

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.865.8

Гибридные нейроаналитические технологии в управлении движением многозвенных механизмов

П.Е. Ганин, Д.В. Шилин, В.В. Рыкунов

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Hybrid neuro-analytical approaches for motion control of multi-link mechanisms

P.E. Ganin, D.V. Shilin, V.V. Rykunov

National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

Решена задача синтеза унифицированной системы управления движением стационарных многозвенных манипуляционных механизмов с последовательной кинематической цепью. Разработана система управления, которая обеспечивает решение прямой и обратной задач кинематики многозвенного манипуляционного механизма в реальном времени. В качестве основного предложения выступает гибридный метод решения обратной задачи кинематики, основанный на синергетической интеграции аппарата нечетких нейронных сетей и классических итерационных численных методов, что гарантирует достижение заданной точности позиционирования в строгих временных рамках. Продемонстрирована принципиальная возможность адаптации алгоритмического программного обеспечения и архитектуры системы управления в целом для ее применения к манипуляторам различной кинематической конфигурации многозвенных механизмов. Модификация итерационного алгоритма уточнения решения обратной задачи кинематики в окрестности приближенных значений, генерируемых нечеткой нейронной сетью, позволяет существенно повысить вычислительную производительность при сохранении контроля над точностью. Архитектура системы управления предусматривает декомпозицию на иерархические уровни: выделение подсистемы низкоуровневого управления исполнительными устройствами (сервоприводами, энкодерами и др.) в независимый контур, что повышает надежность и безопасность эксплуатации манипулятора.

EDN: OHHUVX, <https://elibrary/ohhuvx>

Ключевые слова: обратная задача кинематики, нечеткая нейронная сеть, гибридный алгоритм, итерационное уточнение, манипуляционный механизм, система управления

This paper addresses the problem of synthesizing a unified control system for the motion of stationary multi-link serial-chain manipulators. The developed real-time control system provides solutions to the forward and inverse kinematics problems for a multi-link manipulator in real-time. The core contribution is a hybrid method for solving the inverse kinematics problem, based on the synergistic integration of fuzzy neural networks and classical iterative numerical methods. This approach guarantees the achievement of the

required positioning accuracy within strict time constraints. The fundamental feasibility of adapting the algorithmic software and the overall control system architecture for use with manipulators of different kinematic configurations is demonstrated. A modification of the iterative solution refinement algorithm, operating in the vicinity of approximate values generated by the of fuzzy neural network, significantly enhances computational performance while maintaining accuracy control. The control system architecture is hierarchically decomposed: the subsystem for low-level control of actuators (servo drives, encoders, etc.) is isolated into an independent loop, which improves the manipulator's operational reliability and safety.

EDN: OHHUVX, <https://elibrary/ohhuvx>

Keywords: inverse kinematics, fuzzy neural network, hybrid algorithm, iterative refinement, manipulator, control system

Пространственные манипуляционные механизмы с последовательной кинематической цепью (далее ММ) занимают доминирующее положение в современной робототехнике. Теоретический и методологический фундаменты для разработки и управления указанными механизмами заложен трудами таких выдающихся отечественных исследователей, как И.И. Артоболевский [1], С.Л. Зенкевич [2], М.З. Коловский [3], Ф.Л. Черноусько [4] и Е.И. Юревич [5], а также зарубежными учеными, среди которых Дж. Денавит, Р.С. Хартенберг [6, 7], Ф.К. Парк [8–11], Х.-Й. Ли [12–14], А.П. Морган [15], Д.Л. Пайпер [16].

Процесс проектирования систем управления (СУ) движением ММ сопряжен с необходимостью разрешения фундаментального противоречия между требованиями по обеспечению высокой точности позиционирования и максимального быстродействия. Существенное усложнение синтеза СУ также обусловлено высокой размерностью математических моделей, описываемых системами нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка, для которых зачастую не существует замкнутого аналитического решения.

Ввиду перечисленных проблем становится приоритетной разработка алгоритмов адаптивных (самообучающихся) алгоритмов, способных автоматически подстраиваться под изменяющиеся условия. Одним из приоритетных направлений в этой области стали искусственные нейронные сети, так как они обладают достаточными возможностями по адаптации для решения задач кинематики и динамики многозвенных ММ.

Важнейшее преимущество нейросетевых подходов перед традиционными аналитическими методами заключается в их универсальности: они не требуют построения строгих и чрезвы-

чайно сложных нелинейных аналитических зависимостей для каждой конкретной кинематической схемы ММ. Эта гибкость открывает путь к созданию универсальных СУ, способных к адаптации для работы с манипуляторами разной конструкции, что подтверждают исследования В.М. Лохина, И.М. Макарова [17, 18], А. Геза [19, 20], Х. Хашимото [21], А.С. Морриса [22] и Б.К. Накры [23].

Следующим этапом стала разработка гибридных методов на основе интеграции нейросетевых алгоритмов и нечеткой логики, приведшая к созданию нечетких нейронных сетей (ННС). Теоретическая универсальность ННС, доказанная Б. Коско [24], в сочетании с высоким быстродействием делает их перспективными для СУ многозвенными ММ в реальном времени. Компенсация присущих ННС погрешностей достигается гибридизацией с численными методами (например, итерационной коррекцией), что позволяет синтезировать СУ с оптимальным соотношением точности и скорости для ММ с большим числом звеньев.

Цель работы — синтез гибридного алгоритма решения обратной задачи кинематики (ОЗК) многозвенных ММ, обеспечивающего заданную точность позиционирования при выполнении требований реального времени за счет интеграции ННС и модифицированного итерационного метода уточнения.

Предметная область. В основе исследования лежит ММ (рис. 1), где первое звено закреплено на неподвижном основании (опорной стойке), а конечное звено перемещает рабочий орган (РО) — захватное устройство. Кинематика рассматриваемого механизма описывается системой уравнений, связывающей обобщенные координаты (углы поворота в сочленениях $Q_0, Q_1, \dots, Q_k$) с координатами

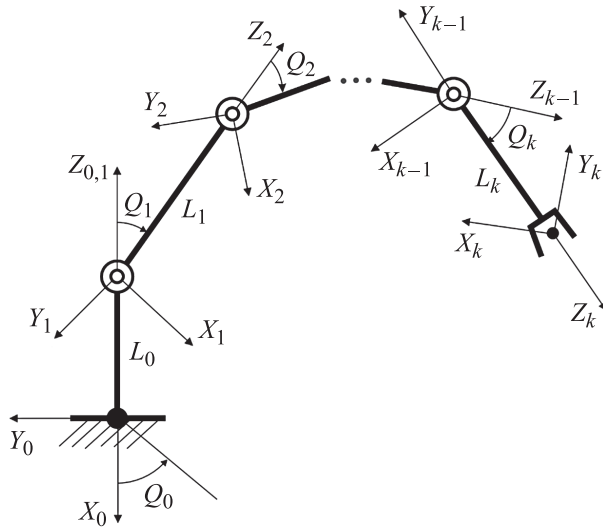


Рис. 1. Кинематическая схема ММ

положения РО (x_k, y_k, z_k) в базовой системе координат следующим образом:

$$\begin{cases} x_k = \left[\sum_{l=1}^k \left(L_l \sin \sum_{i=1}^l Q_i \right) \right] \cos Q_0; \\ y_k = \left[\sum_{l=1}^k \left(L_l \sin \sum_{i=1}^l Q_i \right) \right] \sin Q_0; \\ z_k = L_0 + \sum_{l=1}^k \left(L_l \cos \sum_{i=1}^l Q_i \right), \end{cases}$$

где k — количество звеньев, участвующих в движении; L_i — длина i -го звена; Q_l — угол поворота в l -м сочленении; L_0 — высота опорной стойки.

Для компактного описания преобразований координат использован формализм Дена-Хартенберга. Например, для плоского трехзвенного ММ однородная матрица преобразования имеет вид

$${}^0_3[T] = \begin{pmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & L_1 c_1 + L_2 c_{12} + L_3 c_{123} \\ s_{123} & c_{123} & 0 & L_0 + L_1 s_1 + L_2 s_{12} + L_3 s_{123} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где

$$\begin{aligned} c_{123} &= \cos(Q_1 + Q_2 + Q_3); \quad s_{123} = \sin(Q_1 + Q_2 + Q_3); \\ c_1 &= \cos Q_1; \quad c_{12} = \cos(Q_1 + Q_2); \quad s_1 = \sin Q_1; \\ s_{12} &= \sin(Q_1 + Q_2). \end{aligned}$$

Архитектура гибридного алгоритма решения обратной задачи кинематики (ОЗК). Блок-схема предложенного гибридного алгоритма решения ОЗК приведена на рис. 2. Алгоритм включает в себя следующие шаги:

- проверка заданного требуемого положения РО многозвенного ММ $(x, y, z)_T$ на принадлежность к рабочей области;

- поступление векторов верифицированных и текущих координат на вход ансамбля обученных адаптивных ННС ($\text{ННС}_1, \dots, \text{ННС}_k$), количество которых соответствует числу степеней подвижности; ННС формируют начальное приближение для углов $(Q_0, \dots, Q_k)_{\text{ННС}}$;

- вычисление текущего положения РО путем решения прямой задачи кинематики $f_{\text{п.з.к}}(Q_0, \dots, Q_k)_{\text{ННС}}$ и определение погрешности $\Delta d_{\text{ННС}}$ — евклидово расстояние между заданной и полученной с помощью ННС точками;

- сравнение погрешности с допустимым значением $\Delta d_{\text{ННС max}}$: если погрешность превышает $\Delta d_{\text{ННС max}}$, то решение передается на блок итерационного уточнения на основе модифицированного метода Ньютона (метода касательных); итерационный процесс продолжается до достижения требуемой точности, результатом является уточненный вектор углов $\mathbf{Q}_p$;

- создание с помощью уточненного вектора углов $\mathbf{Q}_p$ управляющих воздействий в контуре подчиненного регулирования (пропорционально-интегральный и пропорционально-интегрально-дифференциальный регуляторы), обеспечивающего точное отслеживание заданных углов сервоприводами.

- формирование в процессе работы системы буфера коррекции Buf , содержащего пары $\{(x, y, z)_p, \mathbf{Q}_p\}$, используемые для непосредственной адаптации параметров ННС без перестройки их структуры.

Численные итерационные методы характеризуются высокой вычислительной сложностью и значительным количеством итераций для достижения заданной точности. Основное преимущество предложенного подхода, заключающегося в предварительном расчете обобщенных координат с помощью ННС с последующим итерационным уточнением, состоит в существенном повышении быстродействия алгоритма при сохранении контролируемого уровня точности.

Поскольку в некоторых случаях нейросетевые методы не обеспечивают столь же высокую точность результатов, как итерационные, представляется целесообразным их гибридное использование. Предложенный алгоритм комбинирует достоинства обоих методов: высокую скорость аппроксимации ННС и прецизионную точность итерационных процедур. Данная ком-

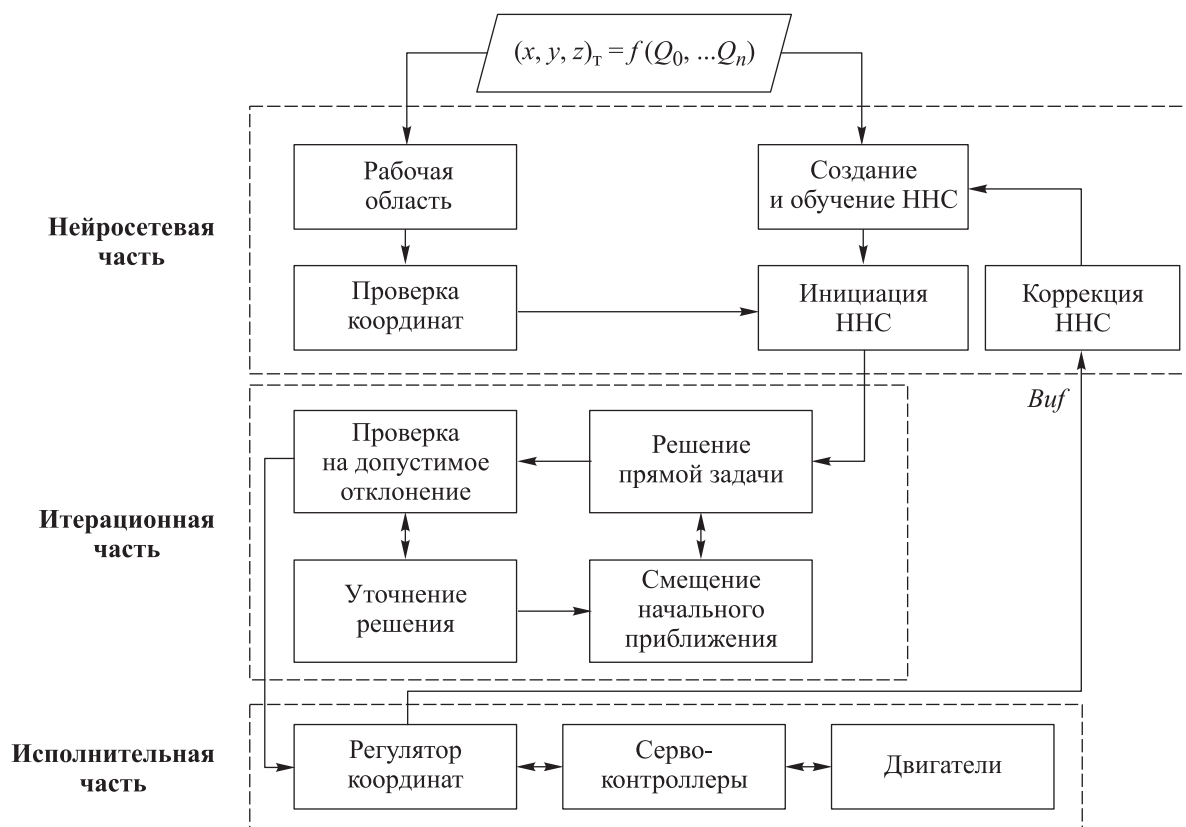


Рис. 2. Блок-схема гибридного алгоритма решения ОЗК

бинация позволяет минимизировать количество требуемых итераций, что ведет к сокращению времени вычислений.

Кроме того, применение ННС обеспечивает свойство адаптивности, что позволяет создавать унифицированные СУ движением ММ, пригодные для применения в различных приложениях.

В то же время генерация данных и обучение ННС являются ресурсоемкими процессами. Для решения задач кинематики многосвязных механизмов формирование репрезентативной обучающей выборки требует значительных вычислительных затрат. Согласно результатам исследований [25–27], выбор ННС обоснован их способностью достигать удовлетворительной точности аппроксимации при меньшем объеме обучающих данных, чем у традиционных нейронных сетей, а также возможностью адаптации в процессе функционирования без необходимости структурной перестройки сети.

Модификация итерационного алгоритма уточнения. Для повышения надежности сходимости итерационного процесса предложена

модификация, заключающаяся в введении процедуры стохастического смещения начального приближения, получаемого от ННС, в случае попадания в область локального минимума:

$$\Delta r_{nN_c} = ks_{nN_c} Q_{n\max} (1 - 2f_{rand}),$$

где N_c — номер попытки смещения; ks_{nN_c} — адаптивный коэффициент смещения; $Q_{n\max}$ — физическое ограничение для угла в n -м сочленении; f_{rand} — функция линейного конгруэнтного метода, генерирующая псевдослучайную величину в диапазоне $0 \dots 1$.

Экспериментально установлено, что использование начального приближения от ННС критически важно для сходимости метода, в отличие от случая, когда алгоритм запускается из произвольной точки (например, $Q_1 = \dots = Q_k = 0,01$ рад), что приводит к хаотическому блужданию и сбою.

Экспериментальное исследование и оптимизация параметров ННС. Чтобы определить оптимальные параметры ННС, обеспечивающие наилучшее начальное приближение для гибридного алгоритма, проведена серия экспериментов при различных траекториях РО и

количестве звеньев ММ: 1) при движении по дуге окружности в рабочей области с вращением основания ММ с четырьмя звеньями; 2) при переносе груза из точки А в точку Б с перемещением по всем степеням подвижности ММ с пятью звеньями; 3) при смещении от минимального значения до максимального по всем степеням подвижности ММ с шестью звеньями.

Критерий оптимизации сформулирован как задача минимизации времени поиска решения при ограничении на максимальную погрешность:

$$\begin{cases} \min(t_{\text{пр}}); \\ \Delta d_{\text{ННС}} \leq \Delta d_{\text{ННС max}}, \end{cases}$$

где $t_{\text{пр}}$ — время поиска решения.

Приняты следующие ограничения, обеспечивающие работу в реальном времени: $t_{\text{пр}} \leq 5$ мс; $\Delta d_{\text{ННС max}} = 50$ мм. На рис. 3, а приведен пример решения ОЗК для шести-

звенного ММ, а на рис. 3, б — график, иллюстрирующий процесс итерационного уточнения этого решения.

Анализ результатов экспериментального исследования, приведенных в таблице, позволяет заключить следующее:

- нейросетевой гибридный алгоритм обеспечивает высокую точность позиционирования: средняя погрешность после уточнения не превышает 0,012 мм при максимальной погрешности 0,015 мм;
- время расчета решения ОЗК для одной точки траектории составляет в среднем 1,28 мс, что удовлетворяет требованиям систем реального времени (менее 5 мс);
- наличие предварительного приближения от ННС сокращает количество необходимых итераций для итерационного метода на 60...80 % относительно таковых при запуске из произвольной начальной точки, что подтверждает эффективность гибридного подхода;

Результаты экспериментального исследования

Номер эксперимента	Время			Отклонение, мм		
	на генерацию ННС, мс	на обучение ННС, с	на поиск решения, мс	Минимальное	Среднее	Максимальное
1	709,021	1402,51	1,198	5,060/0,009	12,566/0,011	14,789/0,012
2	2720,131	9302,89	1,312	4,996/0,010	22,149/0,011	32,881/0,014
3	6039,435	25 400,70	1,329	8,523/0,010	24,183/0,011	38,171/0,015

Примечание. В числителе дроби указаны значения до уточнения решения ОЗК, в знаменателе — после уточнения.

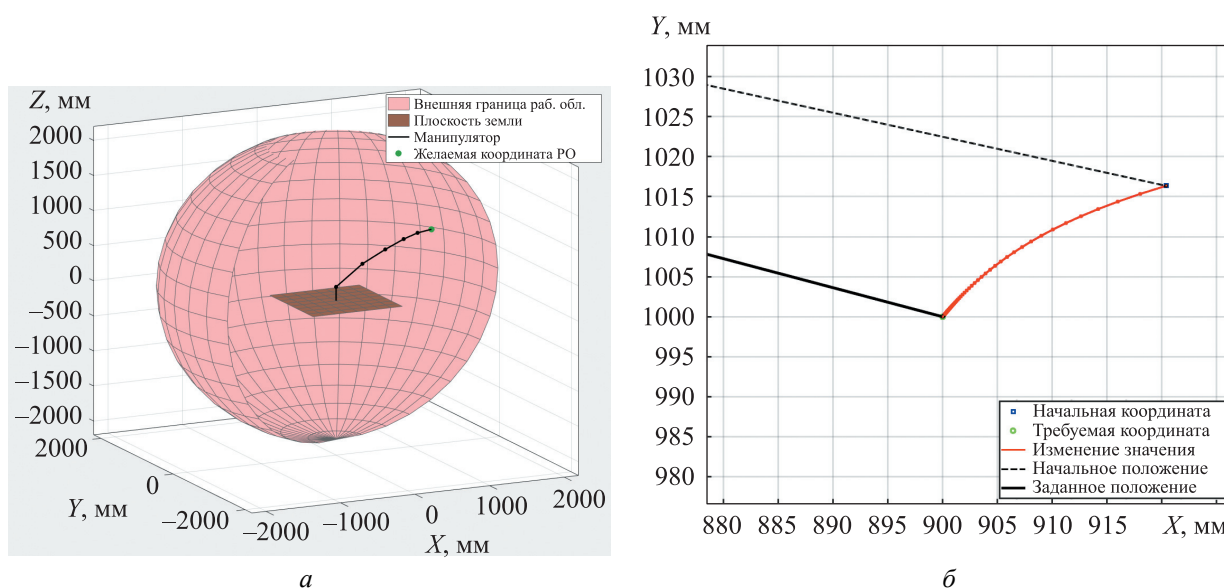


Рис. 3. Результаты решения ОЗК для шестизвенного ММ (а) и итерационного уточнения этого решения (б)

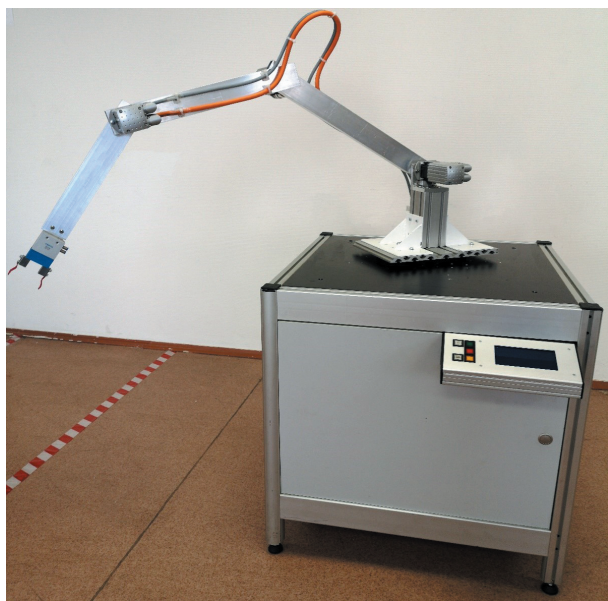


Рис. 4. Внешний вид экспериментальной установки для испытания ММ

• процедуры предварительного обучения ННС являются ресурсоемкими (до 7 ч для шестизвенной конструкции), но выполняются однократно на этапе настройки СУ.

В целях подтверждения достоверности моделирования и возможности практической реализации разработанных алгоритмов спроектирована и построена экспериментальная установка для испытания четырехзвенного ММ (рис. 4). Эксперименты с использованием этой установки подтвердили возможность реализации разработанных алгоритмов управления движением ММ.

Выводы

1. Разработана и математически описана кинематическая модель ММ, решена прямая задача кинематики и определены границы рабочей области.

2. Предложен и реализован гибридный алгоритм решения ОЗК, сочетающий скорость аппроксимации ННС и точность модифицированного итерационного метода. Доказана его эффективность для кинематически избыточных многосвязных ММ с большим количеством подвижных звеньев.

3. Для обеспечения устойчивой сходимости алгоритма итерационного уточнения предложена его модификация, использующая стохастическое смещение начального приближения внутри области, задаваемой ННС.

4. Проведена параметрическая оптимизация ННС с целью обеспечения возможности применения разработанного алгоритма в СУ движением ММ в реальном времени (время расчета не более 1,33 мс).

5. Экспериментально подтверждена применимость алгоритмов в системах реального времени, удовлетворяющих жестким требованиям по быстродействию и точности с использованием разработанной и построенной установки четырехзвенного ММ.

6. Дальнейшие исследования будут связаны с разработкой адаптивных механизмов онлайн-обучения ННС в изменяющихся условиях эксплуатации и с интеграцией алгоритмов планирования траекторий с учетом динамических ограничений.

Литература

- [1] Артоболовский И.И. *Теория механизмов и машин*. Москва, Альянс, 2011. 639 с.
- [2] Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. *Основы управления манипуляционными роботами*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 480 с.
- [3] Коловский М.З., Евграфов А.Н., Семенов Ю.А. и др. *Теория механизмов и машин*. Москва, Academia, 2006. 557 с.
- [4] Черноушко Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г. *Манипуляционные роботы*. Москва, Наука, 1989. 363 с.
- [5] Юревич Е.И. *Основы робототехники*. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2010. 359 с.
- [6] Denavit J., Hartenberg R.S. *Kinematic synthesis of linkages*. McGraw-Hill, 1964. 435 p.
- [7] Uicker J.J., Denavit J., Hartenberg R.S. An iterative method for the displacement analysis of spatial mechanisms. *J. Appl. Mech.*, 1964, vol. 31, no. 2, pp. 309–314, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3629602>
- [8] Park F.C., Kim J.W. Manipulability and singularity analysis of multiple robot systems: a geometric approach. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1998, vol. 2, pp. 1032–1037, doi: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1998.677224>

- [9] Park F.C. A coordinate-free description of robot dynamics. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1997, vol. 3, pp. 2282–2287, doi: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1997.619302>
- [10] Park F.C. Optimal robot design and differential geometry. *J. Mech. Des.*, 1995, vol. 117, no. B, pp. 87–92, doi: <https://doi.org/10.1115/1.2836475>
- [11] Park F.C. Computational aspects of the product-of-exponentials formula for robot kinematics. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1994, vol. 39, no. 3, pp. 643–647, doi: <https://doi.org/10.1109/9.280779>
- [12] Lee H.-Y., Roth B. A closed-form solution of the forward displacement analysis of a class of in-parallel mechanisms. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1993, vol. 1, pp. 720–724, doi: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1993.292063>
- [13] Lee H.-Y., Lin W., Duffy J. A method for forward displacement analysis of in-parallel platform mechanisms. *Mechatronics*, 1993, vol. 3, no. 5, pp. 659–669, doi: [https://doi.org/10.1016/0957-4158\(93\)90030-6](https://doi.org/10.1016/0957-4158(93)90030-6)
- [14] Lee H.-Y., Reinholtz C.F. Inverse kinematics of serial-chain manipulators. *J. Mech. Des.*, 1996, vol. 118, no. 3, pp. 396–404, doi: <https://doi.org/10.1115/1.2826899>
- [15] Tsai L.-W., Morgan A.P. Solving the kinematics of the most general six- and five-degree-of-freedom manipulators by continuation methods. *J. Mech., Trans., and Automation*, 1985, vol. 107, no. 2, pp. 189–200, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3258708>
- [16] Pieper D.L. *The kinematics of manipulators under computer control*. Stanford University, 1968. 157 p.
- [17] Макаров И.М., Лохин В.М., ред. *Интеллектуальные системы автоматического управления*. Москва, Физматлит, 2001. 576 с.
- [18] Макаров И.М., ред. *Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления*. Москва, Наука, 2006. 332 с.
- [19] Guez A., Eilbert J.L., Kam M. Neural network architecture for control. *IEEE Control Syst. Mag.*, 1988, vol. 8, no. 2, pp. 22–25, doi: <https://doi.org/10.1109/37.1869>
- [20] Guez A., Ahmad Z. Accelerated convergence in the inverse kinematics via multilayer feed-forward networks. *Int. Joint Conf. on Neural Networks*, 1989, vol. 2, pp. 341–344, doi: <https://doi.org/10.1109/IJCNN.1989.118720>
- [21] Hashimoto H. et al. Self-organizing visual servo system based on neural networks. *IEEE Control Syst.*, 1992, vol. 12, no. 2, pp. 31–36, doi: <https://doi.org/10.1109/37.126850>
- [22] Morris A.S., Mansor A. Finding the inverse kinematics of manipulator arm using artificial neural network with lookup table. *Robotica*, 1997, vol. 15, no. 6, pp. 617–625, doi: <https://doi.org/10.1017/S026357479700074X>
- [23] Manjaree S., Agarwal V., Nakra B.C. Kinematic analysis using neuro-fuzzy intelligent technique for robotic manipulator. *IJERT*, 2013, vol. 6, no. 4, pp. 557–562.
- [24] Kosko B. Fuzzy systems as universal approximators. *IEEE Trans. Comput.*, 1994, vol. 43, no. 11, pp. 1329–1333, doi: <https://doi.org/10.1109/12.324566>
- [25] Jha P. *Inverse kinematic analysis of robot manipulators*. PhD thesis. National Institute of Technology Rourkela, 2015. 336 p.
- [26] Jha P. Inverse kinematic solution of 5R manipulator using ANN and ANFIS. *IJRA*, 2016, vol. 4, no. 2, pp. 109–123, doi: <http://doi.org/10.11591/ijra.v4i2.pp109-123>
- [27] Park J.-K. *Inverse kinematics based on fuzzy logic and neural networks for the WAM-titan II teleoperation system*. Master's Thesis. University of Tennessee, 2007. 122 p.

References

- [1] Artobolevskiy I.I. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. Moscow, Alyans Publ., 2011. 639 p. (In Russ.).
- [2] Zenkevich S.L., Yushchenko A.S. *Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami* [Basics of control on manipulation robots]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004. 480 p. (In Russ.).
- [3] Kolovskiy M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A. et al. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. Moscow, Academia, 2006. 557 p. (In Russ.).
- [4] Chernousko F.L., Bolotnik N.N., Gradetskiy V.G. *Manipulyatsionnye roboty* [Manipulation robots]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 363 p. (In Russ.).

- [5] Yurevich E.I. *Osnovy robototekhniki* [Fundamentals of robotics]. Sankt-Peterburg, BKhV-Peterburg Publ., 2010. 359 p. (In Russ.).
- [6] Denavit J., Hartenberg R.S. *Kinematic synthesis of linkages*. McGraw-Hill, 1964. 435 p.
- [7] Uicker J.J., Denavit J., Hartenberg R.S. An iterative method for the displacement analysis of spatial mechanisms. *J. Appl. Mech.*, 1964, vol. 31, no. 2, pp. 309–314, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3629602>
- [8] Park F.C., Kim J.W. Manipulability and singularity analysis of multiple robot systems: a geometric approach. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1998, vol. 2, pp. 1032–1037, doi: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1998.677224>
- [9] Park F.C. A coordinate-free description of robot dynamics. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1997, vol. 3, pp. 2282–2287, doi: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1997.619302>
- [10] Park F.C. Optimal robot design and differential geometry. *J. Mech. Des.*, 1995, vol. 117, no. B, pp. 87–92, doi: <https://doi.org/10.1115/1.2836475>
- [11] Park F.C. Computational aspects of the product-of-exponentials formula for robot kinematics. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1994, vol. 39, no. 3, pp. 643–647, doi: <https://doi.org/10.1109/9.280779>
- [12] Lee H.-Y., Roth B. A closed-form solution of the forward displacement analysis of a class of in-parallel mechanisms. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1993, vol. 1, pp. 720–724, doi: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1993.292063>
- [13] Lee H.-Y., Lin W., Duffy J. A method for forward displacement analysis of in-parallel platform mechanisms. *Mechatronics*, 1993, vol. 3, no. 5, pp. 659–669, doi: [https://doi.org/10.1016/0957-4158\(93\)90030-6](https://doi.org/10.1016/0957-4158(93)90030-6)
- [14] Lee H.-Y., Reinholtz C.F. Inverse kinematics of serial-chain manipulators. *J. Mech. Des.*, 1996, vol. 118, no. 3, pp. 396–404, doi: <https://doi.org/10.1115/1.2826899>
- [15] Tsai L.-W., Morgan A.P. Solving the kinematics of the most general six- and five-degree-of-freedom manipulators by continuation methods. *J. Mech., Trans., and Automation*, 1985, vol. 107, no. 2, pp. 189–200, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3258708>
- [16] Pieper D.L. *The kinematics of manipulators under computer control*. Stanford University, 1968. 157 p.
- [17] Makarov I.M., Lokhin V.M., eds. *Intellektualnye sistemy avtomaticheskogo upravleniya* [Intelligent automatic control systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 576 p. (In Russ.).
- [18] Makarov I.M., ed. *Iskusstvennyy intellekt i intellektualnye sistemy upravleniya* [Artificial intelligence and intelligent control systems]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 332 p. (In Russ.).
- [19] Guez A., Eilbert J.L., Kam M. Neural network architecture for control. *IEEE Control Syst. Mag.*, 1988, vol. 8, no. 2, pp. 22–25, doi: <https://doi.org/10.1109/37.1869>
- [20] Guez A., Ahmad Z. Accelerated convergence in the inverse kinematics via multilayer feed-forward networks. *Int. Joint Conf. on Neural Networks*, 1989, vol. 2, pp. 341–344, doi: <https://doi.org/10.1109/IJCNN.1989.118720>
- [21] Hashimoto H., Kubota T., Kudou M. et al. Self-organizing visual servo system based on neural networks. *IEEE Control Syst.*, 1992, vol. 12, no. 2, pp. 31–36, doi: <https://doi.org/10.1109/37.126850>
- [22] Morris A.S., Mansor A. Finding the inverse kinematics of manipulator arm using artificial neural network with lookup table. *Robotica*, 1997, vol. 15, no. 6, pp. 617–625, doi: <https://doi.org/10.1017/S026357479700074X>
- [23] Manjaree S., Agarwal V., Nakra B.C. Kinematic analysis using neuro-fuzzy intelligent technique for robotic manipulator. *IJERT*, 2013, vol. 6, no. 4, pp. 557–562.
- [24] Kosko B. Fuzzy systems as universal approximators. *IEEE Trans. Comput.*, 1994, vol. 43, no. 11, pp. 1329–1333, doi: <https://doi.org/10.1109/12.324566>
- [25] Jha P. *Inverse kinematic analysis of robot manipulators*. PhD thesis. National Institute of Technology Rourkela, 2015. 336 p.
- [26] Jha P. Inverse kinematic solution of 5R manipulator using ANN and ANFIS. *IJRA*, 2016, vol. 4, no. 2, pp. 109–123, doi: <http://doi.org/10.11591/ijra.v4i2.pp109-123>
- [27] Park J.-K. *Inverse kinematics based on fuzzy logic and neural networks for the WAM-titan II teleoperation system*. Master's Thesis. University of Tennessee, 2007. 122 p.

Информация об авторах

ГАНИН Павел Евгеньевич — кандидат технических наук, доцент кафедры управления и интеллектуальных технологий. ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» (111250, Москва, Российская Федерация, Красноказарменная ул., д. 14, e-mail: ganinpy@mpei.ru).

ШИЛИН Денис Викторович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления и интеллектуальных технологий. ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» (111250, Москва, Российская Федерация, Красноказарменная ул., д. 14, e-mail: shilindv@mpei.ru).

РЫКУНОВ Виктор Владимирович — ассистент кафедры «управления и интеллектуальных технологий. ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» (111250, Москва, Российская Федерация, Красноказарменная ул., д. 14, e-mail: rykunovvv@mpei.ru).

Information about the authors

GANIN Pavel Evgenievich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Control and Intelligent Technologies. National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (111250, Moscow, Russian Federation, Krasnokazarmennaya St., Bldg. 14, e-mail: ganinpy@mpei.ru).

SHILIN Denis Viktorovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Control and Intelligent Technologies. National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (111250, Moscow, Russian Federation, Krasnokazarmennaya St., Bldg. 14, e-mail: shilindv@mpei.ru).

RYKUNOV Viktor Vladimirovich — Assistant, Department of Control and Intelligent Technologies. National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (111250, Moscow, Russian Federation, Krasnokazarmennaya St., Bldg. 14, e-mail: rykunovvv@mpei.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ганин П.Е., Шилин Д.В., Рыкунов В.В. Гибридные нейроаналитические технологии в управлении движением многозвенных механизмов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 6, с. 3–11.

Please cite this article in English as:

Ganin P.E., Shilin D.V., Rykunov V.V. Hybrid neuro-analytical approaches for motion control of multi-link mechanisms. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 6, pp. 3–11.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие

«Численные методы»

Авторы: А.А. Федотов, П.В. Храпов

Рассмотрены численные методы решения систем линейных алгебраических уравнений, систем нелинейных уравнений, методы приближения функций. Изложены численные методы интегрирования, решения обыкновенных дифференциальных уравнений и оптимизации. Представлены численные методы решения дифференциальных уравнений с частными производными. Рассмотрены основные понятия теории разностных схем: аппроксимация, устойчивость, сходимость. Приведены примеры постановки и численного решения задач для уравнений гиперболического, параболического и эллиптического типов.

Приведены варианты индивидуальных заданий к лабораторным работам.

Для студентов 2–4-го курсов факультетов «Фундаментальные науки», «Машиностроительные технологии», «Специальное машиностроение», «Робототехника и комплексная автоматизация» МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также для студентов других факультетов.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>