

УДК 681.515

Шульгин С.К., кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО Луганский государственный университет имени Владимира Даля.

Синепольский Д.О., старший преподаватель, ФГБОУ ВО Луганский государственный университет имени Владимира Даля.

Макогон В.В., ассистент, ФГБОУ ВО Луганский государственный университет имени Владимира Даля.

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВО АДЕКВАТНОСТИ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЕРЕНОСНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПОДВИЖНОСТИ МАНИПУЛЯТОРА

Аннотация: Рассмотрено применение статистических методов доказательства адекватности в приложении к нейросетевой модели манипулятора. Построена модель кинематики манипулятора с применением матричного метода Денавита-Хартенберга. Сформирована обучающая выборка путем решения прямой задачи кинематики. Выбрана структура и выполнено обучение нейронной сети решению обратной задачи кинематики. С помощью метода оценки распределения остатков доказана адекватность полученной нейросетевой модели первоначальной модели кинематики на основе трансцендентных уравнений.

Ключевые слова: КПМИС «Стартовый», нейронная сеть, нейросетевая модель, метода Денавита-Хартенберга, прямая и обратная задачи кинематики, метод остатков, критерий Пирсона.

Введение

Двумя основными задачами в робототехнике являются прямая и обратная задачи кинематики. Прямая задача кинематики состоит в определении положения точки схвата манипулятора в зависимости от параметров вектора его обобщенных координат, а решение обратной задачи заключается в определении параметров вектора обобщенных координат манипулятора в зависимости от значений координат точки схвата манипулятора [1]. Таким образом, решение прямой задачи говорит о том, где будет находиться рабочий орган манипулятора, при заданных углах его суставов, а обратная задача — как нужно «вывернуться» манипулятору, чтобы его рабочий орган оказался в заданном положении. При решении задачи

управления положением звеньев и ориентацией рабочего инструмента манипулятора возникает необходимость решения обратной задачи кинематики.

Большинство существующих на сегодняшнее время аналитических подходов для решения обратной задачи кинематики представляют собой достаточно затратные с точки зрения вычислительных процедур алгоритмы [2]. Альтернативным подходом к решению обратной задачи кинематики является использование искусственных нейронных сетей [3,4,5].

Целью работы является решение задачи доказательства адекватности модели кинематики манипулятора, реализованного на базе робототехнического комплекта «Конструктор программируемых моделей инженерных систем (Стартовый)», представленной в виде искусственной нейронной сети модели манипулятора, описываемой системой нелинейных трансцендентных уравнений, полученных в результате применения матричного метода описания кинематики манипулятора, предложенного И. Денавитом и Р. Хартенбергом.

Предмет исследования – использование технологий искусственных нейронных сетей в задачах компьютерного моделирования объектов робототехники.

В качестве объекта исследования в работе используется кинематическая модель исполнительной кинематической цепи переносных степеней подвижности манипулятора на базе робототехнического комплекта «Конструктор программируемых моделей инженерных систем (Стартовый)».

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие задачи:

1. Построить модель кинематики исполнительной кинематической цепи переносных степеней подвижности манипулятора на базе робототехнического комплекта «Конструктор программируемых моделей инженерных систем (Стартовый)», путем применения матричного метода описания кинематики Денавита-Хартенберга.

2. Сформировать путем решения прямой задачи кинематики по уравнениям, полученным в результате применения матричного метода описания кинематики Денавита-Хартенберга, обучающую выборку значений координат точки третьего звена исполнительной кинематической цепи переносных степеней подвижности манипулятора на базе робототехнического комплекта «Конструктор программируемых моделей инженерных систем (Стартовый)» для обучения искусственной нейронной сети.

3. Выбрать структуру искусственной нейронной сети для описания кинематики исполнительной кинематической цепи переносных степеней подвижности манипулятора на базе робототехнического комплекта «Конструктор программируемых моделей инженерных систем (Стартовый)».

4. На основе сформированной обучающей выборки обучить выбранную искусственную нейронную сеть решению обратной задачи кинематики для исполнительной кинематической цепи переносных степеней подвижности манипулятора на базе робототехнического комплекта «Конструктор программируемых моделей инженерных систем (Стартовый)».

5. Используя метод оценки распределения остатков [6] доказать адекватность модели кинематики, представленной в виде системы нелинейных трансцендентных уравнений модели кинематики, представленной в виде искусственной нейронной сети.

Исполнительная кинематическая цепь переносных степеней подвижности манипулятора на базе робототехнического комплекта «Конструктор программируемых моделей инженерных систем (Стартовый)» представляет собой последовательное соединение одного неподвижного и двух подвижных вращательных кинематических пар пятого класса, каждой из которых соответствуют обобщённые координаты: $\theta_1, \theta_2, \theta_3$. Параметры рассматриваемой кинематической цепи представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Параметры исполнительной кинематической цепи переносных степеней
подвижности манипулятора

Кинем. Пара (i-1,i)	Тип кинем. Пары	Номер i-го звена	θ_i	S_i	A_i	α_i
(0,1)	Вращат.	1	θ_1^{var}	$S_1 = l_1$	0	$\pi / 2$
(1,2)	Вращат.	2	θ_2^{var}	0	$a_2 = l_2$	0
(2,3)	Вращат.	3	θ_3^{var}	0	$a_3 = l_3$	$\pi / 2$

В результате применения матричного метода описания кинематики манипулятора, предложенного Денавитом и Хартенбергом, используя данные, приведенные в таблице 1 была получена система нелинейных трансцендентных уравнений, описывающая кинематику рассматриваемой исполнительной кинематической цепи переносных степеней подвижности манипулятора на базе робототехнического комплекта «Конструктор программируемых моделей инженерных систем (Стартовый)» (1).

$$\begin{cases} X(p) = \cos(\theta_1) \cdot (a_3 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cdot \cos(\theta_2)); \\ Y(p) = \sin(\theta_1) \cdot (a_3 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cdot \cos(\theta_2)); \\ Z(p) = S_1 + a_3 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cdot \sin(\theta_2), \end{cases} \quad (1)$$

где

S_1 – длина первого звена исполнительной кинематической цепи;

a_2 – длина второго звена исполнительной кинематической цепи;

a_3 – длина второго звена исполнительной кинематической цепи.

Для формирования обучающей выборки, была решена прямая задача кинематики рассматриваемой исполнительной кинематической цепи переносных степеней подвижности манипулятора на базе робототехнического комплекта «Конструктор программируемых моделей инженерных систем (Стартовый)» для 25000 точек положения точки третьего звена исполнительной кинематической цепи и, соответственно, получены значения вектора обобщенных координат исполнительной кинематической цепи,

характеризующих положение каждой из кинематических пар, соответствующих каждой из рассматриваемых точек.

В качестве обучаемой искусственной нейронной сети была выбрана двухслойная нейронная сеть типа 70-3, с активационной функцией типа гиперболический тангенс в первом слое и линейной активационной функцией во втором слое. Входным сигналом обучаемой нейронной сети служил вектор обобщенных координат исполнительный кинематической цепи переносных степеней подвижности манипулятора на базе робототехнического комплекта «Конструктор программируемых моделей инженерных систем (Стартовый)» для 25000 точек положения точки третьего звена исполнительный кинематической цепи, а целевым вектором — соответствующий вектор координат точки третьего звена рассматриваемой исполнительный кинематической цепи. Обучение искусственной нейронной сети составило 600 эпох. В результате, значение отклонения составило $9,2 \cdot 10^{-5}$.

Таким образом, полученная искусственная нейронная сеть способна осуществлять решение обратной задачи кинематики для положения точки третьего звена исполнительный кинематической цепи переносных степеней подвижности манипулятора на базе робототехнического комплекта «Конструктор программируемых моделей инженерных систем (Стартовый)».

С целью доказательства адекватности полученной модели кинематики манипулятора, представленной в виде искусственной нейронной сети модели кинематики, представленной системой нелинейных трансцендентных уравнений (1) в работе был применен метод оценки распределения остатков [6], представляющих собой разности между значениями обобщенных координат, полученных в результате решения системы (1) и искусственной нейронной сетью, по нормальному закону.

Гипотеза H_0 : огибающие кривые отображают нормальный закон распределения. Для принятия нулевой гипотезы H_0 о распределении остатков по нормальному закону, свидетельствующий об адекватности нейросетевой модели кинематики была сформирована выборка положений точки третьего звена

исполнительной кинематической цепи переносных степеней подвижности манипулятора на базе робототехнического комплекта «Конструктор программируемых моделей инженерных систем (Стартовый)», соответствующих повороту первого звена на 90^0 с последующим опусканием третьего звена рассматриваемой исполнительной кинематической цепи (таб. 2).

Таблица 2.

Положение точки третьего звена исполнительной кинематической цепи
переносных степеней подвижности

№ п/п	X	Y	Z
1	0	120	180
2	13	120	180
3	15	120	180
4	27	119	180
5	35	118	180
6	42	117	180
7	55	105	180
8	63	104	180
9	75	89	180
10	80	87	180
11	82	83	180
12	91	78	180
13	95	70	180
14	110	47	180
15	112	32	180
16	113	28	180
17	115	25	180
18	117	20	180
19	118	10	180
20	119	8	180
21	120	2	180
22	0	30	62
23	0	37	62
24	0	40	60
25	0	45	64
26	0	50	65
27	0	53	68
28	0	61	70

№ п/п	X	Y	Z
29	0	66	74
30	0	71	76
31	0	73	81
32	0	82	83
33	0	82	87
34	0	87	90
35	0	88	95
36	0	99	100
37	0	102	101
38	0	105	102
39	0	106	108
40	0	107	110
41	0	108	117
42	0	112	120
43	0	113	127
44	0	116	130
45	0	115	138
46	0	117	140
47	0	118	145
48	0	121	150
49	0	122	158
50	0	123	160
51	0	124	168
52	0	128	170
53	0	126	177
54	0	125	180
55	0	125	188
56	0	124	190
57	0	121	198
58	0	120	200
59	0	119	208
60	0	118	210
61	0	115	219
62	0	112	220

Гипотеза H_0 : огибающие кривые отображают нормальный закон распределения. Так как объем выборки $N = 62 > 30$, то для проверки нулевой гипотезы применим χ^2 – критерий Пирсона [7] (табл. 3).

Таблица 3.

Проверка по критерию χ^2

Координата	X	Y	Z
Выборочная статистика χ^2	10,75	11,86	7,28
Число степеней свободы	9	8	8
Уровень значимости	0,05	0,05	0,05
Критическая точка χ^2 – распределения $\chi^2_{крит}$	16,92	14,067	15,51

Так как во всех случаях $\chi^2 < \chi^2_{крит}$, то гипотеза о выбранном теоретическом нормальном законе распределения, отображаемом огибающими кривыми, согласуется с опытными данными, т.е. гипотеза принимается при соответствующих уровнях значимости [7]. Следовательно, остатки распределены по нормальному закону, что указывает на адекватность нейросетевой модели кинематики исполнительный кинематической цепи переносных степеней подвижности манипулятора на базе робототехнического комплекта «Конструктор программируемых моделей инженерных систем (Стартовый)» модели кинематики, представленной системой нелинейных трансцендентных уравнений, полученных в результате применения матричного метода описания кинематики манипулятора, предложенного Денавитом и Хартенбергом.

Выводы

1) Получена система нелинейных трансцендентных уравнений, описывающая кинематику рассматриваемой исполнительный кинематической цепи.

2) Для нейросетевой была выбрана двухслойная нейронная сеть типа 70-3, с активационной функцией типа гиперболический тангенс в первом слое и линейной активационной функцией во втором слое и проведено обучение на выборке в 25000 комбинациях выводного вектора и вектора координат полученных путем решения прямой задачи кинематики.

3) Обучение искусственной нейронной сети составило 600 эпох. В результате, значение отклонения составило $9,2 \cdot 10^{-5}$.

4) Путем применения критерия Пирсона было показано, что распределение остатков, представляющих собой разности между полученными решениями с помощью нейросетевой модели и с использованием трансцендентных уравнений, соответствует нормальному закону распределения.

5) Таким образом, нейросетевая модель кинематики исполнительской кинематической цепи переносных степеней подвижности манипулятора адекватна модели кинематики, представленной системой нелинейных трансцендентных уравнений, полученных в результате применения матричного метода Денавита-Хартенберга.

Список использованных источников

1. Шахинпур М. Курс робототехники. – М.: Мир, 1990. – 527 с.
2. Фу, Кинсан. Робототехника : пер. с англ. / К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли; пер. А. А. Сорокин, А. В. Градецкий, М. Ю. Рачков ; ред. В. Г. Градецкий. - Москва : Мир, 1989. - 621 с.
3. R. Koker : “A genetic algorithm approach to a neural-network-based inverse kinematics solution of robotic manipulators based on error minimization,” Information Sciences, Vol. 222, pp. 528–543, 2013.
4. A.V. Duka : «Neural network based inverse kinematics solution for trajectory tracking of a robotic arm» Procedia Technology, Vol. 12, pp. 20–27, 2014.
5. Y. Maeda, T. Fujiwara and H. Ito : «Robot control using high dimensional neural networks» Procs. of SICE Annual Conference 2014, pp. 738–743, 2014.
6. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 350 с.
7. Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи – М.: Наука, 1973 – 900 с.

Shulgin S.K., candidate of technical Sciences, assistant professor, Lugansk State University named after Vladimir Dahl,

Sinepolsky D.O., senior Lecturer, Lugansk State University named after Vladimir Dahl.

Makogon V.V., assistant, Lugansk State University named after Vladimir Dahl.

STATISTICAL PROOF OF THE ADEQUACY OF THE NEURAL NETWORK MODEL OF THE EXECUTIVE KINEMATIC CHAIN OF THE MANIPULATOR TRANSPORTABLE DEGREES OF MOBILITY

Abstract: The application of statistical methods for proving adequacy in the application to the neural network model of the manipulator is considered. The model of the manipulator kinematics is constructed using the matrix Denavit-Hartenberg method. The training sample is formed by solving the direct kinematics problem. The structure is selected and the neural network is trained to solve the inverse kinematics problem. Using the method for estimating the distribution of residuals, the adequacy of the resulting neural network model to the original kinematics model based on transcendental equations is proven.

Key words: KPMIS "Starter", neural network, neural network model, Denavit-Hartenberg method, direct and inverse problems of kinematics, residual method, Pearson criterion.

УДК 004.4'2

Юрков В.А., старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»

Юрков Д.А., доцент, ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»

Горбунов В.А., ассистент, ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИАГРАММЫ АКТИВНОСТИ В ПРОЦЕССЕ РАЗРАБОТКИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Аннотация: Рассматриваются различные аспекты использования диаграммы активности при разработке информационной системы. Проанализированы различные возможности использования данного инструмента, даны общие рекомендации для его эффективного использования.