

**УДК 004.8.032**

## **МНОГАГЕНТНАЯ И НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЕ МАНИПУЛЯТОРОМ ТИПА «ХОБОТ»**

Ю.Т. Каганов (*yurikaganov@gmail.com*)

А.П. Карпенко (*apkarpenko@mail.ru*)

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э.  
Баумана, Москва

В работе описывается методика построения многоагентной модели управления сложной мехатронной системы, основанной на механизмах параллельной структуры типа «хобот». В качестве системы управления предлагается двухуровневая структура. Верхний уровень предполагает систему управления на основе многоагентной модели. Нижний уровень основан на использовании нейро-нечетких алгоритмов.

### **Введение**

Развитие современных робототехнических систем направлено на создание конструкций манипуляторов обладающих значительно большим числом степеней подвижности, чем традиционные роботы. Это роботы, основанные на использовании параллельных механизмов, таких как различные платформенные механизмы (гексаподы, триподы и т.п.) [Глазунов и др, 1991]. Применение таких роботов в медицине, в различных технологических операциях, в чрезвычайных ситуациях значительно расширяет возможности технического обеспечения этих областей. Роботы-манипулятора на основе механизмов параллельной кинематики обладают целым рядом замечательных свойств. Конструкции таких роботов являются механически более жесткими, чем традиционные многосвязные манипуляторы. Это, наряду с большой маневренностью, обеспечивает более высокую точность позиционирования и большую грузоподъемность. Вместе с тем управление такими манипуляторами представляет серьезную проблему, так как помимо управления каждой секцией (платформой) необходимо обеспечивать управление всей конструкцией в целом.

Эти проблемы можно сформулировать следующим образом:

1. Современные робототехнические системы, основанные на использовании механизмов параллельной структуры,

представляют собой сложные системы, как с точки зрения механики, так и управления.

2. Традиционные методы управления оказываются неэффективными для решения задач управления многосекционными параллельными механизмами.
3. Проблемой является обеспечение взаимодействия между подсистемами и совместное выполнение ими общей задачи, связанной с реализацией технологического или иного процесса.
4. Для решения этой проблемы в работе предлагается использовать многоагентный подход и нейросетевые технологии.

Способ решения проблемы состоит в совмещении иерархической структуры с децентрализацией на уровне отдельных агентов.

## **1. Нейросетевое управление секциями манипулятора**

Рассматриваемый робот-манипулятор должен функционировать в непредсказуемых условиях внешней среды. Это обстоятельство требует использования для его управления интеллектуальных систем управления. Интеллектуальное поведение робота-манипулятора предполагает наличие у системы управления следующих функциональных возможностей: значительная автономность и гибкость при планировании и исполнении движений; адаптация и оптимизация функциональных движений в условиях изменяющейся внешней среды и существенных возмущающих воздействий; автоматический контроль и диагностика собственного состояния [Зенкевич и др., 2004].

Задачу управления роботом-манипулятором можно разделить на два иерархических уровня: планирование движения; исполнение спланированного движения во времени. Для решения задачи управления на верхнем уровне (уровне планирования движения) необходима информация только об исходном положении манипулятора и требуемом его конечном положении. Для решения задачи управления на нижнем иерархическом уровне (уровне исполнения движения) необходимо гораздо больше информации, а именно, необходима информация обо всех промежуточных положениях манипулятора. Реализация управления манипулятором на этом уровне иерархии с помощью одного контроллера движения практически невозможна. В связи с этим для управления манипулятором на уровне исполнения движения целесообразно использовать мультиагентный (многоагентный) подход [Wooldridge, 2009].

### **1.1. Многоагентный подход к управлению манипулятором.**

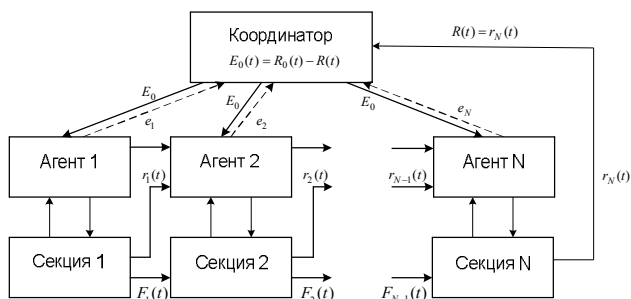
Принцип действия мультиагентных управляющих систем основывается на декомпозиции общей задачи управления на ряд локальных задач и

распределении этих задач между управляющими системами агентов, а также планировании коллективного поведения агентов, координации взаимодействия агентов на основе кооперации.

Мультиагентное управление позволяет координировать целенаправленную деятельность автономных агентов, планировать их поведение и взаимодействие, адаптироваться к изменяющейся среде и разрешать конфликты между агентами на стратегическом (супервизорном) уровне управления и коммуникации, т.е. посредством обмена информацией по компьютерным каналам связи.

Для проектирования мультиагентных систем управления могут использоваться методы коллективного поведения автоматов, теория игр, способы кооперативного решения проблем на базе распределённого искусственного интеллекта, теория расписаний, методы оптимального планирования и адаптивного управления. При мультиагентном управлении многосекционным роботом-манипулятором каждый агент можно рассматривать как интеллектуальный мехатронный объект с собственной базой данных и знаний, способный адаптироваться к заранее неизвестным или изменяющимся условиям функционирования в среде с препятствиями. Поэтому, большое значение в теории мультиагентного управления имеют методы обучения и адаптации, как отдельных агентов на тактическом (локальном) уровне управления, так и системы в целом на стратегическом (супервизорном) уровне управления [Shoham et al., 2008].

Общая структурная схема мультиагентной системы управления многосекционным роботом-манипулятором представлена на рисунке 1.1 [Каганов и др., 2009].



**Рис. 1.1** – Общая структура многоагентной системы управления многосекционным роботом-манипулятором

Координатор (рисунок 1.1) вычисляет положения (скорости и ускорения) исполнительного механизма  $R(t)$ , а также ошибку

$E_0 = R_0(t) - R(t)$  его положения; на основе ошибок  $E_0, e_1, e_2, \dots, e_N$  формирует глобальную целевую функцию  $G_0$  (время отработки траектории, энергетические затраты и т.д.) для многокритериальной оптимизации. Агент  $i$  рассматриваемой системы управления определяет положение базы соответствующей секции манипулятора  $r_{i-1}$ , вычисляет положение управляемой им платформы  $r_i$ , вычисляет ошибку положения (скорости и ускорения) этой платформы  $e_i$ , формирует сигналы управления приводами актуаторов  $F_{i,j}$ .

Рассмотрим прежде задачу синтеза системы управления одной секцией манипулятора в виде трипода с двумя степенями свободы (трипода 2).

## 2. Постановка задачи управления триподом 2

В работе [Merlet, 2004] показано, что кинематика трипода 2 описывается следующими уравнениями

$$l_i = l_i(\varphi_1, \varphi_2) = \sqrt{\sum (A_{i,j} - [B_{i,j}])^2}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, \quad (2.1)$$

где  $A_{i,j}, [B_{i,j}]$  - величины, определяющиеся координатами концов штанг;

$l_i(\varphi_1, \varphi_2)$  - длины подвижных штанг;

$\varphi_1, \varphi_2$  - углы Эйлера, определяющие положение платформы относительно основания.

Динамика рассматриваемого трипода задается системой обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ)

$$\begin{cases} J \ddot{\varphi}_1 = F_1 \cos \gamma_{1,2} [B_{1,1}] - F_3 \cos \gamma_{3,2} [B_{3,1}], \\ J \ddot{\varphi}_2 = -F_1 \cos \gamma_{1,2} [B_{1,3}], \end{cases} \quad (2.2)$$

где  $J$  - момент инерции платформы,

$F_1, F_2$  - внешние силы, действующие на трипод 2, которые могут быть заданы как функции времени, обобщенных координат или длин  $l_i(\varphi_1, \varphi_2)$  “своих” штанг;

$\gamma_{i,j}$  - углы, определяемые уравнениями

$$\cos \gamma_{i,j} = \cos \gamma_{i,j}(\varphi_1, \varphi_2) = \frac{[B_{i,j}]}{l_i}.$$

Систему ОДУ второго порядка (4.2) легко записать в виде системы ОДУ первого порядка

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{J}(F_1 \cos \gamma_{1,2}[B_{1,1}] - F_3 \cos \gamma_{3,2}[B_{3,1}]), \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{J}(-F_1 \cos \gamma_{1,2}[B_{1,3}]), \end{array} \right. \quad (2.3)$$

где  $x_1 = \varphi_1, x_2 = \dot{\varphi}_1, x_3 = \varphi_2, x_4 = \dot{\varphi}_2$ .

Напомним, что величины  $[B_{i,j}], \gamma_{i,j}$  представляют собой функции переменных  $x_1, x_3$ .

Задача управления триподом 2 формулируется следующим образом. Необходимо найти такие законы изменения внешних управляющих воздействий  $F_1, F_2$ , которые на решениях системы ОДУ (2.3) обеспечивают заранее заданные законы изменения фазовых координат системы  $x_1, x_2, x_3, x_4$ .

Поскольку непосредственное измерение указанных фазовых координат технически сложно, будем заданные законы движения платформы  $\varphi_1(t), \varphi_2(t)$  пересчитывать в законы изменения длин штанг  $l_1(t) = l_2(t), l_3(t)$ . В таком случае задача синтеза системы управления триподом 2 ставится следующим образом. Необходимо построить систему автоматического управления (САУ), которая формирует законы изменения внешних управляющих воздействий  $F_1(t), F_3(t)$ , обеспечивающие заданные законы изменения длин штанг  $l_1(t) = l_2(t)$ ,

$l_3(t)$ . Выходами САУ должны являться управляющие напряжения для приводов, которые реализуют изменения длин указанных штанг.

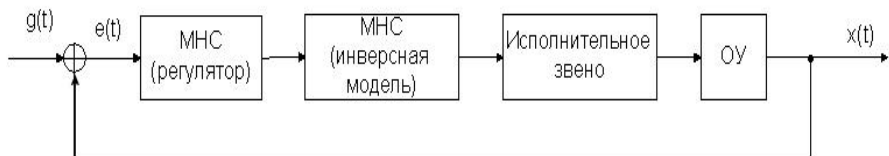
Будем прежде исходить из того, что текущие длины штанг измеряются без статических и динамических погрешностей, так что в каждый момент времени величины  $l_1(t) = l_2(t)$ ,  $l_3(t)$  известны точно.

Поскольку при функционировании трипода 2 в составе многосекционного робота-манипулятора типа «хобот» динамические характеристики платформы, а также силы и моменты, действующие на нее, могут изменяться в очень широких пределах, САУ должна быть адаптивной.

### 3. Нейросетевое управление триподом 2

Структура нейросетевой системы управления триподом на основе его инверсной модели приведена на рисунке 3.1.

Рисунок 3.1 показывает, что структурно нейросетевая системы управления проще, чем классическая система управления. Однако, заметим сразу, добиться высокого качества функционирования нейросетевой системы значительно сложнее, чем классической системы.



МНС – многослойная нейронная сеть; ОУ – объект управления

**Рис. 3.1.** Структура нейросетевой системы управления на основе инверсной модели объекта управления

Сложности построения нейросетевой системы управления обусловлены следующими обстоятельствами.

- Инверсная модель объекта управления должна иметь характеристику, в точности обратную характеристике объекта управления. Обучить таким образом нейронную сеть во всем диапазоне входных значений объекта управления обычно не удается.
- Как показано в работе [Омату и др., 2000], системы управления, построенные на основе нейронных сетей, обладают высокой чувствительностью к высокочастотным

возмущающим воздействием. Задача ослабления влияния таких возмущений является сложной.

- Появление в нейросетевой системе управления в качестве уставки сигнала, “незнакомого” для нейронной сети, может привести к критическим последствиям.

Подавая на входы исполнительного механизма системы управления триподом ступенчатые воздействия различной амплитуды, была построена инверсная характеристика объекта управления вместе с исполнительным механизмом. Использована частота дискретизации, равная 50 Гц.

## 4. Нейросетевое управление секцией манипулятора типа

### «гексапод»

#### 4.1 Обратная задача кинематики.

Для гексапода обратная кинематическая задача решается аналогично тому, как это сделано для трипода [Merlet, 2004]. Пусть обобщенными координатами  $q_1, q_2, \dots, q_6$  являются длины стержней  $Aa, Bb, \dots, Ff$  соответственно. Пусть также в неподвижной декартовой системе координат  $OXYZ$  координаты точек  $A, B, \dots, F$  равны  $I(X_I, Y_I, Z_I)$ , а точек  $a, b, \dots, f$  -  $i(X_i, Y_i, Z_i)$ , где  $I \in \{A, B, \dots, F\}$ ,  $i \in \{a, b, \dots, f\}$ . Тогда, очевидно, решение обратной задачи кинематики для гексапода (как с четырьмя, так и с шестью степенями свободы) дает следующая система уравнений:

$$\begin{aligned}q_1 &= (X_A - X_a)^2 + (Y_A - Y_a)^2 + (Z_A - Z_a)^2; \\q_2 &= (X_B - X_b)^2 + (Y_B - Y_b)^2 + (Z_B - Z_b)^2; \\&\dots \\q_6 &= (X_F - X_f)^2 + (Y_F - Y_f)^2 + (Z_F - Z_f)^2.\end{aligned}$$

#### 4.2 Структура и обучение нейросетевого регулятора.

Для управления каждой из шести штанг гексапода применялась персептронная нейронная сеть прямого распространения с тремя входами и одним выходом [Омату и др., 2000]. В скрытом слое сети использовалось три нейрона с функцией активации  $\tansig$ . В качестве функции активации нейрона выходного слоя использовалась линейная функция  $\text{purelin}$  (рисунок 4.1).

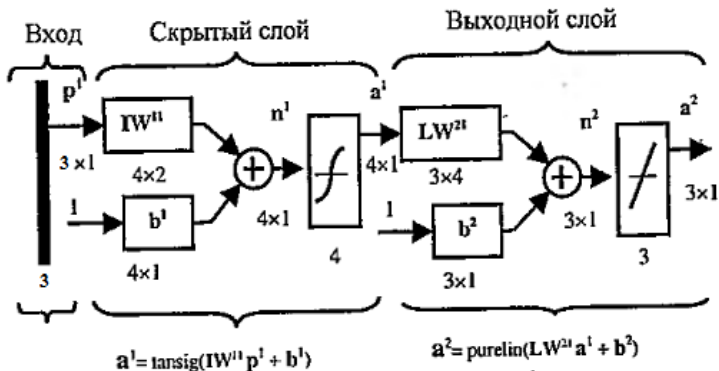


Рис. 4.1. Структура нейронной сети

Для обучения нейронной сети использовался алгоритм Левенберга – Марквардта. Обучающая выборка формировалась на основе интегральной, дифференциальной и пропорциональной составляющих ошибок регулирования, полученных при использовании системы управления с классическим ПИД-регулятором. Выход каждой из сетей представлялся в виде управляющего воздействия - силой, необходимой для изменения длины соответствующей штанги. На рисунке 4.2 представлена Simulink-схема получения обучающей выборки. На рисунке 4.3 приведена Simulink-модель гексапода с нейросетевым контроллером.

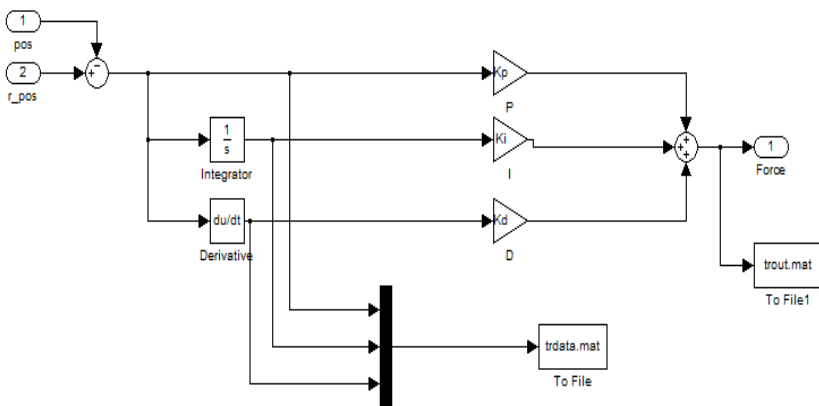
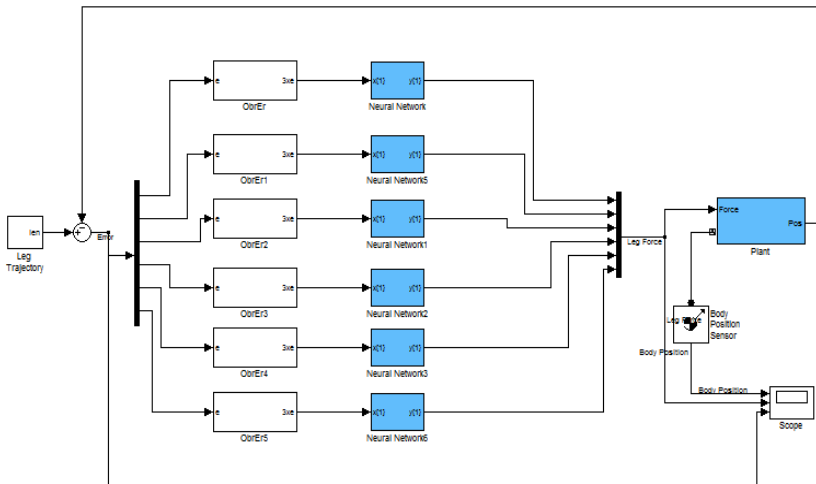


Рис. 4.2. Схема формирования обучающей выборки





**Рис. 4.3.** Simulink-модель гексапода с нейросетевым контроллером

**Благодарности.** Авторы благодарят Д.В. Антонова, С.М. Гоменюка, Т.В. Литун, а также А.С. Гавриленко за помощь в проведении вычислительных экспериментов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-07-00727).

### Список литературы

- [Глазунов и др, 1991] Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры. М.: Наука. - 1991.
- [Зенкевич, 2004] Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами. М.: МГТУ. - 2004
- [Каганов, 2009] Каганов Ю.Т., Карпенко А.П. Многоагентные модели и нейросетевое управление манипулятором типа «хобот».
- [Омату и др., 2000] Омату С., Халид М., Юсоф Р. Нейроуправление и его приложения. М.: ИПРЖР. - 2000.
- [Merlet, 2004] Merlet J.P. Parallel Robots (Solid Mechanics and Its Applications).
- [Shoham и др., 2008] Shoham Y., Leyton-Brown K. Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations.
- [Wooldridge, 2009] Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems.