УДК 681.53

DOI 10.35211/1990-5297-2021-9-256-42-48

*Е. А. Марчук^{1,2}, А. В. Малолетов^{1,2}***РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ANFIS-РЕГУЛЯТОРА
ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ОТКЛОНЕНИЙ МОБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ
ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ТРОСОВОГО РОБОТА***¹ Университет Иннополис² Волгоградский государственный технический университет

e.marchuk@innopolis.ru

В статье описывается разработка нейросетевого регулятора с нечеткой логикой (ANFIS-регулятор), обеспечивающего компенсацию отклонений мобильной платформы параллельного тросового робота посредством корректировки длины вытравленного троса. Производится оценка качества регулирования по критерию величины удлинения тросов в сравнении с заданными значениями.

Ключевые слова: нечеткая логика, нейронная сеть, тросовый робот.

*Е. А. Marchuk^{1,2}, A. V. Maloletov^{1,2}***DESIGN AND MODELING OF ANFIS REGULATOR TO COMPENSATE
DEVIATIONS OF MOBILE PLATFORM OF PARALLEL CABLE-DRIVEN ROBOT**¹ Innopolis University² Volgograd State Technical University

The article deals with a description of design and modeling of neuro-fuzzy regulator (ANFIS) which provides a compensation of deviations of mobile platform of parallel cable-driven robot. The regulator uses adjusting of lengths of unwounded cables. Evaluation of the control system has been made according to the quality criterion as an elongation of each cable comparatively to given values.

Keywords: fuzzy logic, neural network, cable-driven robot.

Введение

Тросовые роботы представляют собой параллельные механизмы, в которых перемещение рабочего инструмента или полезной нагрузки осуществляется посредством натяжения тросов, как правило, наматываемых на барабаны лебедок с электроприводом. Параллельные тросовые роботы могут использоваться в качестве мобильных строительных комплексов, в стационарных объектах в составе радиотелескопов, в устройствах для перемещения видеокамер на спортивных мероприятиях, в качестве движителей подвижных платформ обучающих и развлекательных комплексов [1], [2]. Подробное описание параллельных тросовых роботов приводится в работах [3], [4].

Тросовые роботы обладают свойством масштабируемости. Но, поскольку конструктивные элементы параллельных тросовых роботов не обладают достаточной жесткостью в связи с особенностями конструкционных материалов, в крупногабаритных роботах с линейными размерами в десятки метров деформации элементов приобретают характер проблемы. Деформациям подвергаются как несущие части кон-

струкции робота (каркас, башни, мачты), так и сами тросы. С точки зрения механики тросы в общем случае обладают конструктивной нелинейностью, связанной с возможностью работы троса только на растяжение, но не на сжатие, и геометрической нелинейностью, связанной со способностью троса к провисанию. В настоящем исследовании рассматривается проблема упругой деформации тросов и связанная с ней проблема отклонений мобильной платформы (рабочего инструмента) робота от заданного положения. Предлагается компенсировать линейные и угловые отклонения платформы посредством включения в модель робота нейронечеткого регулятора натяжения тросов. Исследования по нейросетевому, нечеткому и нейронечеткому управлению тросовыми роботами приводятся в работах [5–9]. Предлагаемый регулятор разрабатывается в редакторе ANFIS программного пакета Matlab [10].

Параллельный тросовый робот

В настоящей работе рассматривается математическая модель тросового робота с принятием конструктивной и исключением геометри-

ческой нелинейности через рассмотрение тросовой системы как стержневой системы с односторонними связями [11].

За основу взята модель роботизированного строительного комплекса Университета Иннополис, который представляет собой восьмитросовый параллельный робот (рис. 1). Несущие тросы робота обозначены цифрами 1, 2, 3, 4, регулировочные – 5, 6, 7, 8. Основная нагрузка на растяжение под действием силы тяжести в основном приходится на несущие тросы. На регулировочные тросы приходится нагрузка, связанная с управлением ориентацией платформы. Модели тросов как упругих деформируемых твердых тел определяют колебательный характер движения системы. Поскольку масса каждого троса высоконагруженного тросового ро-

бота мала в сравнении с массой полезной нагрузки, закрепленной на тросах, тросы можно считать невесомыми. В настоящей работе в математической модели тросы представляются невесомыми упругими стержнями.

В компактной матричной форме уравнение динамики параллельного тросового робота имеет вид:

$$M\ddot{q} - D\dot{q} + g_c = w_p + A^T f,$$

где M – матрица масс; D – матрица затухания; q – вектор обобщенных координат; g_c – фактор воздействия центростремительной и кориолисовой сил; w_p – динамический винт внешних сил; A^T – транспонированная матрица Якоби; f – вектор сил натяжений в тросах.

Рис. 1. Модель строительного роботизированного комплекса Университета Иннополис

Компьютерное моделирование восьмитросового параллельного робота показывает, что при движении мобильной платформы в объеме рабочего пространства робота происходят ее отклонения от заданного положения по линейным и угловым координатам [12]. Отклонения мобильной платформы происходят по причине растяжения тросов. В данной модели тросы рассматриваются как вязкоупругие тела, характеристики которых изменяются в зависимости от изменения длины вытравленного участка троса [12]. Сила натяжения каждого троса на-

ходится в соответствии с законом Гука, принимая во внимание изменение коэффициента жесткости троса в зависимости от длины троса, ненамотанного на барабан лебедки.

Концепция регулятора

Предполагается управление подачей каждого отдельного троса отдельным регулятором. На вход регулятора подаются линейные координаты заданного положения центра масс мобильной платформы, первые производные линейных координат центра масс по времени, де-

формация троса (находится при известном коэффициенте жесткости по показаниям тензометрического датчика) и первая производная деформация троса по времени. На выходе регулятора – величина, на которую должна быть уменьшена заданная длина троса для того, чтобы обеспечить требуемую длину троса после растяжения. Учитывая вязкоупругие свойства троса, регулятор должен гасить продольные колебания троса.

Величина, на которую должна быть уменьшена заданная длина троса, определяется следующим образом: груз массой m подвешен на упругом элементе длиной l_1 с жесткостью k_1 ; на упругий элемент действует сила, определяемая законом Гука, и упругий элемент растягивается на Δx_1 ; для того, чтобы обеспечить положение груза на заданном уровне l_1 с учетом растяжения упругого элемента Δx_2 , необходимо укоротить упругий элемент до длины $l_1 - \Delta x_2$, при этом коэффициент жесткости упругого элемента изменится и будет равен k_2 ; после элементарных преобразований находим $\Delta x_2 = \frac{\Delta x_1 l_1}{\Delta x_1 + l_1}$ или $\Delta x_2 = \frac{F_1 l_1}{F_1 + ES}$, где F_1 – сила натяжения троса; E – модуль упругости материала троса, S – площадь поперечного сечения троса.

Далее рассматриваются примеры для двух функциональных типов тросов восьмитросового параллельного робота: несущего (1-й трос) и регулирующего (5-й трос). Несущий трос рассматривается под действием растягивающего усилия, регулирующий трос рассматривается при отсутствии растягивающего усилия. Условия выбраны таким образом, чтобы продемонстрировать работу регуляторов с характерными нелинейностями системы.

Моделирование регулятора

В соответствии с рекомендациями использования редактора ANFIS в случае использования более 4–5 входов в регулятор, следует применять операцию построения нейронечеткой сети subtractive clustering [10]. В рассматриваемом случае вектор входных параметров регулятора содержит восемь параметров: три декартовых координаты центра масс мобильной платформы, производные по времени от них, деформацию троса и ее производную по времени. Формирование обучающей выборки для нейро-

нечеткой сети было реализовано путем моделирования движения платформы на основе разработанной динамической модели. Проведенная оценка показала, что для обучения сети достаточно сформировать $\approx 500\,000$ примеров. Для обучающего набора данных из девяти столбцов (восемь входных параметров + один выходной) и 100 000 строк время построения нечеткой нейросети с настройками по умолчанию занимает приблизительно 40 минут при использовании ЭВМ Intel Core i-5 8265U, 16 Gb RAM.

Планирование траекторий обучающей выборки осуществлялось на основании следующего подхода. Были заданы границы рабочей области и пройдены траектории, обеспечивающие симметрию обучающей выборки в рабочем пространстве робота. После нескольких проходов по траекториям на основании собранной обучающей выборки производилось формирование и обучение искусственной нейронной сети, оценивалась ошибка регулятора при проходе по траекториям, не входящим в обучающую выборку. При неудовлетворительном качестве регулирования в обучающую выборку добавлялись дополнительные симметричные траектории, и процесс формирования, обучения и оценки повторялся. Опытным путем был определен набор траекторий, формирующий набор данных, обеспечивающий качественное обучение искусственной нейронной сети.

Визуализация обучающей выборки инструментом Fuzzy Clustering пакета Fuzzy Logic Toolbox показана на рис. 2.

Рис. 2. Визуализация обучающей выборки с помощью инструмента Fuzzy Clustering пакета Fuzzy Logic Toolbox

Нейронная сеть, построенная в редакторе ANFIS, имеет структуру, показанную на рис. 3. База правил нечеткой структуры формируется

автоматически на основе обучающей выборки (рис. 4). Поверхность нечетких правил приводится на рис. 5.

Рис. 3. Структура искусственной нейронной сети регулятора 1-го троса

Рис. 4. База правил нечеткой структуры регулятора 1-го троса

Рис. 5. Поверхность нечетких правил регулятора 1-го троса

Рис. 6. Ошибка по критерию RMSE регулятора 1-го троса

Траектории, используемые в обучающей выборке, обеспечивают обучение нейронной сети

с нечеткой логикой с ошибкой выходного значения 10^{-5} – 10^{-4} м по критерию среднеквадратичной ошибки (RMSE). Такая точность удовлетворяет поставленной цели. Пример значения ошибки выхода нейронной сети после обучения приводится на рис. 6.

Пример обработки нейросетью входных данных, входящих в диапазон, но не включенных в обучающую выборку, приводится на рис. 7.

Рис. 7. Тестирование выходного значения нейронной сети регулятора 1-го троса

На рис. 8 показан пример моделирования для 1-го троса восьмитросового робота при прямолинейном движении мобильной платформы из некоторой точки А (6.03, 7.54, 3.15) в точку В (–7.10, –5.25, 3.15). Линия 1 – удлинение троса без регулирования; линия 2 – изменение длины троса в сравнении с заданным значением в процессе регулирования; линия 3 – управляющее воздействие регулятора.

Рис. 8. Удлинение 1-го троса в процессе движения мобильной платформы из А (6.03, 7.54, 3.15) в В (–7.10, –5.25, 3.15)

Аналогичным образом производится сбор обучающих наборов данных и обучение нейросетевого регулятора с нечеткой логикой для 5-го троса. Результаты приводятся ниже.

Рис. 9. Поверхность нечетких правил регулятора 5-го троса

Рис. 10. Тестирование выходного значения нейронной сети регулятора 5-го троса

На рис. 11 показан пример для 5-го троса восьмитросового робота при прямолинейном движении мобильной платформы из некоторой точки $A (-8.00, -5.00, 2.00)$ в точку $B (-5.00, -8.00, 2.00)$. Трос находится в ненагруженном состоянии. Линия 1 – удлинение троса без регулирования; линия 2 (скрыта) – управляющее

Рис. 11. Удлинение 5-го троса в процессе движения мобильной платформы из $A (-8.00, -5.00, 2.00)$ в $B (-5.00, -8.00, 2.00)$

воздействие регулятора; линия 3 – изменение длины троса в сравнении с заданным значением под управлением нейронечеткого регулятора.

Выводы

В настоящем исследовании рассмотрены случаи для двух типов тросов восьмитросового параллельного робота: несущего (1-й трос) и регулирующего (5-й трос). Наиболее выражено конструктивная нелинейность проявляется в регулирующих тросах, поскольку несущие

тросы почти всегда испытывают сильную растягивающую нагрузку.

При обучении нейронечеткого регулятора были сделаны следующие выводы:

- 1) нечеткая система обеспечивает с хорошей точностью позиционирование при вводе обучающего набора данных для траекторий, лежащих на сетке со стороной квадрата 2 м;
- 2) искусственная нейронная сеть с хорошей точностью аппроксимирует конструктивную нелинейность тросов;

3) имеющиеся погрешности в целом удовлетворяют требуемой точности.

Разработанный и обученный нейросетевой регулятор с нечеткой логикой обеспечивает регулирование длины троса в математической модели тросового робота, при линейных размерах каждого измерения робота порядка $1.5 \cdot 2 \times 10^1$ м, с отклонениями от заданного значения длины не более 2×10^{-3} м при отклонениях в отсутствие регулирования до 2×10^{-2} м.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Rodriguez, M.* Parallel Cable Robotics for Improving Maintenance and Logistics of Large-Scale Products. – Tecnia, 2013.
2. *Zi, B.* Design, Analysis and Control of Cable-Suspended Parallel Robots and Its Applications / B. Zi, S. Qian. – Springer, 2017.
3. *Pott, A.* Cable-Driven Parallel Robots : Theory and Application. – Springer, 2018.
4. *Merlet, J.-P.* Parallel robots (Second Edition). – Springer, 2006.
5. *Марчук, Е. А.* FUZZY-управление гибридным re-конфигурируемым тросовым роботом / Е. А. Марчук, А. В. Малолетов // Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / под общ. ред. Т. Н. Можаровой. – Орел, 2020. – С. 362–366.
6. Deep Learning with Transfer Learning Method for Error Compensation of Cable-Driven Robot / A. Akhmetzyanov, M. Rassabin, A. Maloletov, M. Fadeev, A. Klimchik // *Icinco 2020 – Proceedings of the 17th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics.* – С. 553–564.
7. *Ahouee, R. A.* Neuro-Fuzzy Intelligent Control Algorithm for Cable-Driven Robots with Elastic Cables / Reihaneh Amiri Ahouee, Seyed Zeinolabedin Moussavi, Jahanbakhsh Hamed / *International Symposium on Computer Science and Intelligent Controls (ISCSIC), 2017, Volume: 1.* – P. 57–62.
8. On the Design of the Robust Neuro-Adaptive Controller for Cable-driven Parallel Robots / M. H. Barhaghtalab, H. Bayani, A. Nabaei, H. Zarrabi, A. Amiri // *Automatika, 57:3.* – P. 724–735, DOI: 10.7305/automatika.2017.02.1793.
9. *Heidari, M.* Using artificial neural network for forward kinematic problem of under-constrained cable robots / Mohammad Heidari, Seyed Mohammad Reza Faritus, Stanford Shateyi // *Journal of Vibroengineering.* Vol. 20, Issue 1. – 2018. – P. 385–400. <https://doi.org/10.21595/jve.2017.18633/>
10. Fuzzy Logic Toolbox Users Guide R2018a. – MathWorks, 2018.
11. *Марчук, Е. А.* К вопросу включения функций активации в дифференциальные уравнения динамики тросовых роботизированных систем / Е. А. Марчук, Я. В. Калинин // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 2. – С. 44–48.
12. *Marchuk, E.* Mathematical Model of Eight-Cable-Driven Parallel Robot / E. Marchuk, Ya. Kalinin, A. Maloletov // *Nonlinearity, Information, Robotics, 2021.*