

УДК 621.8:681.5

ПОСТРОЕНИЕ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ СЕРВОУПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРАМИ НА ОСНОВЕ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ И НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В. В. Козлов,

доктор техн. наук, профессор

А. С. Коновалов,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

В. П. Макарычев,

канд. техн. наук, доцент

ЦНИИ робототехники и технической кибернетики, г. Санкт-Петербург

Рассматривается новый класс алгоритмов управления роботами и манипуляторами, основанных на двух компонентах. Для определения желаемого управляющего механической системой момента используются адаптивные алгоритмы управления на основе концепции обратных задач динамики, а для формирования этого момента следящим скоростным или позиционным приводом робота применяется нейронная сеть.

Ключевые слова — обратные задачи динамики, нейронные сети, роботы, манипуляторы, управление, следящая система.

Введение

Передовые фирмы производителей роботов и их систем управления (СУ) для достижения высокого качества сервоуправления (управления с обратной связью) в последние годы начинают использовать алгоритмы отслеживания траекторий с учетом динамики его механической системы. В настоящей работе рассматривается класс алгоритмов сервоуправления, основанных на концепции обратных задач динамики и нейронных сетях (НС). Пусть объектом управления является робот-манипулятор. Хотя все дальнейшие рассуждения могут быть легко распространены с соответствующими модификациями и на другие роботы и мехатронные системы, ограничимся для конкретности случаем манипулятора.

При формировании управляющего сигнала на приводы робота учитывается следующий аспект их реализации. Для существующих современных микроконтроллерных приводов, имеющих встроенный цифровой регулятор, управляющий сигнал обычно является векторным по каждому шарниру и включает в себя (в режиме управления по положению): задание положения, задание (ограничение) скорости, задание (ограничение)

тока. Будем в полной мере использовать возможности приводного уровня СУ и формировать такой векторный сигнал с учетом динамики механической системы робота, используя вычисляемые в реальном времени коэффициенты уравнений Лагранжа.

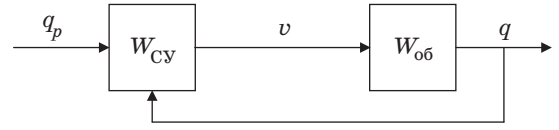
Рассмотрим общий подход к построению регуляторов, комбинирующий классические методы управления с методами управления на основе НС. При классическом построении адаптивной СУ, прежде всего, необходимо вычислить коэффициенты его уравнений динамики, например, в форме уравнений Лагранжа 2-го рода [1, 2]. После чего можно сформировать управляющие моменты на приводы, которые обеспечат высокое качество управления. Более того, применяя специальную форму такого управления, можно получить стабилизирующее (формально устойчивое) или даже адаптивное управление [3–5] с помощью такого вектора моментов в шарнирах. Однако существующие сервоприводы замкнуты по скорости или положению (координате) и имеют управляющие сигналы в виде скорости или положения. Проблемой является получение такого управляющего сигнала на привод, который вызывал бы необходимый управляющий момент.

Авторы предлагают использовать НС в качестве такого преобразователя. Очевидным выходом такой НС будет являться необходимый сигнал управления по положению (или скорости) $y = v$ на входе привода. Вектор v_{NN} входных сигналов на НС состоит из величин, которые оказывают влияние на значение входного сигнала привода v , т. е. аргументы оператора обратного преобразования привода $W_{qM} = W_{Mq}^{-1}$ — перехода от необходимого управляющего момента $u = M_{Control}$ к вектору входного сигнала на привод v . Кроме очевидной величины желаемого стабилизирующего момента $u = M_{Control}$ таковыми являются, прежде всего, реальные значения выходного момента в предыдущие моменты времени (на предыдущих шагах управления) $U = \{M_i\}$, откуда $v_{NN} = (u, U)^*$.

Обучение НС осуществляется путем математического моделирования привода или даже физического макетирования на реальном приводе. При этом экспериментальные данные располагаются в прямой цепи: на вход привода подаются некоторые управляющие значения, т. е. значения координаты положения привода, и при этом протоколируются необходимые характеристики объекта — в данном случае выходные моменты привода в последовательные моменты времени.

Схема построения регулятора

Для одной присоединенной координаты манипулятора (углу или линейному перемещению в шарнире) рассмотрим структурную схему сервоуправления (рис. 1). На этой схеме СУ может варьироваться от простого П- или ПИД-регулятора до реализованного в компьютере сложного алгоритма сервоуправления. Объектом является манипулятор, состоящий из механической системы («руки») и электрического (как правило) привода. Здесь $q_p = q_p(t)$, $0 \leq t \leq T$ — входной сигнал, являющийся программной траекторией присоединенной координаты манипулятора; $q = q(t)$ — реальная выходная присоединенная координата манипулятора; $v = v(t)$ — входной сигнал на привод манипулятора.



■ Рис. 1. Структурная схема СУ объекта (манипулятора)

Классическое управление с учетом динамики основано на вычислении уравнений динамики манипулятора в виде их коэффициентов или интегральных величин, например программных моментов в шарнирах. В случае абсолютно твердых звеньев уравнение динамики механической системы манипулятора, записанное в форме уравнений Лагранжа 2-го рода, имеет вид [1, 2]

$$A(q, \xi)\ddot{q} + b(q, \dot{q}, \xi) = M; \quad q(t_0) = q_0, \dot{q}(t_0) = \dot{q}_0, t \geq t_0, \quad (1)$$

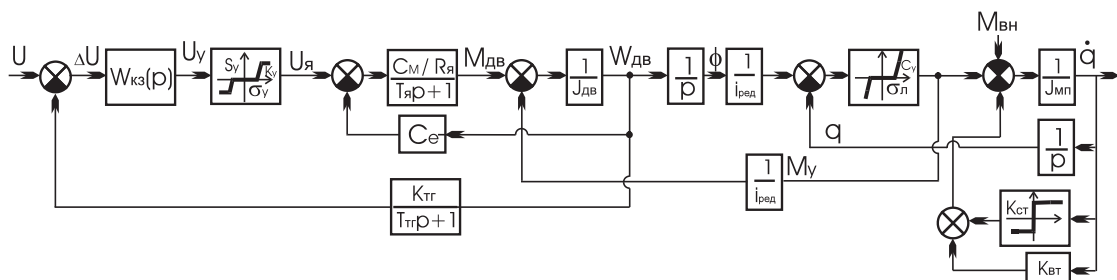
где $A(q, \xi)$ — нелинейная $n \times n$ -матричная функция; $b(q, \dot{q}, \xi)$ — нелинейная n -мерная вектор-функция, ξ — p -мерный вектор параметров манипулятора; M — n -мерный вектор обобщенных сил (как правило, моментов) в шарнирах; q_0 и \dot{q}_0 — начальные конфигурация и скорость.

Описание оператора привода W_{Drive} основано на передаточной функции, соответствующей структурной схеме на рис. 2.

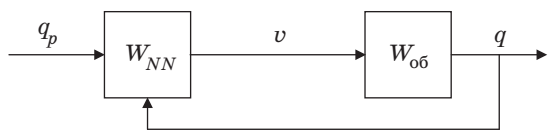
Одной из наиболее удачных форм представления управления с учетом динамики является предложенная в работах [3, 4] и основанная на определении коэффициентов уравнений Лагранжа (1) форма, позволяющая также представить в таком виде и адаптивный вариант управления за счет идентификации p -мерного вектора параметров манипулятора ξ :

$$M_s = A(q, \xi)[\ddot{q}_p + \Gamma_1 \Delta \dot{q} + \Gamma_0 \Delta q] + b(q, \dot{q}, \xi), \quad (2)$$

где Γ_0 и Γ_1 — $n \times n$ — гурвицевы (устойчивые) матрицы коэффициентов усиления динамической ошибки и ее скорости; $\Delta q = q(t) - q_p(t)$ и $\Delta \dot{q} = \dot{q}(t) - \dot{q}_p(t)$. Обозначим оператор такого алгоритма W_{Adapt} .



■ Рис. 2. Структурная схема привода манипулятора



■ Рис. 3. Классическая схема НС-управления

Существует классическая схема НС управления, т. е. применения НС в качестве всей СУ в виде оператора W_{NN} (рис. 3) [6–9].

Если в схеме (см. рис. 1) оператор СУ $W_{СУ}$ проектируется с помощью классических методов теории управления (инженерные методы Зиглера–Никольса, частотные методы, модальное проектирование регуляторов) [10], то НС СУ W_{NN} создается в результате обучения.

Первый шаг в разработке НС СУ состоит в выборе типа и структуры НС (например, перцептрона, линейной НС, НС обратного распространения ошибки [6, 8, 9]). Затем выбранная структура НС формирует свои реальные параметры с помощью обучения. Обучение может осуществляться разнообразными методами, среди которых можно выделить два главных класса — обучение с учителем или без учителя, и наиболее популярным в настоящее время является обучение с помощью градиентного алгоритма обратного распространения ошибки [6].

Один цикл процедуры обучения заключается в подаче выбранного репрезентативного множества входных сигналов на НС, получении соответствующих выходов в результате математического моделирования процесса прохождения сигнала через НС, сравнении полученных выходов с желаемыми с формированием ошибки рассогласования. Наконец, в подаче этой ошибки в структуру НС для перенастройки ее параметров — коэффициентов усиления и аддитивных добавок.

В настоящей работе предложена несколько иная схема НС СУ. Она подсказана уже упоминавшимся фактом, что имеются эффективные алгоритмы моментного управления, основанные на уравнениях динамики объекта управления (управление на основе концепции обратных задач динамики). В то же время имеются большие проблемы описания обратного уравнения привода, т. е. определения входного сигнала, необходимого для создания желаемого момента на выходе привода.

Разобьем СУ на две компоненты, одна из которых $u = W_{Adapt}$ осуществляет вычисление необходимого адаптивного стабилизирующего управляющего момента, сформированного на основе концепции обратных задач динамики [3, 4], а другая, $W_{Drive, NN}$, является НС-регулятором, формирующим входной сигнал на привод манипулятора, необходимый для создания полученного управляющего момента [6]:

$$v = W_{Drive, NN} W_{Adapt} \cdot \quad (3)$$

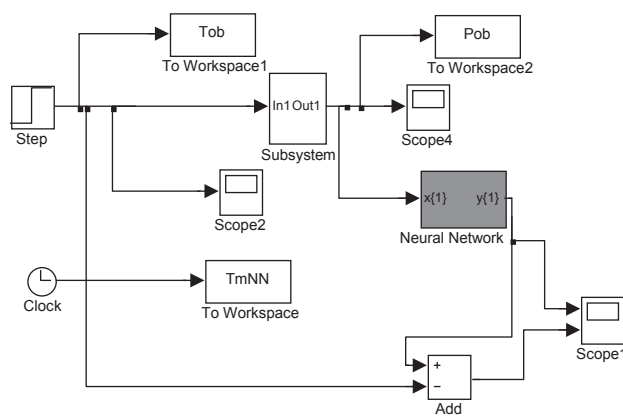
Тогда оператор всей СУ равен произведению операторов моментного адаптивного управления и НС-управления приводом: $W_{Control} = W_{Drive, NN} \times W_{Adapt}$.

Экспериментальные исследования

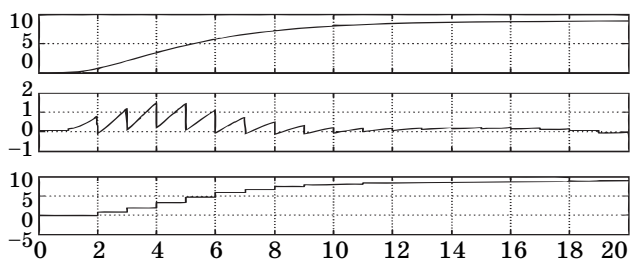
Обратимся теперь к вопросу выбора, обучения и использования НС СУ для конкретного манипулятора, в качестве которого выберем привод одной степени разработанного в ЦНИИ РТК космического манипулятора. Рассмотрим тип и структуру НС, реализацию ее в системе инженерных расчетов MatLab, обучение и эксперименты. Структура моделирующей программы состоит из головного модуля Control_Adapt_NN.m, который последовательно вызывает функции, реализующие отдельные элементы схемы.

Начнем с определения набора данных для обучения управляющей НС, представленной оператором $W_{Drive, NN}$. Для этого производим функцией `sim('Drive')` математическое моделирование созданной в MatLab/Simulink математической модели привода Drive.mdl, представленного структурной схемой на рис. 2. Для создания репрезентативной подборки обучающих данных, которые позволят удовлетворительно настроить параметры НС, необходимо на вход привода подать достаточно богатое множество входных сигналов, включающее типовые ступенчатые, линейные и гармонические сигналы.

Далее средствами MatLab создается та или иная НС. В нашем случае в результате анализа была выбрана НС net функцией `net = newff` в виде многослойного перцептрона (4-слойного, с двумя входами), которая далее была обучена функцией `train` и представлена в среде Simulink функцией `gensim`. В целом в среде Simulink процесс создания НС СУ представляется схемой на рис. 4.



■ Рис. 4. Схема создания НС СУ

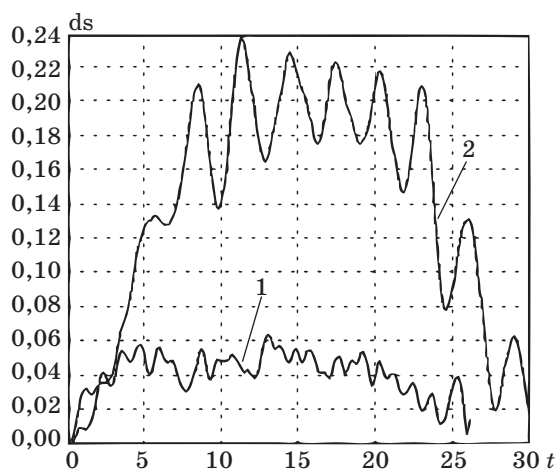


■ Рис. 5. Результаты функционирования НС СУ привода

Результат обучения НС представлен на рис. 5: выход с привода Drive, ошибка момента $\Delta M = M - u$ и выход с НС Neural Network. Видно, что значение ошибки составило порядка 10 % в начале процесса стабилизации и плавно ушло к 0 далее. Такая малая ошибка стабилизирующего момента позволяет получить очень маленькую динамическую ошибку координаты на траектории.

Далее необходимо в среде MatLab создать адаптивный алгоритм управления вида (2). Поскольку в среде программирования Delphi имелась функция, реализующая такой алгоритм даже в реальном времени [11], то был выбран способ реализации посредством вызова в MatLab S-функции, являющейся функцией адаптивного алгоритма в Delphi.

Результат стабилизации программной траектории перехода из точки в точку с трапециевидным изменением скорости представлен на рис. 6. Здесь приведены графики ошибки для обычного позиционного управления при отслеживании про-



■ Рис. 6. Результат функционирования адаптивной НС СУ манипулятора: 1 — S-алгоритм; 2 — PM-алгоритм

граммной траектории (PM-алгоритм) и рассматриваемого адаптивной НС СУ (S-алгоритм).

Заключение

Создание адаптивных систем сервоуправления высокого качества трудно реализуется в рамках классических подходов. Предложенный подход открывает возможность для более гибкого проектирования СУ роботов и манипуляторов за счет привлечения интеллектуальных технологий, в данном случае НС, на нижнем уровне СУ.

Литература

1. Пол Р. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора. — М.: Наука, 1976. — 103 с.
2. Попов Е. П., Верещагин А. Ф., Зенкевич С. Л. Манипуляционные роботы: динамика и алгоритмы. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1978. — 400 с.
3. Тимофеев А. В., Экало Ю. В. Устойчивость и стабилизация программных движений робота-манипулятора // Автоматика и телемеханика. 1976. № 10. С. 149–156.
4. Козлов В. В., Макарычев В. П., Тимофеев А. В., Юревич Е. И. Динамика управления роботами / Под ред. Е. И. Юревича. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. — 336 с.
5. Крутько П. Д. Управление исполнительными системами роботов. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. — 336 с.
6. Омату С., Халид М., Юсоф З. Нейроуправление и его приложения. — М.: ИПРЖР, 2000. — 272 с.
7. Пупков К. А., Егупов Н. Д. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / МГТУ им. Н. Э. Баумана. — М., 2001. — 744 с.
8. Чернодуб А. Н., Дзюба Д. А. Обзор методов нейроуправления. http://ailen.org/wp-content/uploads/2011/08/2011_NeuroControl_Survey.pdf, (дата обращения: 27.02.2012).
9. Hagan M. T., Demuth H. B. Neural Networks for Control // Proc. of the American Control Conf. San Diego, USA, 1999. Vol. 3. P. 1642–1656.
10. Первозванский А. А. Курс теории автоматического управления. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. — 616 с.
11. Макарычев В. П., Юревич Е. И. Супервизорное управление космическими манипуляторами. — СПб.: Астерион, 2005. — 108 с.