

УДК 004.896

MSC: 93-10; 70E60; 93C85

DOI:10.35330/1991-6639-2020-4-96-11-17

МЕТОД РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ ПАЛЬЦА БИОНИЧЕСКОГО ПРОТЕЗА КИСТИ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОЙ НЕЙРО-НЕЧЕТКОЙ СИСТЕМЫ ВЫВОДА (ANFIS)

Э.Ш. МАЛЬЦЕВА, М.А. ШЕРЕУЖЕВ

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

(МГТУ им. Баумана)

105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1

E-mail: bauman@bmstu.ru

Одной из наиболее важных проблем в области кинематики и управления роботами является поиск решения обратной задачи кинематики. Традиционные методы, такие как геометрические, итеративные и алгебраические, не всегда подходят. В этой статье используется адаптивный нейро-нечеткий логический вывод ANFIS, позволяющий выводить решение обратной задачи кинематики для механизма пальца антропоморфной бионической кисти, который структурно представим в виде плоского трехзвенного манипулятора с двумя независимыми степенями свободы.

Ключевые слова: манипулятор, обратная задача кинематики, ANFIS, обучающая выборка, тестовая выборка.

ВВЕДЕНИЕ

Кинематический анализ, в рамках которого решаются прямая и обратная позиционные задачи кинематики, является основным этапом проектирования сложных протезов верхних и нижних конечностей. Прямая задача кинематики (ПЗК) позволяет получить координаты положения и ориентации концевой эффектора в пространстве для заданного набора обобщенных координат, причем решение ПЗК всегда единственно и сложности не представляет. Обратная задача кинематики (ОЗК) позволяет получить набор обобщенных координат при заданных желаемых координатах положения и ориентации концевой эффектора в пространстве. Полученное решение ОЗК позволяет далее формировать управляющие сигналы исполнительных приводов для обеспечения перемещения звеньев механизма. Однако решение ОЗК осложнено тем, что в ряде случаев оно может иметь несколько решений (когда одному и тому же положению и ориентации итоговой системы координат (СК) относительно базовой СК может соответствовать несколько разных наборов значений координат звеньев), бесчисленное множество решений (в случае присутствия сингулярных конфигураций) или не иметь ни одного (связано с ограничением рабочей зоны) [1]. Помимо алгебраических [2], геометрических и итеративных методов [3] решения ОЗК, существуют способы получения однозначного решения обратной задачи с использованием нейронных сетей [4], а также адаптивной нейро-нечеткой системы вывода ANFIS [5].

ANFIS – это нечеткая продукционная сеть, обладающая возможностью параметрической оптимизации нечетких правил (параметров функций принадлежности, активационных функций, весов связей) на основе алгоритмов обучения (подобных алгоритмам обучения обычных нейронных сетей, например, алгоритму обратного распространения ошибки) и использования экспериментальных данных (обучающей выборки). Сеть реализует

нечеткий логический вывод типа Такаги – Сугено [6]. Применение адаптивной нейро-нечеткой системы вывода позволит избежать сложностей, возникающих при использовании традиционных методов решения ОЗК.

Цель настоящей статьи: разработать адаптивную нейро-нечеткую систему вывода с целью получения однозначного решения ОЗК механизма пальца бионического протеза кисти, которое в дальнейшем позволит определить законы движения исполнительных приводов механизма, зная требуемое положение конца дистальной фаланги пальца.

Задачи: разработать сеть ANFIS, создать обучающие выборки, провести обучение сети, проверить точность полученных данных.

АРХИТЕКТУРА СЕТИ ANFIS

Предположим, что база правил содержит два правила:

Правило 1: Если x_1 есть A_1 и y_1 есть B_1 , то $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$.

Правило 2: Если x_1 есть A_2 и y_1 есть B_2 , то $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$.

Тогда соответствующая сеть ANFIS принимает следующую архитектуру, которую принято обозначать 5-слоистой структурой:

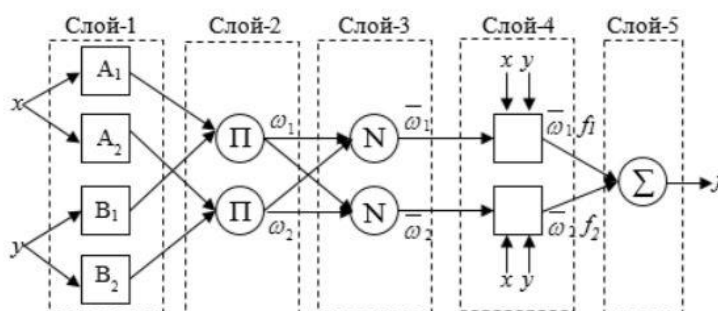


Рис. 1. Архитектура сети ANFIS

Слой 1. В узлах данного слоя происходит процедура фаззификации. Определяются нечеткие термы для входных параметров. Входами слоя служат четкие переменные x, y . Выходами слоя являются значения функций принадлежности $\mu_A(x)$ и $\mu_B(y)$. Каждый узел слоя является адаптивным.

Слой 2. Определяет посылки нечетких правил. Данный слой – неадаптивный. Каждый узел соединен с теми узлами первого слоя, которые формируют предпосылки соответствующего правила. Элементы слоя выполняют агрегирование степеней истинности предпосылок каждого правила в соответствии с операцией *T-нормы*, в качестве которой может выступать операция минимума:

$$\alpha_i = \text{sup}\{ \min[\mu_A(x)T\mu_B(x, y)] \}.$$

Выходами нейронов этого слоя являются степени истинности посылок каждого правила базы знаний системы.

Слой 3. Осуществляет нормализацию уровней активации правил. Неадаптивные узлы этого слоя рассчитывают относительную степень (вес) выполнения нечеткого правила по формуле:

$$\beta_i = \frac{\alpha_i}{\sum \alpha_i}, i = 1 \dots n.$$

Слой 4. В этом слое реализуется модель нечеткого логического вывода Такаги – Сугено. Данный узел является адаптивным. Здесь вычисляются значения заключений по каждому правилу:

$$O_i = \beta_i f_i = \beta_i * (p_i x + q_i y + r_i),$$

где p_i, q_i, r_i – параметры заключений.

Слой 5. Единственный неадаптивный узел этого слоя вычисляет окончательное значение на выходе ANFIS путем суммирования результатов в предыдущем слое:

$$y = \frac{\sum \beta_i f_i}{\sum \beta_i}.$$

В процессе обучения происходит настройка параметров предпосылок и параметров заключений, при этом существуют различные методы для настройки параметров. В данной статье используется гибридный метод обучения – комбинация метода градиентного спуска и метода наименьших квадратов [7]. На первом этапе параметры предпосылок фиксированы и настраиваются параметры заключений методом наименьших квадратов. На втором этапе фиксируются параметры заключений и уточняются параметры предпосылок методом градиентного спуска.

СОЗДАНИЕ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ

Нейро-нечеткий логический вывод ANFIS разрабатывается для управления исполнительными приводами в сочленениях плоского трехзвенного манипулятора, чем структурно является палец антропоморфной бионической кисти, звенья которого последовательно связаны между собой кинематическими парами 5-го класса, образуя открытую (незамкнутую) линейную кинематическую цепь (рис. 2). Манипулятор оснащен двумя независимыми степенями подвижности: $\theta_{MCPf} = \theta_1$ и $\theta_{PIP} = \theta_2$, третье звено $\theta_{DIP} = \theta_3$ приводится в действие пассивно, через передачу. Латеральным вращением θ_{MCPa} пренебрегаем.

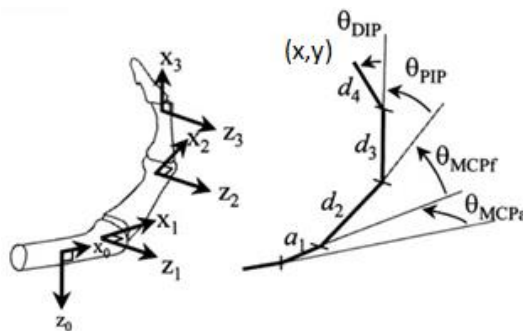


Рис. 2. Кинематическая цепь пальца

В качестве обобщенных координат принимаются углы поворота звеньев:

$$q = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}.$$

Для создания обучающих выборок используются зависимости, получаемые в результате решения прямой задачи кинематики, а именно:

$$\begin{aligned} x &= L_1 \cos(\theta_1) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3), \\ y &= L_1 \sin(\theta_1) + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3), \\ \theta &= (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3). \end{aligned}$$

Для вывода обратной кинематики плоского трехзвенного манипулятора разрабатываются две сети ANFIS – по одной на каждую независимую степень подвижности, поэтому формируем в качестве обучающей выборки кортежи вида $\{x, y, \theta_1\}$ и $\{x, y, \theta_2\}$, где (x, y) являются входными переменными и соответствуют координатам желаемого расположения конца плоского манипулятора, θ_i выступает в роли выходной переменной.

В процессе обучения сеть ANFIS учится сопоставлять координаты (x, y) с углами θ_i .

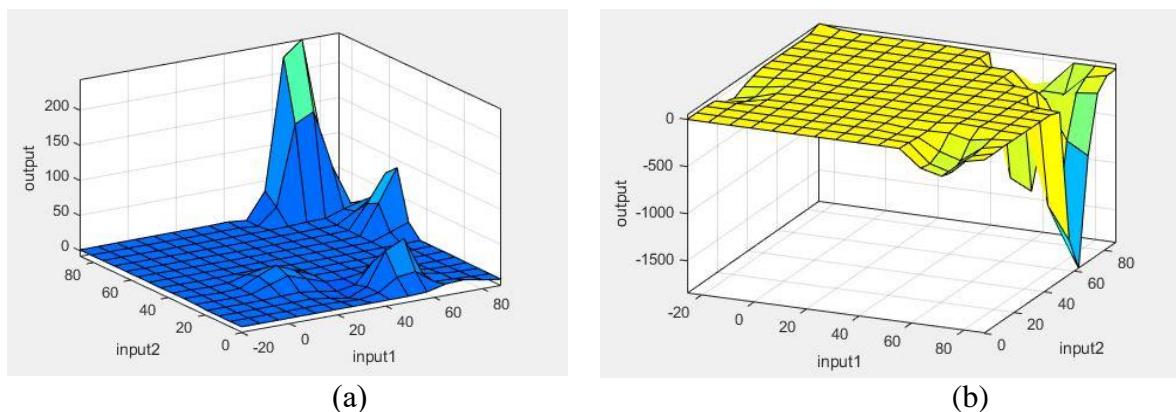


Рис. 3. Тренировочные данные для углов (a) θ_1 и (b) θ_2

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Сети ANFIS разрабатываются с помощью пакета расширения MATLAB Neuro – Fuzzy Designer.

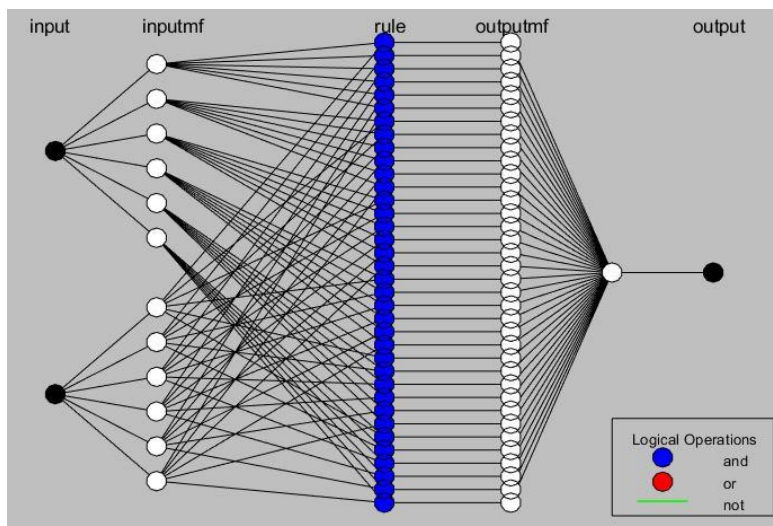


Рис. 4. Архитектура ANFIS

Архитектура обеих сетей идентична, каждой входной переменной соответствует по шесть функций принадлежности гауссового типа.

Обучение производится по гибриднему алгоритму, как отмечалось ранее. Параметры алгоритма: количество итераций – 1500, допустимая ошибка обучения – 0. Ниже представлен процесс обучения двух сетей.

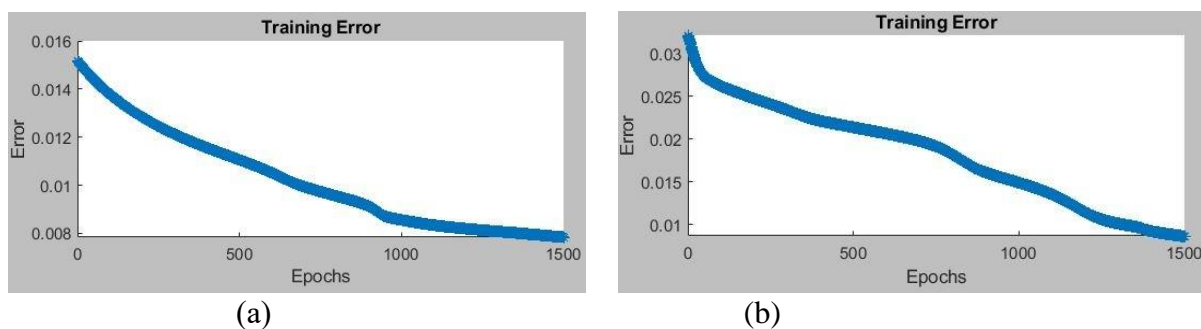


Рис. 5. Процесс обучения сетей (а) ANFIS для θ_1 и (б) для θ_2

На рисунке 6 представлено отклонение между требуемым значением углов θ_1 и θ_2 , полученных при решении ОЗК геометрическим методом, и результатом ANFIS.

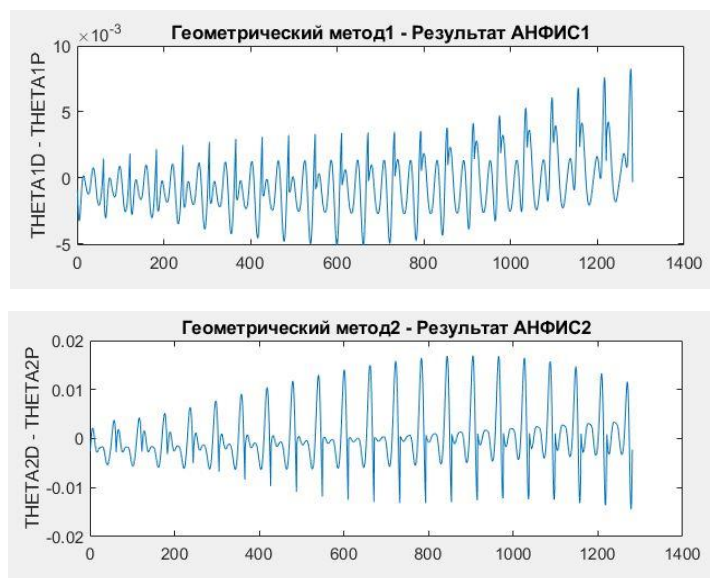


Рис. 6. Валидация полученных данных от сетей ANFIS

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной статьи была разработана адаптивная нейро-нечеткая система вывода (ANFIS) для двух степеней подвижности механизма пальца бионического протеза кисти, предназначенная для вывода решения ОЗК, т.е. получения величин обобщенных координат θ_1, θ_2 по известным значениям координат конца плоского манипулятора или, в нашем случае, конца дистальной фаланги пальца (x, y). Полученные значения углов поворота звеньев θ_1, θ_2 позволяют далее формировать управляющие сигналы, обрабатываемые исполнительными приводами устройства. Проверка геометрическим методом показала, что величина ошибки, возникающая при обучении сети, имеет приемлемую величину.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лесков А.Г., Бажинова К.В., Селиверстова Е.В. Кинематика и динамика исполнительных механизмов манипуляционных роботов: учебное пособие. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 104 с.
2. Iliukhin V.N., Mitkovskii K.B., Bizyanova D.A., Akopyan A.A. The modeling of inverse kinematics for 5 DOF manipulator // Procedia Eng. 2017. № 176. Pp. 498-505.

3. *Korein J.U., Balder N.I.* Techniques for generating the goal-directed motion of articulated structures // *IEEE Computer Graphics and Applications*. 1982. № 2(9). Pp. 71-81.
4. *Sreenivas Tejomurtula, Subhash Kak.* Inverse kinematics in robotics using neural networks // *Information Sciences*, 1999. № 116. Pp. 147-164.
5. *Alavandar S., Nigam M.J.* Neuro-Fuzzy based Approach for Inverse Kinematics Solution of Industrial Robot Manipulators // *International Journal of Computers Communications & Control*. 2008. № 3. Pp. 224-234.
6. *Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С.* Нечеткие модели и сети. 2-е изд., стереотип. М.: Гор. линия-Телеком, 2012. 284 с.
7. *Jang J.-S.R.* ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1993. May/June, 23(3). Pp. 665-685.

REFERENCES

1. *Leskov A.G., K.V. Bazhinova, Seliverstova E.V.* *Kinematika i dinamika ispolnitel'nykh mekhanizmov manipulyatsionnykh robotov: uchebnoye posobiye* [Kinematic and Dynamic of Manipulation Robots: handbook]. Moscow: Izd. MSTU Bauman, 2017. 104 p.
2. *Pliukhin V.N., Mitkovskii K.B., Bizyanova D.A., Akopyan A.A.* The modeling of inverse kinematics for 5 DOF manipulator // *Procedia Eng.* 2017. № 176. Pp. 498-505.
3. *Korein J.U., Balder N.I.* Techniques for generating the goal-directed motion of articulated structures // *IEEE Computer Graphics and Applications*. 1982. № 2(9). Pp. 71-81.
4. *Sreenivas Tejomurtula, Subhash Kak.* Inverse kinematics in robotics using neural networks // *Information Sciences*, 1999. № 116. Pp. 147-164.
5. *Alavandar S., Nigam M.J.* Neuro-Fuzzy based Approach for Inverse Kinematics Solution of Industrial Robot Manipulators // *International Journal of Computers Communications & Control*. 2008. № 3. Pp. 224-234.
6. *Borisov V.V., Kруглов V.V., Fedulov A.S.* *Nechetkiye modeli i seti. 2-e izd., stereotip.* [Fuzzy models and Networks. 2 edition., stereotip]. М.: Gorjachaja liniya – Telekom, 2012. 284 p.
7. *Jang J.-S.R.* ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1993. May/June, 23(3). Pp. 665-685.

A FINGER INVERSE KINEMATICS SOLUTION METHOD FOR A BIONIC PROSTHETIC HAND BASED ON ADAPTIVE NEURO – FUZZY INFERENCE SYSTEM (ANFIS)

E.Sh. MALTSEVA, M.A. SHEREUZHEV

Bauman Moscow State Technical University (BMSTU)
105005, Moscow, st. 2nd Baumanskaya, 5, bldg. 1
E-mail: bauman@bmstu.ru

One of the most important problems in robot kinematics and control is finding the solution of inverse kinematics. Traditional methods such as geometric, iterative and algebraic are inadequate if the joint structure of the manipulator is complex. This article uses Adaptive Network-based Fuzzy Inference System (ANFIS), which allows to find a solution for a finger inverse kinematics of a bionic prosthetic hand which can be represented as a three – link planar manipulator with two independent degrees of freedom.

Keywords: manipulator, inverse kinematics, ANFIS, training data, testing data.

Работа поступила 16.07.2020 г.

Сведения об авторах:

Мальцева Эльмира Шукурановна, студентка кафедры «Робототехнические системы и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, НУК «Специальное машиностроение».

105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1.

Тел. 8-966-057-63-47.

E-mail: elliottt.m@yandex.ru

Шереужев Мадин Артурович, ассистент кафедры «Робототехнические системы и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, НУК «Специальное машиностроение».

105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1.

Тел. 8-968-794-54-71.

E-mail: shereuzhev@bmstu.ru

Information about the authors:

Maltseva Elmira Shukuranovna, student of the Moscow State Technical University N.E. Bauman, NUK "Special Mechanical Engineering", Department of Robotic Systems and Mechatronics.

105005, Moscow, 2nd Baumanskaya street, 5, bldg. 1.

Ph. 8-966-057-63-47.

E-mail: elliottt.m@yandex.ru

Shereuzhev Madin Arturovich, assistant of the Department of the Moscow State Technical University N.E. Bauman, NUK "Special Mechanical Engineering", Department of Robotic Systems and Mechatronics.

105005, Moscow, 2nd Baumanskaya street, 5, bldg. 1.

Ph. 8-968-794-54-71.

E-mail: shereuzhev@bmstu.ru