

УДК 004.852
DOI 10.17513/snt.40644

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ МАНИПУЛЯТОРА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ СВАРОЧНЫХ ТРАЕКТОРИЙ

Выборнов И.И., Пиотровский Д.Л.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Российская Федерация,
e-mail: pobinput@gmail.com*

Целью настоящей работы является разработка и исследование алгоритма адаптивного управления движением манипулятора при выполнении сварочных траекторий в пространстве. Рассматривается задача формирования управляющих воздействий, обеспечивающих точное и устойчивое следование заданному маршруту в условиях неопределенности внешних факторов и наличия погрешностей измерений. Предложен алгоритм управления, основанный на совместном использовании моделей прямой и обратной кинематики, методов нечеткой логики и рекурсивной фильтрации состояний. Решение обратной задачи кинематики позволяет определять параметры конфигурации манипулятора, необходимые для достижения требуемого положения исполнительного органа, тогда как применение нечеткой логики обеспечивает адаптивную коррекцию траектории с учетом неопределенности параметров среды и динамики системы. Для компенсации шумов измерений и случайных отклонений в координатах используется фильтр Калмана, повышающий устойчивость управления и обеспечивающий сглаживание траектории движения. Эффективность предложенного подхода исследована методом программного моделирования при выполнении сварочных траекторий различной геометрии, включая прямолинейные, наклонные и пространственные швы. Проведен анализ влияния дискретизации траектории на точность позиционирования и качество следования заданному маршруту. Полученные результаты показывают, что разработанный алгоритм обеспечивает стабильное и точное выполнение сварочных траекторий при наличии возмущений и позволяет сохранять допустимые отклонения положения исполнительного органа.

Ключевые слова: адаптивное управление, манипулятор, сварочные траектории, обратная кинематика, нечеткая логика, фильтр Калмана

ADAPTIVE CONTROL OF THE MANIPULATOR'S MOVEMENT WHEN EXECUTING WELDING TRAJECTORIES

Vybornov I.I., Piotrovskiy D.L.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"Russian Technological University", Moscow, Russian Federation,
e-mail: pobinput@gmail.com*

The aim of this work is to develop and study an algorithm for adaptive control of manipulator motion during the execution of welding trajectories in space. We consider the problem of generating control actions that ensure accurate and stable adherence to a given route under conditions of uncertainty in external factors and the presence of measurement errors. A control algorithm based on the combined use of forward and inverse kinematics models, fuzzy logic methods, and recursive state filtering is proposed. Solving the inverse kinematics problem allows us to determine the manipulator configuration parameters necessary to achieve the desired position of the actuator, while the use of fuzzy logic ensures adaptive trajectory correction taking into account the uncertainty of environmental parameters and system dynamics. To compensate for measurement noise and random deviations in coordinates, a Kalman filter is used, increasing control stability and smoothing the motion trajectory. The effectiveness of the proposed approach is studied using software simulation when executing welding trajectories of various geometries, including straight, inclined, and spatial welds. An analysis of the impact of trajectory discretization on positioning accuracy and route following quality was conducted. The results demonstrate that the developed algorithm ensures stable and accurate execution of welding trajectories in the presence of disturbances and maintains acceptable positional deviations of the actuator.

Keywords: adaptive control, manipulator, welding trajectories, inverse kinematics, fuzzy logic, Kalman filter

Введение

Автоматизация технологических операций, связанных с управлением исполнительными механизмами, требует применения алгоритмов, обеспечивающих точное позиционирование и устойчивость к внешним возмущениям [1]. При выполнении пространственных траекторий, характерных для сварочных и смежных производственных процессов, особое значение приобретают методы, позволяющие учитывать

кинематические ограничения оборудования, а также влияние случайных факторов среды [2]. В этой связи актуальной задачей является построение алгоритмов управления, способных адаптироваться к изменяющимся условиям и сохранять заданную точность движения [3].

Одним из подходов к решению данной задачи является использование моделей прямой и обратной кинематики в сочетании с методами интеллектуальной коррекции

траектории [4]. Применение нечеткой логики позволяет учитывать неопределенность входных параметров и формировать корректирующие воздействия на основе экспертных правил [5], тогда как фильтрация измерений с использованием алгоритма Калмана обеспечивает снижение влияния шумов и погрешностей сенсорных данных [6]. Совместное использование этих методов создает основу для устойчивого управления манипуляционным модулем в условиях нестабильной среды [7].

Настоящая работа посвящена исследованию комплексного алгоритма управления движением манипулятора, реализующего адаптивное следование заданной траектории в пространстве. Рассматривается структура управления, включающая решение задач кинематики, оценку внешних условий и поэтапную коррекцию положения исполнительного органа. Эффективность предложенного подхода анализируется на основе результатов моделирования различных траекторий, отличающихся геометрией и числом шагов дискретизации [8].

Цель исследования – разработка и анализ алгоритма управления манипуляционным модулем, обеспечивающего адаптивное следование заданной пространственной траектории с учетом кинематических ограничений, влияния внешних возмущений и погрешностей измерений, за счет совместного использования моделей прямой и обратной кинематики, методов нечеткой логики и фильтрации состояний.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено методом программного моделирования управления манипуляционным модулем, предназначенным для выполнения заданных пространственных траекторий. Объект управления описывается кинематической моделью, включающей несколько звеньев с поступательными и вращательными степенями свободы [9]. Для определения положения исполнительного органа использовались модели прямой и обратной кинематики, обеспечивающие пересчет пространственных координат в параметры конфигурации привода для каждой точки дискретизированной траектории [10].

Для повышения точности и устойчивости управления в условиях внешних возмущений и погрешностей измерений применялся комбинированный алгоритм коррекции, основанный на методах нечеткой логики [11] и фильтрации состояний [12]. Нечеткая логика использовалась для формирования корректирующих воздействий на траекторию с учетом неопределенных

входных параметров, а рекурсивный фильтр Калмана – для сглаживания координат и компенсации шумов сенсорных данных. Эффективность предложенного подхода оценивалась по результатам моделирования движения манипулятора по траекториям различной геометрии с анализом отклонений фактического положения от заданного.

Код был написан на языке Python, в котором были использованы библиотеки NumPy для математических операций и Matplotlib для создания графиков. Для проверки программы был составлен соответствующий метод, который включает метрики, описанные в соответствующем разделе.

Результаты исследования и их обсуждение

Управление манипулятором построено на решении обратной задачи кинематики, что является распространенным подходом при формировании траекторий движения исполнительных механизмов [10]. Для компенсации возмущений и обеспечения устойчивости используется фильтр Калмана [6], а также алгоритм нечеткой логики для оценки неопределенных условий среды [11].

Объект управления – манипуляционный модуль, описываемый последовательностью кинематических звеньев, имеющих как вращательные, так и поступательные степени свободы. Геометрические параметры звеньев задаются в виде трех линейных размеров (обозначенных как L_1 , L_2 , L_3), соответствующих длинам плечевой, локтевой и конечной секций манипулятора. Исходное состояние представлено начальными углами поворота θ_1 , θ_2 , θ_3 и смещениями d_1 , d_2 , d_3 вдоль соответствующих осей.

Общий принцип функционирования системы заключается в определении требуемого положения исполнительного органа в пространстве (в терминах координат x , y , z) и автоматическом определении параметров конфигурации привода, необходимых для достижения заданного положения. Это реализуется посредством алгоритмов прямой и обратной кинематики.

Для определения текущего положения манипулятора в рабочем пространстве используется модель прямой кинематики, предполагающая трансляционное смещение конечного звена вдоль каждой из осей, с учетом геометрических характеристик манипулятора:

$$P = \begin{bmatrix} d_3 + L_3 \\ d_2 + L_2 \\ d_1 + L_1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Обратная задача кинематики решается аналитическим способом, предполагающим прямой пересчет координат требуемого положения в эквивалентные смещения вдоль каждой оси. Так, зная координаты целевой точки (x, y, z) , определяются требуемые значения d_1, d_2, d_3 следующим образом:

$$d_1 = z - L_1; \quad d_2 = z - L_2; \quad d_3 = z - L_3. \quad (2)$$

Данная схема реализует управление системой с учетом упрощенной модели манипулятора, пригодной для программной симуляции или базовой реализации в реальном аппарате.

Ввиду возможного появления внешних нестабильностей (например, вибраций, колебаний температуры, изменения микроклимата на производстве) модуль управления содержит подсистему логико-нечеткой оценки и коррекции. Основу данной подсистемы составляет набор продукционных правил вида

ЕСЛИ [ускорение в интервале А] И [температура в интервале В], ТО [изменить скорость движения на V] и [скорректировать угол на $\Delta\theta$]

Каждое правило характеризуется двумя входными переменными – текущими значениями ускорения и температуры – и парой выходных воздействий. Для описания степеней принадлежности текущих значений входным лингвистическим переменным используется функция принадлежности, реализующая линейную интерполяцию между заданными границами диапазона. Механизм выбора корректирующего воздействия базируется на максимизации степени принадлежности и масштабировании выхода по значению этой степени:

$$\begin{aligned} \text{Коррекция скорости: } v' &= v + \mu\Delta v, \\ \text{Коррекция угла: } \theta' &= \theta + \mu\Delta\theta, \end{aligned} \quad (3)$$

где μ – максимальная степень принадлежности среди всех активных правил [13–15].

Учет шумов и случайных отклонений в показаниях сенсорных систем осуществляется с применением алгоритма рекурсивной фильтрации, основанного на модели Калмана. Для фильтра используется упрощенная двумерная модель состояния, включающая оценки координат (x, y) и их ковариационную матрицу.

На каждом временном шаге выполняют следующие процедуры:

1) предсказание – прогноз следующего состояния на основе текущей оценки и модели движения:

$$x_{k|k-1} = x_{k-1} + v\Delta t; \quad (4)$$

2) обновление – учет фактического измерения для коррекции состояния:

$$K_k = P_{k|k-1} H^T (H P_{k|k-1} H^T + R)^{-1}, \quad (5)$$

$$x_{k|k} = x_{k|k-1} + K_k (z_k - H x_{k|k-1}). \quad (6)$$

где K_k – усиление Калмана, P – ковариационная матрица оценки, H – матрица наблюдений, R – ковариация измерений и z_k – измерение.

Алгоритм обеспечивает сглаживание траектории и компенсацию помех, возникающих в процессе выполнения манипуляционных операций.

Описанные выше алгоритмы объединяются в единую систему управления движением манипулятора по заданной траектории. На вход подается последовательность координатных точек и ориентиров, соответствующих этапам технологической операции. Для каждой точки производится:

- 1) вычисление смещений по модели обратной кинематики;
- 2) оценка внешних условий (ускорение, температура);
- 3) вычисление корректирующего воздействия на траекторию;
- 4) фильтрация полученной позиции;
- 5) формирование обновленного положения для выполнения следующего шага.

Это обеспечивает не только точное следование исходной траектории, но и способность адаптивной подстройки маршрута под влиянием реальных условий среды.

Для демонстрации эффективности построенного управления применяется графическая визуализация исходной и адаптированной траекторий в трехмерной координатной системе. Использование таких средств позволяет наглядно представить степень отклонения и корректировки траектории в условиях действия случайных факторов.

Блок-схема общего алгоритма управления представлена на рис. 1.

Эта блок-схема отражает последовательность действий программы от запуска до завершения, включая взаимодействие с пользователем, генерацию траектории и визуализацию.

Цикл повторяется для каждой точки траектории, определенной числом шагов.

Блок-схема алгоритма адаптации представлена на рис. 2.

Эта блок-схема детализирует процесс адаптации одной точки траектории, включая кинематику, оценку неопределенности и фильтрацию.

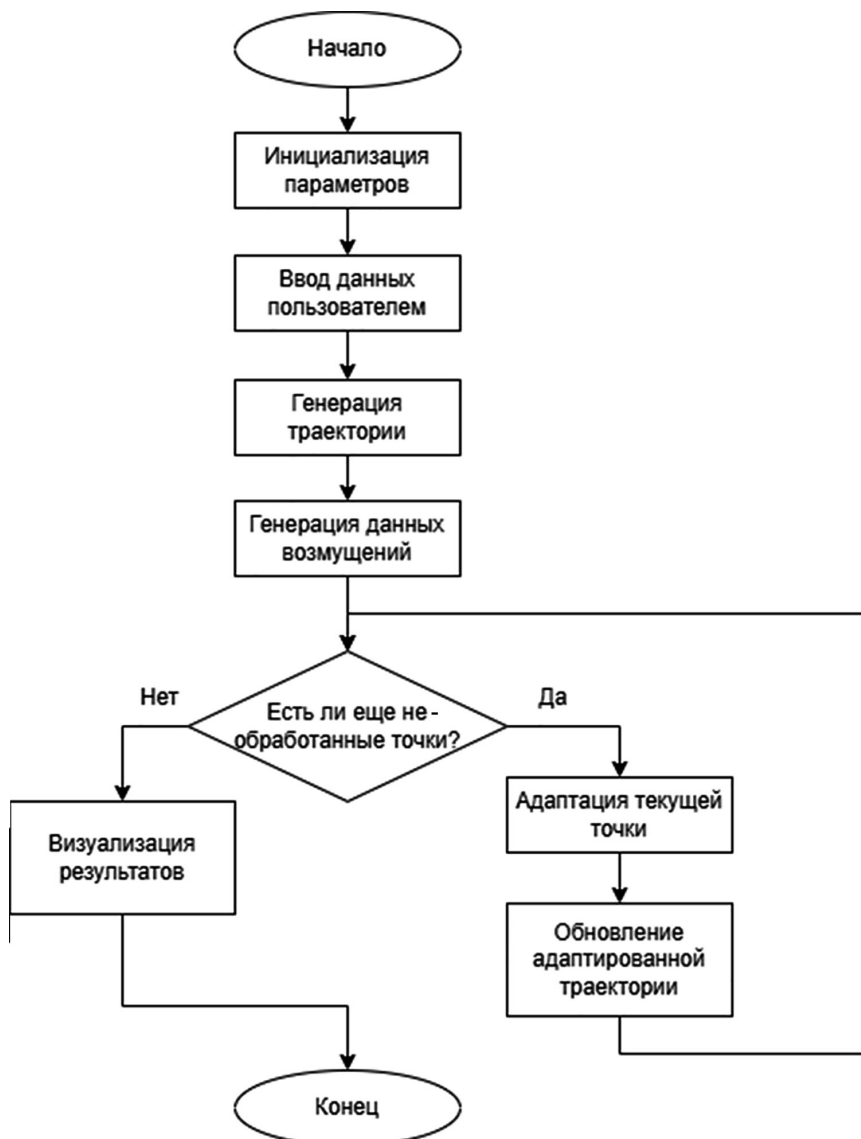


Рис. 1. Схема общего алгоритма управления
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

Подобная комбинация подходов (фильтр Калмана, нечеткая логика и обратная кинематика) позволяют добиться высокой точности и устойчивости к неопределенностям среды, что подтверждается экспериментально.

В качестве эксперимента был выбран шов длиной 10 см вдоль оси Y. Результаты экспериментов наглядно представлены на рис. 3 и 4.

По графикам можно сделать вывод, что шов получается довольно точным, поскольку максимальное отклонение шва равно 1,5 мм, что входит в допустимый диапазон. Наклонный шов представлен на рис. 5 и 6.

Как видно из графиков, с наклонным швом алгоритм справляется одинаково хо-

рошо. Рассмотрим последний вариант: шов в трех плоскостях. Результат эксперимента представлен на рис. 7.

В рамках этих экспериментов была установлена точность в 100 шагов. Далее будут проведены эксперименты по уменьшению числа шагов и измерению точности алгоритма.

Результаты экспериментов для точности в 10 шагов представлены на рис. 8 и 9.

Как видно из графиков, точность алгоритма не понизилась, но качество шва незначительно пострадало, так как возникает малое пересечение заданной траектории с целевой. Рассмотрим вариант с наклонным швом, который представлен на рис. 10 и 11.

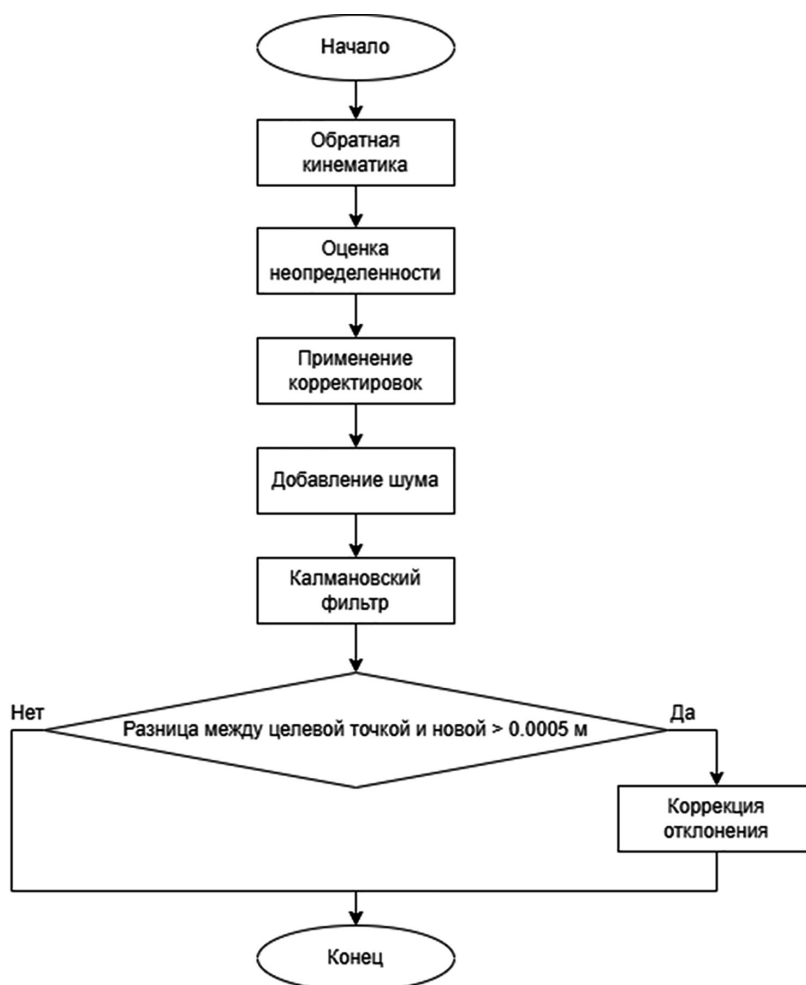


Рис. 2. Схема алгоритма адаптации

Примечание: составлен авторами по результатам исследования

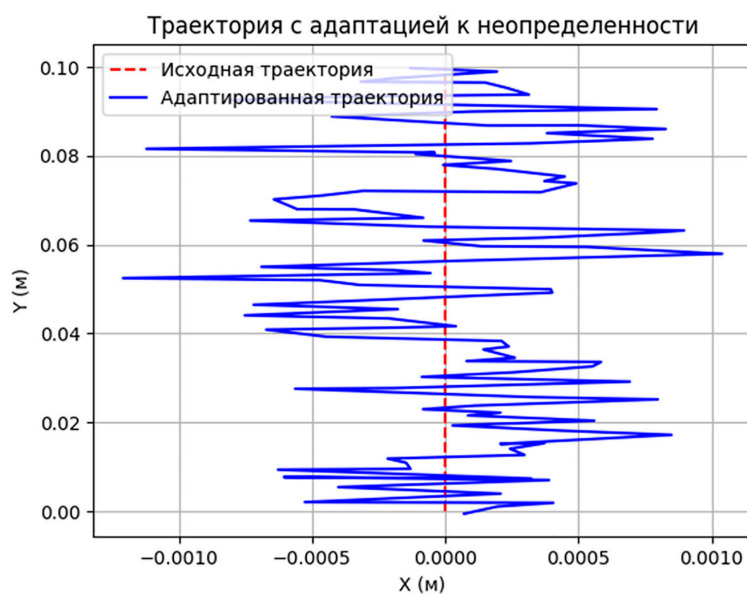


Рис. 3. Результат эксперимента прямого шва на плоскости

Примечание: составлен авторами по результатам исследования

Траектория с адаптацией к неопределенности в 3D

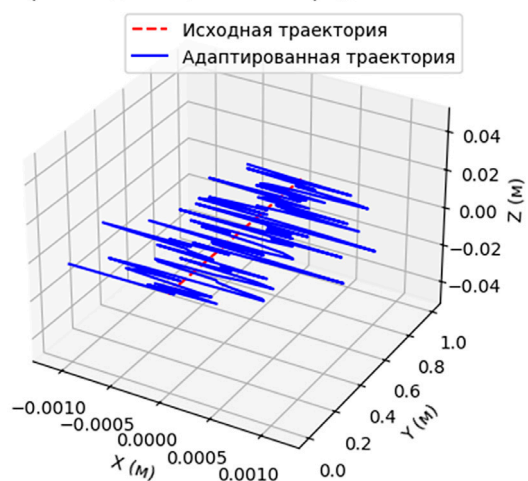


Рис. 4. Результат эксперимента прямого шва в трехмерном варианте
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

Траектория с адаптацией к неопределенности

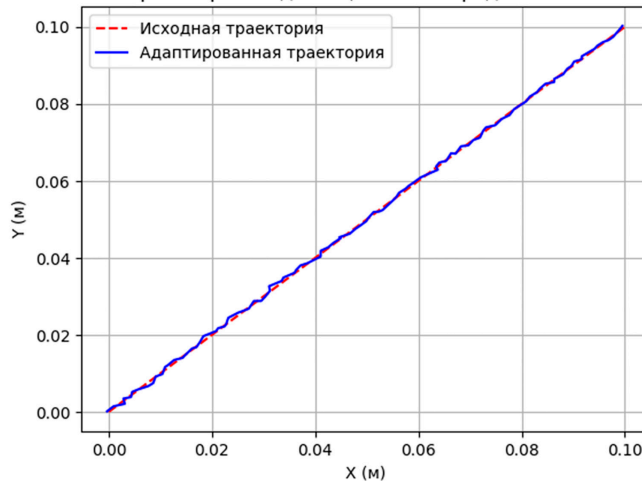


Рис. 5. Результат эксперимента наклонного шва на плоскости
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

Траектория с адаптацией к неопределенности в 3D

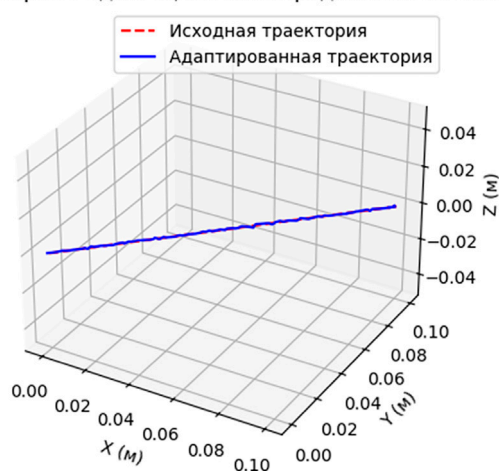


Рис. 6. Результат эксперимента наклонного шва в трехмерном варианте
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

Траектория с адаптацией к неопределенности в 3D

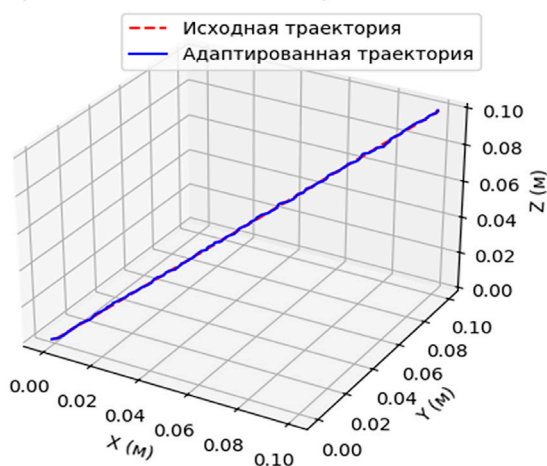


Рис. 7. Результат эксперимента с трехмерным швом
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

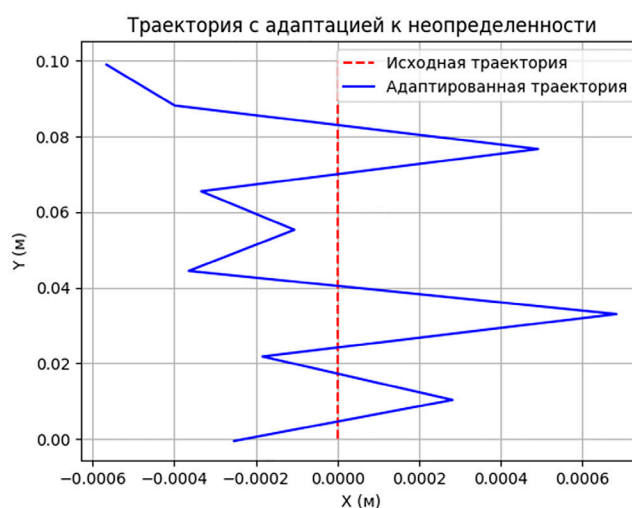


Рис. 8. Результат эксперимента прямого шва на плоскости с точностью 10 шагов
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

Траектория с адаптацией к неопределенности в 3D

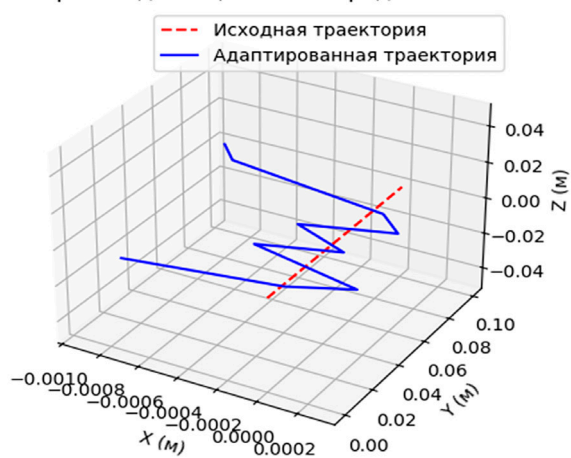


Рис. 9. Результат эксперимента прямого шва в трехмерном варианте с точностью 10 шагов
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

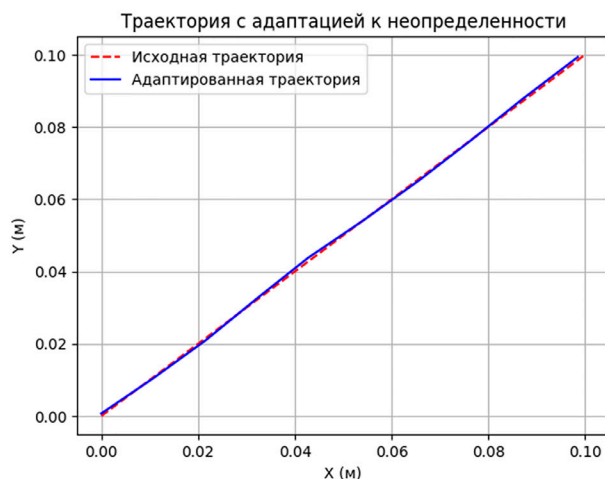


Рис. 10. Результат эксперимента наклонного шва на плоскости с точностью 10 шагов
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

Траектория с адаптацией к неопределенности в 3D

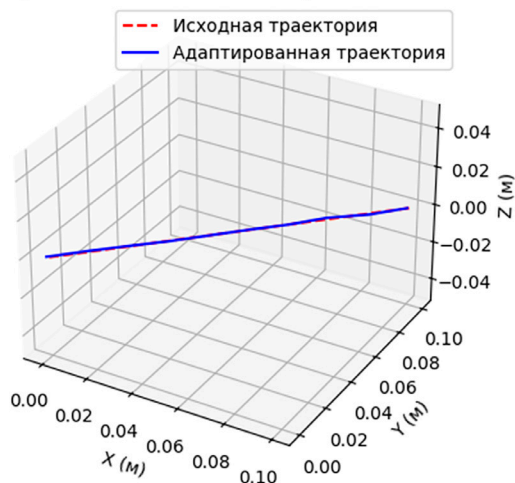


Рис. 11. Результат эксперимента наклонного шва в трехмерном варианте с точностью 10 шагов
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

Траектория с адаптацией к неопределенности в 3D

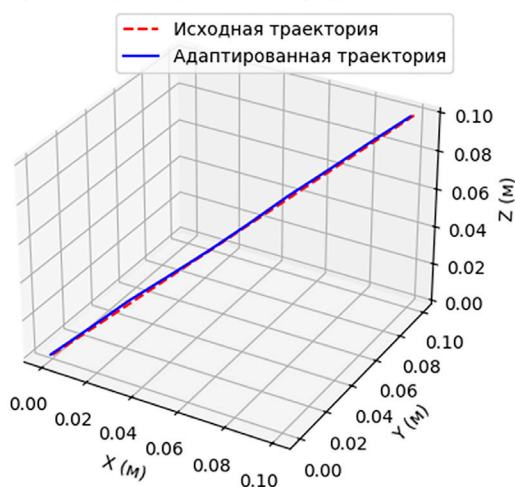


Рис. 12. Результат эксперимента с трехмерным швом с точностью 10 шагов
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

Шов получился более плавным, относительно варианта с большим количеством шагов. В завершение серии экспериментов рассмотрим трехмерный вариант, который представлен на рис. 12.

Таким образом, можно сделать вывод, что точность не понижается с уменьшением числа шагов, однако уменьшается число пересечений действительной и целевой траекторий шва, что делает во втором случае шов более плавным.

Заключение

В результате проведенного исследования разработан и исследован алгоритм адаптивного управления движением манипулятора, обеспечивающий устойчивое следование сварочным траекториям в пространстве при наличии внешних возмущений и погрешностей измерений. Предложенный подход, основанный на сочетании кинематических моделей, нечеткой коррекции и рекурсивной фильтрации состояний, позволяет формировать корректирующие воздействия в процессе движения и снижать влияние шумов на точность позиционирования исполнительного органа. Результаты программного моделирования для траекторий различной геометрии показали сохранение допустимых отклонений и стабильность работы алгоритма при изменении параметров дискретизации, что подтверждает его применимость для задач автоматизации сварочных операций и целесообразность дальнейшего развития в направлении практической реализации на реальном оборудовании.

Список литературы

1. Zhang Z., Zeng J. A Review on Development and Application of Industrial Robot // *Academic Journal of Science and Technology*. 2022. Vol. 2. P. 78–81. URL: https://www.researchgate.net/publication/363589952_A_Review_on_Development_and_Application_of_Industrial_Robot (дата обращения: 28.11.2025). DOI: 10.54097/ajst.v2i2.1165.
2. Xue K., Wang Z., Shen J., Hu S., Zhen Y., Liu J., Wu D., Yang H. Robotic seam tracking system based on vision sensing and human-machine interaction for multi-pass MAG welding // *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 63. P. 48–59. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612515000486> (дата обращения: 28.11.2025). DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.02.026.
3. Biber A., Sharma R., Reisinger U. Robotic welding system for adaptive process control in gas metal arc welding // *Welding in the World*. 2024. Vol. 68. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8320791> (дата обращения: 28.11.2025). DOI: 10.1007/s40194-024-01756-y.
4. Ren S., Han L., Mao J., Li J. Optimized trajectory tracking for robot manipulators with uncertain dynamics: A composite position predictive control approach // *Electronics*. 2023. Vol. 12. Article 4548. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/21/4548> (дата обращения: 29.11.2025). DOI: 10.3390/electronics12214548.
5. Sun J., Wu S., Chen J., Li X., Zhang Y. Optimization of fuzzy adaptive logic controller for robot manipulators using modified greater cane rat algorithm // *Mathematics*. 2025. Vol. 13. Article 1631. URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/13/10/1631> (дата обращения: 20.11.2025). DOI: 10.3390/math13101631.
6. Khanesar M.A., Branson D. Robust sliding mode fuzzy control of industrial robots using an extended Kalman filter inverse kinematic solver // *Energies*. 2022. Vol. 15. Article 1876. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/5/1876> (дата обращения: 29.11.2025). DOI: 10.3390/en15051876.
7. Xia K., Gao H., Ding L., Liu Z. Trajectory tracking control of wheeled mobile manipulator based on fuzzy neural network and extended Kalman filtering // *Neural Computing and Applications*. 2018. Vol. 30. P. 447–462. URL: https://www.researchgate.net/publication/310757131_Trajectory_tracking_control_of_wheeled_mobile_manipulator_based_on_fuzzy_neural_network_and_extended_Kalman_filtering (дата обращения: 30.11.2025). DOI: 10.1007/s00521-016-2643-7.
8. Pan Z., Polden J., Larkin N., Van Duin S., Norrish J. Recent progress on programming methods for industrial robots // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2012. Vol. 28. P. 87–94. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584515000608> (дата обращения: 30.11.2025). DOI: 10.1016/j.rcim.2011.08.004.
9. Wang G., Li W., Jiang C., Zhu D., Li Z., Xu W., Zhao H., Ding H. Trajectory Planning and Optimization for Robotic Machining Based On Measured Point Cloud // *IEEE Transactions on Robotics*. P. 1–17. URL: https://www.researchgate.net/publication/356882402_Trajectory_Planning_and_Optimization_for_Robotic_Machining_Based_On_Measured_Point_Cloud (дата обращения: 30.11.2025). DOI: 10.1109/TRO.2021.3108506.
10. Qiao L., Luo X., Luo Q. Control of trajectory tracking for mobile manipulator robot with kinematic limitations and self-collision avoidance // *Machines*. 2022. Vol. 10. Article 1232. URL: <https://www.mdpi.com/2075-1702/10/12/1232> (дата обращения: 30.11.2025). DOI: 10.3390/machines10121232.
11. Pham V.C., Tran M.H., Nguyen P.A., Nguyen T.H. Robust adaptive fuzzy sliding mode control for trajectory tracking of robot manipulators // *arXiv*. 2025. Vol. 9. P. 128120–128132. URL: <https://www.arxiv.org/abs/2508.05584> (дата обращения: 28.11.2025). DOI: 10.48550/arXiv.2508.05584.
12. De Cos C.R., Acosta J.Á. Unified force and motion adaptive-integral control of flexible robot manipulators // *ISA Transactions*. 2025. Vol. 158. P. 586–593. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019057825000552> (дата обращения: 29.11.2025). DOI: 10.1016/j.isatra.2025.01.030.
13. Liu J., Zeng T., Mohammad A., Alambeigi F. Design and validation of a fuzzy logic controller for continuum robots // *arXiv*. 2024. Vol. 124. Article 103386. URL: <https://arxiv.org/abs/2409.20242> (дата обращения: 28.11.2025). DOI: 10.48550/arXiv.2409.20242.
14. Xing H., Xu Y., Chen J., Gao H., Tavakoli M. Trajectory Tracking Control of Wheeled Mobile Manipulators with Joint Flexibility via Virtual Decomposition Approach // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2025. URL: https://www.researchgate.net/publication/388908102_Trajectory_Tracking_Control_of_Wheeled_Mobile_Manipulators_with_Joint_Flexibility_via_Virtual-Decomposition_Approach (дата обращения: 28.11.2025). DOI: 10.1109/TASE.2025.3540860.
15. Tee K. P., Li H. Adaptive Tracking Control of Uncertain Robotic Manipulators in a Constrained Task Space // 2009 IEEE International Conference on Control and Automation, ICCA 2009. 2010. P. 1001–1006. URL: https://www.researchgate.net/publication/224113167_Adaptive_Tracking_Control_of_Uncertain_Robotic_Manipulators_in_a_Constrained_Task_Space (дата обращения: 28.11.2025). DOI: 10.1109/ICCA.2009.5410306.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.