на англ. яз.)
7. **Калагин И.Н.** Интеллектуальная система управления микророботом // Интеллектуальные системы управления и обработки информации: Междунар. молодеж. науч.-техн. конф. Уфа: УГАТУ, 2003. С. 123.
8. **Калагин И., Хьюльзен Х., Фатиков С.** Алгоритм на основе нечеткой логики для управления наноманипуляционным микророботом // Матер. 5-й междунар. конф. по компьют. наук, и информ. техн. (CSIT 2003). Уфа: УГАТУ, 2003. Т. 1. (Статья на англ. яз.)
9. **Калагин И. Н.** Алгоритмы управления мобильной платформой микроробота на основе искусственного интеллекта // Науч. конф. DAAD стипендиатов из России и Белоруссии. Берлин, 2003. (Статья на англ. яз.)
10. **Калагин И.Н., Мунасыпов Р.А., Даринцев О.В.** Система управления микроробота, базового элемента наностанции. - В кн.: Мобильные роботы и мехатронные системы. // Матер, научн. шк.-конф. (Москва, 17-18 ноября 2003 г.). М.: изд-во Моск. ун-та, 2003. С 180-190.

КАЛАГИН Илья Николаевич

АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНОГО И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ МОБИЛЬНЫХ МИКРОРОБОТОВ

Специальность 05.13.01 – Системный анализ,
управление и обработка информации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 01.11.2004. Формат 80×64 1/16.

Бумага писчая. Печать плоская. Усл. печ. л. 2, 25.

Усл. кр.-отт. 1,0. Уч. -изд.л.1,0. Тираж 100 экз.

Заказ № 605. Бесплатно.

Уфимский государственный авиационный технический университет

Центр оперативной полиграфии

Республика Башкортостан, 450054, Уфа-центр, ул. К.Маркса, 12

№22520

РНБ Русский фонд

2005-4

20123