

УДК 004.942

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.49.2.034](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.49.2.034)

Методология создания набора данных для предиктивного анализа промышленного робота

Т.Г. Кормин✉, И.Н. Тихонов, С.А. Берестова, А.В. Зырянов

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, Российская Федерация*

Резюме. Промышленные роботы являются одним из способов увеличения объемов производства. Пакетирование, фрезеровка, сварка, лазерная обработка, 3D печать – это ряд процессов, в которых требуется поддержание высокой точности позиционирования промышленных роботов на протяжении всего цикла операций. В статье проводится анализ использования метода Денавита-Хартерберга (ДН) для определения ошибок позиционирования и ориентации промышленного робота. В данном исследовании применяется метод ДН для создания модели возможных ошибок в промышленных роботах и для создания базы данных об отклонениях звеньев и рабочего органа робота от заданной траектории. Особое внимание уделено представлению практических шагов по созданию синтетического набора данных отклонения осей промышленного робота, начиная от кинематической модели робота и заканчивая подготовкой конечного формата данных для последующего анализа и построения модели предиктивной аналитики. Важность тщательной подготовки данных подчеркивается примерами из других исследований в области предиктивной аналитики промышленного оборудования, демонстрируя экономическую выгоду от своевременного обнаружения и предотвращения возможных сбоев при работе техники. Разработанная модель используется в дальнейшем для генерации синтетического набора данных отклонения осей промышленного робота. Предлагаемая модель сбора данных и методология создания набора данных для предиктивной аналитики тестируется на спроектированном для этих целей 6-осевом роботе.

Ключевые слова: обратная задача кинематики, предиктивная аналитика, имитационное моделирование, оценка неисправности промышленного робота, метод Денавита-Хартерберга, автоматизация, диагностика неисправностей.

Для цитирования: Кормин Т.Г., Тихонов И.Н., Берестова С.А., Зырянов А.В. Методология создания набора данных для предиктивного анализа промышленного робота. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1912> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.49.2.034

Methodology for creating a dataset for predictive analysis of an industrial robot

T.G. Kormin✉, I.N. Tikhonov, S.A. Berestova, A.V. Zyryanov

*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Yekaterinburg, the Russian Federation*

Abstract. Industrial robots are one of the ways to increase production volumes. Bundling, milling, welding, laser processing, and 3D printing are a number of processes that require maintaining high precision positioning of industrial robots throughout the entire operation cycle. This article analyzes the use of the Denavit-Harterberg (DH) method to determine the positioning and orientation errors of an industrial robot. In this study, the DH method is used to create a model of possible errors in industrial robots and to create a database of deviations of the links and the working body of the robot from a predetermined trajectory. Special attention is paid to the presentation of practical steps to create a synthetic data set for the deviation of axes of an industrial robot, starting from the kinematic model of

the robot and ending with the preparation of the final data format for subsequent analysis and the construction of a predictive analytics model. The importance of careful data preparation is highlighted by examples from other research in the field of predictive analytics of industrial equipment, demonstrating the economic benefits of timely detection and prevention of possible equipment failures. The developed model is used in the future to generate a synthetic data set for the deviation of the axes of an industrial robot. The proposed data collection model and methodology for creating a data set for predictive analytics are being tested on a six-axis robot designed for this purpose.

Keywords: inverse kinematics problem, predictive analytics, simulation modeling, industrial robot malfunction assessment, Denavit-Hartenberg method, automation, fault diagnosis.

For citation: Kormin T.G., Tikhonov I.N., Berestova S.A., Zyryanov A.V. Methodology for creating a dataset for predictive analysis of an industrial robot. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(2). (In Russ.). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1912> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.49.2.034

Введение

Цель национального проекта «Экономика данных и цифровая трансформация государства», рассчитанного на период от 2025 года до 2030 года, – цифровая трансформация, в том числе, экономики. Среди основных направлений реализации нацпроекта «Развитие систем сбора данных с использованием высокочувствительных датчиков, применяемых в промышленности».

В современном производстве промышленный робот является одним из главных элементов производственных линий, с его преимуществами выполнения сложных, повторяющихся задач в различных условиях. На точность позиционирования промышленного робота могут влиять множество факторов: люфты в системе сочленений, износ привода, сбой в системах обратной связи и датчиках, тепловые погрешности и деформации [1, 2]. Эти факторы могут приводить к отклонениям положения центральной точки рабочего инструмента (ТСР), что может влиять на качество производимой продукции. С одной стороны, промышленные роботы, как правило, имеют высокую повторяемость, часто достигающую уровня 0,1 мм, но их абсолютная точность позиционирования рабочего инструмента обычно находится в миллиметровом диапазоне. Также необходимо, учитывать, что точность работы промышленного робота с увеличением наработки часов уменьшается [1]. Это является первой предпосылкой для создания системы анализа ошибок позиционирования промышленных роботов.

Вторым фактором для создания системы анализа состояния промышленного робота является необходимость единой методики поиска неисправности при пусконаладочных работах. К погрешностям робота можно отнести: геометрические погрешности, технологические погрешности, нарушения в работе электрических схем. Геометрические погрешности – это смещения в линейных размерах, в том числе вследствие износа оборудования. Технологические погрешности возникают во время эксплуатации, к ним относятся отклонения в температуре, силовых воздействиях. Динамические ошибки, возникающие из-за движения робота, включая инерцию, трение и внешние силы, особенно значительны при высокоскоростных операциях. Такие погрешности называются первичными ошибками, и влияние каждой из них на точность позиционирования точки ТСР (Tool Center Point) промышленного робота можно оценить отдельно от воздействия остальных первичных ошибок [3]. Таким образом, расчетные значения промышленного робота могут не совпадать с действительным положение промышленного робота.

Третьей причиной для использования систем, предсказывающих ошибку, является эффективное применение автоматических комплексов для компенсационных поправок в работе робота. Эксперименты [4, 5] показывают, что точность манипулятора повышается с применением системы корректировки положения робота.

Наличие систем диагностики, связанной с ориентацией промышленного робота, также позволяет внедрять системы автоматической калибровки робота. Кроме того, идентификация дополнительных параметров промышленного робота, окружающей среды может помочь уменьшить вероятность попадания в локальные оптимумы из-за ошибок преобразования в системе координат инструмента и измерительной системе координат, а также других случайных помех [6, 7].

В последние годы предиктивная аналитика стала предметом активных исследований в обрабатывающей промышленности. Идея предиктивной аналитики заключается в сборе и анализе данных состояния с датчиков для определения неисправного узла и указания причины его неисправности [8]. Датчики используются для сбора информации о показателях оборудования и факторах окружающей среды, влияющих на состояние оборудования. В области промышленной робототехники в качестве внешних датчиков чаще всего используют оптические измерительные системы (лазерные трекеры, системы камер Vicon, системы координатно-измерительных машин, или двойные энкодеры) [5, 9]. Конструкцию с внешними датчиками можно представить следующим образом: рабочая система координат робота привязана к основанию робота, относительно которого задается референтное положение всего механического блока. Измерение точности позиционирования роботов проводится с помощью лазерного трекера, при этом измерительные метки устанавливаются в нескольких местах на измерительном блоке, закрепленном на фланце робота [3]. К внутренним параметрам робота относятся положение звеньев, момент и ток осей, координаты точки ТСР.

Модели диагностики неисправностей на основе глубокого обучения, несмотря на их широкое применение и большой успех, имеют заметные ограничения. Во-первых, требуется большое количество размеченных данных, которые трудно получить на практике. Во-вторых, полученные данные неоднородны, данные могут быть собраны с разных датчиков и быть выражены в условных единицах [9]. В-третьих, большинство моделей глубокого обучения полагаются на подробные данные мониторинга на уровне компонентов для точного обнаружения и локализации сбоев на уровне компонентов. Например, для обнаружения и диагностики неисправностей подшипников используются сигналы вибрации, шума и т. д. Однако в большинстве случаев данные мониторинга состояния могут быть собраны только на системном уровне, а не на уровне компонентов [8, 10].

Таким образом, существует потребность в создании простых моделей генерации данных неисправностей промышленных роботов для сокращения времени формирования баз данных и усилий по внедрению аппаратного и программного обеспечения предиктивного анализа промышленного робота.

В данной статье рассматривается подготовка данных для предиктивного анализа отклонений в позиционировании рабочего органа промышленного робота с использованием метода Денавита-Хартерберга.

Материалы и методы

В ходе исследований используется робот, разработанный для проведения предиктивного анализа. Сконструированный прототип робота имеет 6 степеней свободы, управляется шаговыми двигателями. Представленный робот весит 15 кг, рабочее

пространство составляет 0,5 м. На Рисунке 1 изображена САД модель 6-осевого робота. Исходные параметры для решения уравнений ДН берутся с данной модели.



Рисунок 1 – САД модель 6-осевого робота
Figure 1 – САD model of a 6-axis robot

Влияние каждой оси на точку TCP робота:

первая ось управляет поворотом робота в горизонтальной плоскости;

вторая ось управляет наклоном робота вперед и назад (позволяет роботу поднимать и опускать руку);

третья ось управляет выдвижением и втягиванием робота, управляет телескопированием робота, что позволяет TCP робота приближаться к основанию робота или удаляться от него;

четвертая ось управляет сгибанием и разгибанием запястья робота;

пятая ось управляет поворотом запястья робота влево и вправо;

шестая ось управляет вращением запястья робота вокруг собственной оси, то есть вращением TCP.

Перед началом расчетов промышленного робота создается кинематическая модель разработанного робота. Модель описывает положение робота и параметры конструкции.

Основой моделирования ошибок в роботизированных системах с 6 степенями свободы является кинематическое моделирование. Наиболее широко используемый подход – модель Денавита–Хартенберга (ДН), которая определяет пространственное преобразование координат между соседними сочленениями с использованием четырех параметров [2, 11]:

a_i – расстояние вдоль оси x_i от z_{i-1} до z_i ;

d_i – расстояние вдоль оси z_{i-1} от x_{i-1} до x_i ;

α_i – угол вокруг оси x_i от z_{i-1} до z_i ;

θ_i – угол вокруг оси z_{i-1} от x_{i-1} до x_i .

Прямая задача кинематики заключается в расчете координат положения и ориентации системы координат, связанной со схватом или рабочим инструментом при заданном наборе обобщенных координат манипулятора. Согласно методу Денавита–Хартенберга, решение прямой задачи кинематики состоит из следующих этапов:

привязки систем координат к звеньям робота, определения параметров Денавита-Хартенберга, построения матриц однородного преобразования [12, 13]. Наличие решения обратной задачи позволит сравнивать фактические значения положения робота с имитационной моделью. Для проведения полноценного анализа узлов потребуется провести расчет скорости и ускорения рабочего органа или звеньев.

Разработанный робот состоит из шести вращательных шарниров. Первые три шарнира манипулятора в основном управляют конечным положением, а последние три шарнира, в основном, управляют конечной ориентацией рабочего органа, как показано на Рисунке 1.

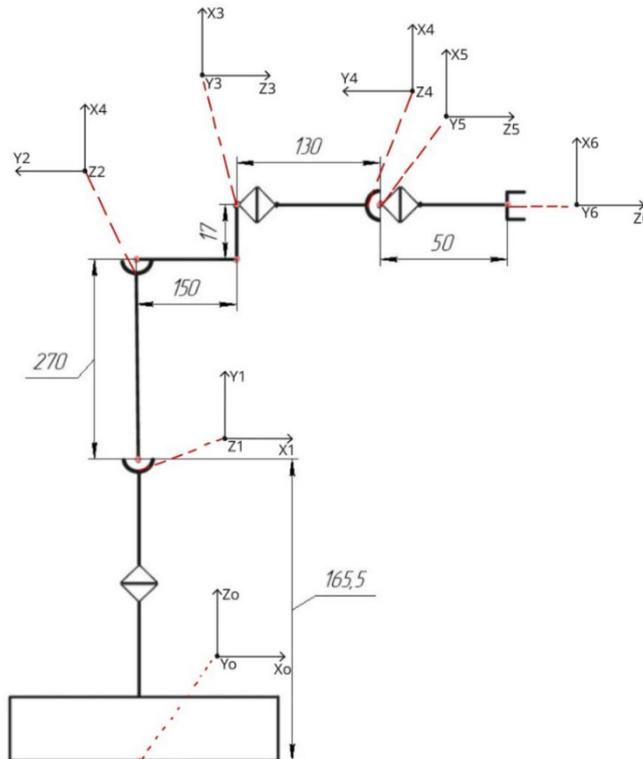


Рисунок 2 – Робот в нулевом положении с системами координат и переменными звеньями
Figure 2 – Robot in zero position with coordinate systems and variable links

Строка таблицы ДН соответствует упомянутым параметрам каждого соединения. Таким образом, у нас есть таблица параметров 6 соединений (строк) по 4 (столбцов). Используя приведенные выше определения параметров преобразования, схематическое представление робота-манипулятора, показанное на Рисунке 2, можно получить параметры ДН, показанные в Таблице 1.

Таблица 1 – Параметры робота для расчета Денавита-Хартенберга
Table 1 – Robot parameters for the Denavit-Harterterberg calculation

Ось i	a (мм)	d (мм)	α ($^\circ$)	θ ($^\circ$)
1	0	165,5	90	0
2	270	0	0	90
3	17	0	90	0
4	0	280	-90	0
5	0	0	90	0
6	0	50	0	0

Матрица преобразования между соседними системами позиционирования звена имеет вид (1):

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cdot \cos \alpha_i & \sin \theta_i \cdot \sin \alpha_i & a_i \cdot \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cdot \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \cdot \sin \alpha_i & a_i \cdot \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Эмпирические исследования

1. Описать параметрические характеристики промышленного робота, согласно методу ДН. Описать эталонную траекторию в координатной плоскости XYZ, где начало координат – это основание робота. Внести данные о положении точки ТСР в таблицу.

2. Выполнить расчет обратной кинематики робота. Внести данные об углах поворота осей робота в таблицу.

3. Сформировать отклонение параметров на осях робота для метода ДН. Выполнить расчет прямой задачи кинематики, опираясь на данные об углах поворота осей робота, найденных в пункте 3.

4. Анализ результатов: Сравнение полученных данных с эталонными значениями. Установление погрешностей. Оценка влияния смещения оси робота на конечное положение точки ТСР в координатной плоскости XYZ.

5. Формирование базы данных о влиянии смещения звеньев робота на траекторию движения рабочего инструмента.

Описанная выше процедура может быть представлена в виде блок-схемы, (Рисунок 3). Блок-схема позволяет наглядно проследить выполнение каждого этапа проведения расчетов.

Результаты

Описанная методология требует множества повторяемых расчетов. Для упрощения вычислений была создана программа, выполняющая расчет прямой и обратной задачи кинематики робота с анимацией перемещения по заданной траектории для отслеживания сингулярностей. Программа создавалась на языке программирования Python версии 3.12. Данная программа является упрощенной имитационной моделью промышленного робота. Перед запуском программы необходимо выполнить ввод параметров промышленного робота согласно матрице Денавита-Хартерберга и задать траекторию движения. Для простоты представления работы программы в качестве траектории движения использовалась дуга окружности. Параметрическое уравнение траектории:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + r \cdot \cos \beta \\ y &= y_0 + r \cdot \sin \beta. \\ z &= z_0 + r \cdot \sin \beta \end{aligned} \quad (2)$$

Согласно заданной траектории, выполняется расчет обратной задачи кинематики для получения значений углов осей θ в каждой точке траектории. Далее значения θ_i , XYZ_i считаются эталонными и сохраняются в таблицу «Траектория 1».

Следующим шагом создается расчет «Траектория 2». В качестве примера представим изменения расстояния между 2 и 3 шарнирами на +0,1 мм (Таблица 2). Решая прямую задачу с использованием новых параметров и ранее найденных, поворотами осей θ_i полученная траектория $[x', y', z']$ сохраняется в таблицу. Изменение траектории в плоскости X, Y наглядно представлено на Рисунке 4. Изменение длины рычага 2 оси

привело к среднему отклонению от траектории 1 на $-0,026141811$ мм по оси X, $-0,057426109$ мм по оси Y, $-0,091898527$ мм по оси Z.

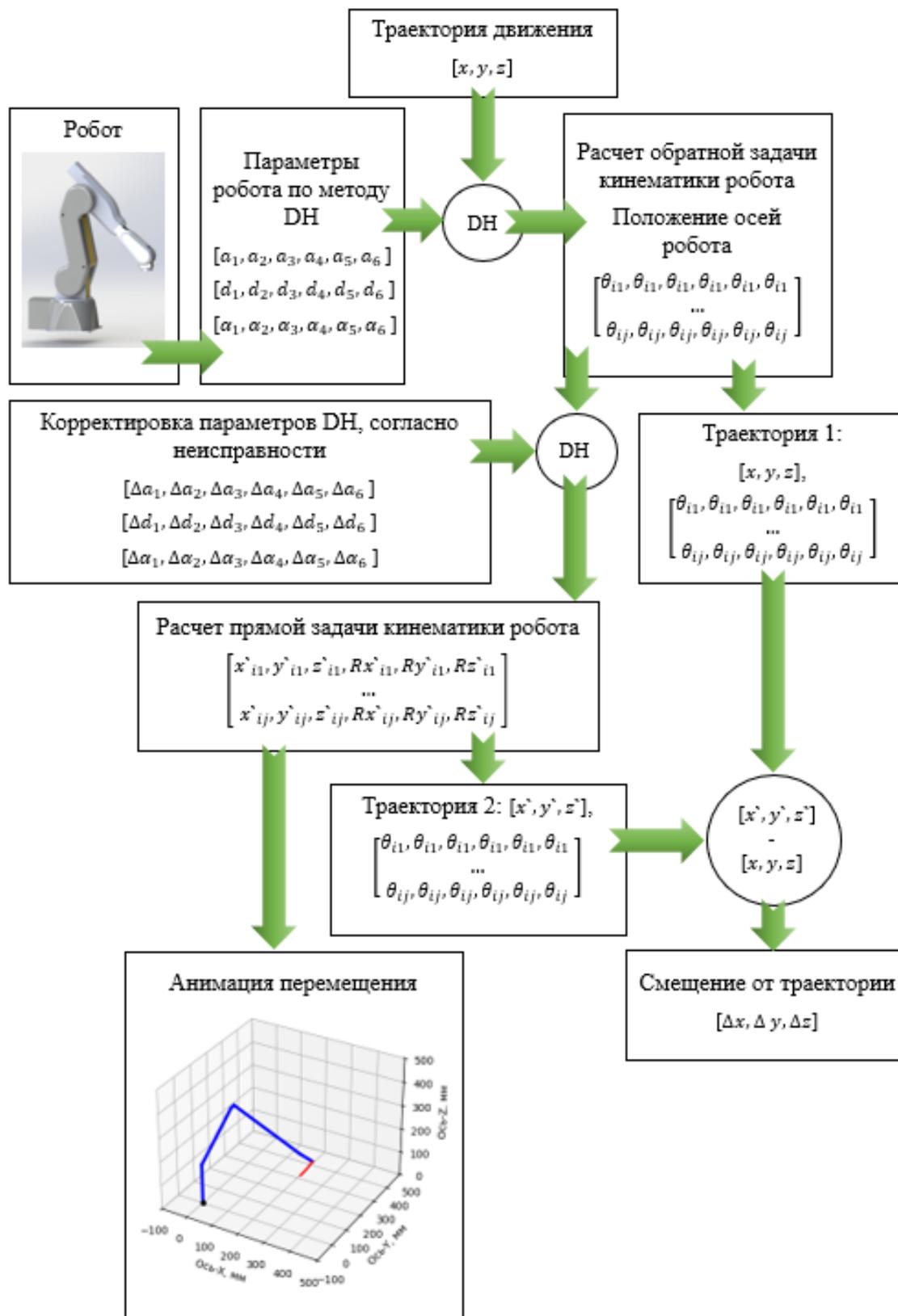


Рисунок 3 – Порядок генерации ошибок промышленного робота
Figure 3 – Industrial robot error generation order

Таблица 2 – Параметры для расчета траектории движения при условии изменения длины второго звена

Table 2 – Parameters for calculating the motion trajectory under the condition of changing the length of the second link

Ось i	a (мм)	d (мм)	α ($^{\circ}$)	θ ($^{\circ}$)
1	0	165,5	90	0
2	270+0,1	0	0	90
3	17	0	90	0
4	0	280	-90	0
5	0	0	90	0
6	0	50	0	0

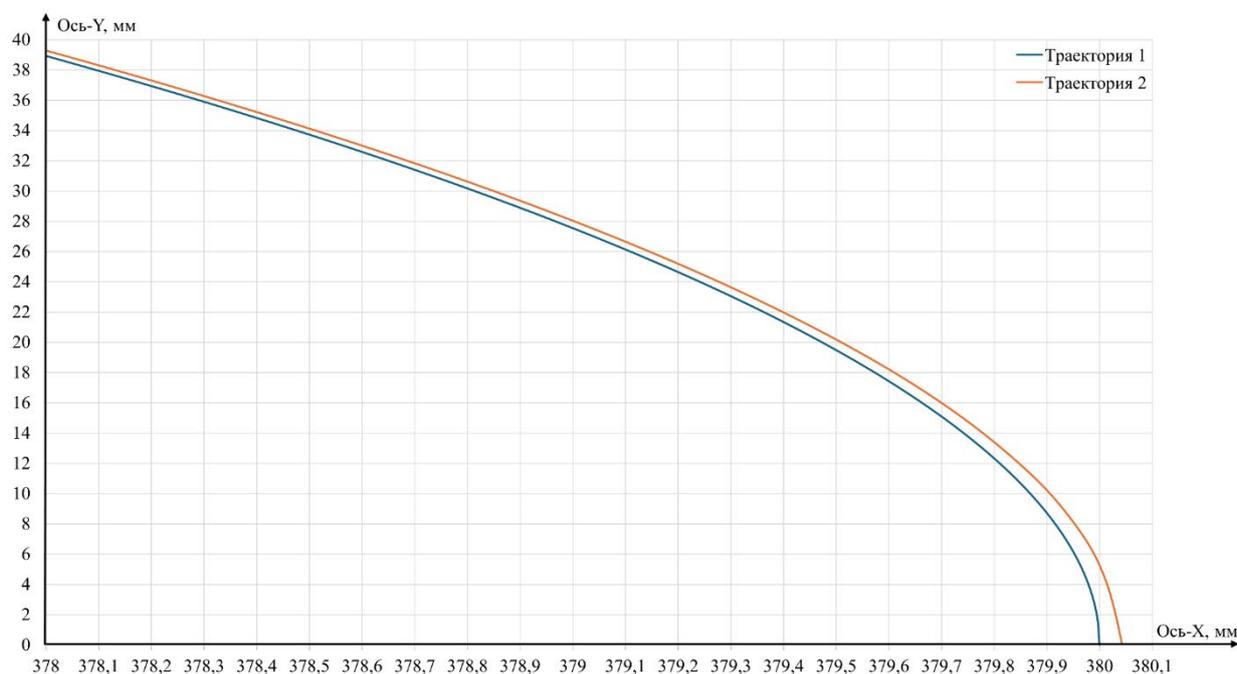


Рисунок 4 – Смещение траектории перемещения точки TCP при изменении второго звена
Figure 4 – TCP point trajectory mixing when the second link is changed

Полученные данные отклонения положения использовались для регрессионного анализа. Натренированная модель используется для реального прогнозирования координат робота в режиме реального времени. Такой подход применяется для повышения точности позиционирования, улучшения планирования траектории движения и предотвращения столкновений с препятствиями.

Обсуждение

В ходе работы по созданию данных для предиктивного анализа отклонений в позиционировании рабочего органа промышленного робота с использованием метода Денавита-Хартерберга была разработана программа на языке python. Программа позволяет визуализировать траекторию перемещения промышленного робота и генерировать траектории перемещения робота с отклонением осей и без них, благодаря чему создается набор данных, достаточный для машинного обучения. Набор полученных данных о роботе соизмерим с параметрами, представленными в исследовании Zhang Y

[2], что доказывает, что данная методика подходит для создания набора данных для машинного обучения.

В свою очередь, при выявлении неисправностей, нужно учитывать, что идеальная расчетная траектория отличается от траектории перемещения точки ТСР реального промышленного робота, ввиду внешних физических эффектов. Наиболее подробно данную ситуацию описал Wenping Xiang в [14]. Обобщая, можно сказать, что под воздействием собственного веса звеньев и внешних нагрузок, звенья и сочленения серийной роботизированной руки подвергаются деформации. Поэтому при анализе ошибок позиционирования рабочих органов необходимо учитывать гибкость звеньев и сочленений. Такой подход точнее отражает фактическое поведение промышленного робота.

Таким образом, добавление в расчет скорости и ускорения звеньев позволит создать более целостную картину для анализа промышленных роботов, а объединение расчетных значений и данных с оборудования позволит получить наиболее точный статистический анализ.

Заключение

В данной статье мы использовали метод Денавита-Хартерберга для генерации данных положения точки ТСР при смещении узлов робота от исходных параметров. Разработанная методология используется для генерации данных о возможных отклонениях промышленного робота, приводящим к снижению точности перемещения.

Результаты исследования позволяют использовать разработанную программу для дополнения недостающей информации о положении и кинематических характеристиках звеньев промышленного робота. Эти данные представляют собой расчетные положения робота точки ТСР, углы поворота осей робота.

В будущих публикациях будет рассмотрено использование полученных данных для проведения исследований по выявлению отклонений положения точки ТСР, исходя из модели, обученной на данных, описанных в представленной методике. Анализ полученных данных позволит выявить закономерности и зависимости между различными параметрами, что поможет создать эффективные модели предсказания отказов работы как самого робота, так и сбой в работе его звеньев.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Lao D., Quan Yo., Wang F., Liu Yu. Error Modeling and Parameter Calibration Method for Industrial Robots Based on 6-DOF Position and Orientation. *Applied Sciences*. 2023;13(19). <https://doi.org/10.3390/app131910901>
2. Zhang Yi., Zhu Q. Neural Network-Enhanced Fault Diagnosis of Robot Joints. *Algorithms*. 2023;16(10). <https://doi.org/10.3390/a16100489>
3. Габитов А.А., Каляшина А.В. Анализ обеспечения точности позиционирования промышленных роботов. *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*. 2018;74(4):49–54.
4. Li K.-L., Yang W.-T., Chan K.-Yu., Lin P.-Ch. An Optimization Technique for Identifying Robot Manipulator Parameters Under Uncertainty. *SpringerPlus*. 2016;5. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3417-5>
5. Gonzalez M.K., Theissen N.A., Barrios A., Archenti A. Online Compliance Error Compensation System for Industrial Manipulators in Contact Applications. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2022;76. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102305>
6. Kou B., Zhang Yi. A New Method for Recognizing Geometric Parameters of Industrial Robots. *Scientific Reports*. 2025;15. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86971-3>

7. Marwan A., Simic M., Imad F. Calibration Method for Articulated Industrial Robots. *Procedia Computer Science*. 2017;112:1601–1610. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.08.246>
8. Zhong D., Xia Zh., Zhu Yi., Duan J. Overview of Predictive Maintenance Based on Digital Twin Technology. *Heliyon*. 2023;9(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14534>
9. Lu K., Chen Ch., Wang T., Cheng L., Qin J. Fault Diagnosis of Industrial Robot Based on Dual-Module Attention Convolutional Neural Network. *Autonomous Intelligent Systems*. 2022;2(1). <https://doi.org/10.1007/s43684-022-00031-5>
10. Mc Court K., Mc Court X., Du Sh., Zeng Zh. Use Digital Twins to Support Fault Diagnosis From System-Level Condition-Monitoring Data. arXiv. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.01360> [Accessed 16th March 2025].
11. Motta J.M.S.T., Llanos-Quintero C.H., Sampaio R.C. Inverse Kinematics and Model Calibration Optimization of a Five-D.O.F. Robot for Repairing the Surface Profiles of Hydraulic Turbine Blades. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2016;13(3). <https://doi.org/10.5772/63673>
12. Shi X., Guo Yu, Chen X., Chen Z., Yang Zh. Kinematics and Singularity Analysis of a 7-DOF Redundant Manipulator. *Sensors*. 2021;21(21). <https://doi.org/10.3390/s21217257>
13. Dikmenli S. Forward & Inverse Kinematics Solution of 6-DOF Robots Those Have Offset & Spherical Wrists. *Eurasian Journal of Science Engineering and Technology*. 2022;3(1):14–28. <https://doi.org/10.55696/ejset.1082648>
14. Xiang W., Chen J., Li H., Chai Zh., Lou Yi. Research on End-Effector Position Error Compensation of Industrial Robotic Arm Based on ECOA-BP. *Sensors*. 2025;25(2). <https://doi.org/10.3390/s25020378>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кормин Тимофей Григорьевич, аспирант, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация.
e-mail: ktg39@mail.ru
ORCID: [0000-0002-8742-6033](https://orcid.org/0000-0002-8742-6033)

Timofey G. Kormin, Postgraduate, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, the Russian Federation.

Тихонов Игорь Николаевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация.
e-mail: i.n.tikhonov@urfu.ru

Igor N. Tikhonov, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Head of the Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, the Russian Federation.

Берестова Светлана Александровна, доктор физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация.
e-mail: s.a.berestova@urfu.ru
ORCID: [0000-0002-4366-0426](https://orcid.org/0000-0002-4366-0426)

Svetlana A. Berestova, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Docent, Head of the Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, the Russian Federation.

Зырянов Артём Владимирович, студент, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация.
e-mail: artemzyryanovoffice@gmail.com

Artyom V. Zyryanov, student, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, the Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 21.04.2025; одобрена после рецензирования 23.05.2025;
принята к публикации 30.05.2025.*

*The article was submitted 21.04.2025; approved after reviewing 23.05.2025;
accepted for publication 30.05.2025.*