

УДК 681.5

DOI 10.17513/snt.40299

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ

Булатов В.В., Джаошвили Н.Г., Нуйя О.С.,
Рудаков Р.В., Сержантова М.В., Савельев Н.В.

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, e-mail: xyz43210@mail.ru

Цель исследования – повышение гибкости производственного процесса за счет сокращения аварий и повышения скорости совместной работы роботов-манипуляторов. В работе предложено обеспечивать совместную безаварийную работу роботов-манипуляторов на основе расчета координат возможного пересечения траекторий движения их звеньев в процессе совместного выполнения различных технологических операций в одной рабочей зоне на гибком производстве. Отметим, что предложенный подход сокращает время технологического цикла для изготовления одного изделия не за счет остановки роботов-манипуляторов с последующим возобновлением их работы, а за счет своевременной корректировки их траектории. Данная постановка задачи является критически важной, потому что ее реализация обеспечит слаженную работу движущегося оборудования – одновременное выполнение технологических операций роботами-манипуляторами в общей рабочей зоне при непосредственной близости друг от друга с соблюдением безопасности. Актуальность исследования обусловлена непрерывно возрастающей потребностью в автоматизации производственных процессов, в том числе с применением роботов-манипуляторов. Повышение технологической гибкости производства можно обеспечить за счет перехода от индивидуальной работы роботов-манипуляторов к их совместному взаимодействию в общей рабочей зоне для различных технологических задач производственной деятельности. Для решения поставленной задачи – нахождения координат пересечения траекторий перемещения звеньев роботов-манипуляторов и дальнейшего расчета безопасных траекторий перемещений использован метод Денавита – Хартенберга, позволивший решить с помощью программного вычисления задачу совместного безаварийного взаимодействия роботов-манипуляторов в общей рабочей зоне.

Ключевые слова: роботы-манипуляторы, координаты рабочего органа (схват, рабочий орган), программное обеспечение безаварийной работы манипуляторов, метод Денавита – Хартенберга, алгоритм расчета безопасной траектории

DEVELOPMENT OF AUTOMATED CONTROL OF INTERSECTION OF MOTION TRAJECTORIES OF ROBOT MANIPULATORS

Bulatov V.V., Dzhaoshvili N.G., Nuyya O.S.,
Rudakov R.V., Serzhantova M.V., Savelev N.V.

*Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
Saint Petersburg, e-mail: xyz43210@mail.ru*

The aim of the research is to increase the flexibility of the production process by reducing accidents and increasing the speed of joint operation of robots-manipulators. The paper proposes to ensure accident-free joint operation of robots-manipulators on the basis of calculating the coordinates of possible intersection of movement trajectories of their links in the process of joint performance of various technological operations in one working area in flexible production. It should be noted that the proposed approach reduces the time of technological cycle for manufacturing one product due to timely correction of their motion trajectory rather than stopping robots-manipulators with subsequent resumption of their work. This problem statement is critical, because its realization will ensure smooth operation of moving equipment – simultaneous execution of technological operations by robot manipulators in a common working area in close proximity to each other with safety. The relevance of the study is due to the ever-increasing need for automation of production processes, including the use of robots-manipulators. Increasing the technological flexibility of production can be achieved by switching from the individual operation of robotic manipulators to their joint interaction in a common work area for various technological tasks of production activities. To solve the problem of finding the coordinates of the intersection of the trajectories of movement of robot manipulators and further calculating safe movement trajectories, the Denavit-Hartenberg method was used, which made it possible to solve, using software computing, the problem of joint trouble-free interaction of robot manipulators in a common work area.

Keywords: robot manipulators, coordinates of the working body (grip, working body), Denavit – Hartenberg method, software for accident-free operation of manipulators, algorithm for calculating the safe trajectory

Введение

Робот-манипулятор достаточно универсален благодаря [1; 2; 3, с. 54] возможности замены рабочего органа в зависимости от поставленной задачи для выполнения различного типа операций и наличием устрой-

ства для программного управления выполнением технологических операций согласно разработанному алгоритму программного кода. Отметим, что в зависимости от задачи он может выполнять функции основного и вспомогательного оборудования в составе

гибкого производства [2; 3, с. 86] с заданной точностью и скоростью.

Роботы-манипуляторы применяются в производстве для автоматизации технологических процессов [4]. Примером его применения, при использовании как основного оборудования, может быть отрасль автомобилестроения, в которой он осуществляет сборку кузова автомобиля, покрасочные работы, установку различных компонентов. Также в автоматизированных линиях сборки различных электронных и механических изделий в качестве вспомогательного оборудования – для обслуживания станков ЧПУ (числовое программное управление) при установке и снятии заготовок, при подаче заготовок в рабочее пространство пресового и кузнечного оборудования.

Применение роботов-манипуляторов позволяет повысить скорость и качество выпускаемой продукции, исключить нахождение человека в опасной для него среде.

Роботы-манипуляторы в большинстве случаев работают на больших скоростях в ограниченной рабочей зоне. Нахождение человека в таких зонах исключается, для этого устанавливаются защитные ограждения или применяются системы защиты, например световые барьеры безопасности. И в том и в другом случае при попадании человека в рабочую зону робота-манипулятора система автоматически остановит его.

Роботы-манипуляторы – это системы с избыточным числом степеней свободы, благодаря чему удается модифицировать качество движений манипулятора. Например, если манипулятор должен вкручивать гайки, то его задача состоит не только в том, чтобы покрыть сетью траекторий заданный кусок поверхности, но и в том, чтобы во время движения оказывать определенное давление при закручивании – и вот эту вторую задачу оказывается удобнее всего решить, управляя избыточной степенью свободы.

Избыточные степени свободы оказываются полезными при работе с неудобно расположенными предметами или при совместной работе двух независимых манипуляторов, когда нужно, например, при автоматизированной сборке автомобиля, не имея визуальной информации, выполнить некоторое действие.

При совместной работе нескольких роботов-манипуляторов возникает необходимость в координации их работы, чтобы предотвратить столкновение сегментов, рабочих органов и изделий, находящихся в рабочих органах роботов-манипуляторов [5; 6, с. 230], между собой, с другим технологическим оборудованием и стационарными конструкциями. Возможные стол-

кновения могут привести не только к выходу из строя частей робота-манипулятора, но и к повреждению технологического оборудования и стационарных конструкций, находящихся в рабочей зоне.

В связи с этим данная работа сосредоточена на исследовании проблемы пересечения траекторий движения роботов-манипуляторов при выполнении совместных операций.

Программное вычисление пересечения траекторий перемещения сегментов роботов-манипуляторов – это процесс определения точки или области, где два или более сегмента роботов-манипуляторов, перемещаясь по заданным траекториям, могут пересечься [7]. Это является важным аспектом планирования движения сегментов роботов-манипуляторов, особенно в задачах координации при выполнении технологических операций совместно или в одной рабочей зоне.

В данной работе рассматриваются п-звенные роботы-манипуляторы, выполняющие технологические операции, связанные, например, с перемещением заготовок, находящихся в хвате, соединении элементов кузова автомобиля между собой группой роботов с последующим скреплением сваркой этих элементов между собой, обслуживание двумя и более роботами станков с ЧПУ. Вся работа по перемещению заготовок, элементов кузова автомобиля и т.п. проводится в совместном пространстве одной рабочей зоны, при этом траектории перемещения сегментов и схватов с заготовками роботов-манипуляторов находятся рядом и могут пересекаться.

Проблема столкновения сегментов роботов-манипуляторов в настоящее время решается разными способами, такими как программные, в которых операторы изначально программируют роботов-манипуляторов и технологическое оборудование, чтобы исключить возможность пересечения траекторий сегментов роботов-манипуляторов, в данном случае перемещения выполняются последовательно, что приводит к увеличению времени перемещения и не исключает возможность применять распределенный метод программирования. Отметим, что при программировании роботов-манипуляторов [8, с. 436; 9] распределенным способом уменьшается время перемещения сегментов роботов-манипуляторов, что приводит к увеличению производительности, но при этом необходимо использовать физические меры защиты от столкновений сегментов, например такие, как датчики, концевые выключатели, которые при столкновении останавливают роботов-манипуляторов, когда корректиру-

ются их траектории. Для увеличения производительности необходимо планировать траекторию движения сегментов роботоманипуляторов в реальном времени, просчитывая возможные пересечения сегментов и корректируя их перемещение. Для этого необходимо программное обеспечение с возможностью планирования траекторий сегментов роботоманипуляторов.

Цель исследования – повышение гибкости производственного процесса за счет сокращения аварий и повышения совместной скорости работы роботоманипуляторов. Для ее достижения сформированы следующие задачи:

- сформировать алгоритм проверки траекторий роботов на безаварийное движение в пространстве;
- ускорить совместную работу роботоманипуляторов;
- написать программный код, обеспечивающий работу алгоритма.

Материалы и методы исследования

В рамках задачи планирования движения робота-манипулятора [10, с. 205; 11] составлена обобщенная структурная схема планирования траектории его движения с учетом препятствий и предотвращения столкновений.

Рассмотрим обобщенную структурную схему управления роботоманипулятором, представленную на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема системы управления робота-манипулятора

Структурная схема в общем виде состоит из двух частей: системы управления и манипулятора.

Система управления включает:

- адаптивное управление промышленным роботом [12] – управление исполнительным устройством промышленного робота с автоматическим изменением управляющей программы в функции от контролируемых параметров состояния внешней среды;
- программное управление промышленным роботом – автоматическое управление исполнительным устройством промышленного робота по заранее введенной управляющей программе.

Манипулятор состоит из:

- исполнительных механизмов, которые управляют звеньями манипулятора.
- датчиков, собирающих информацию о состоянии элементов робота-манипулятора, их положении относительно друг друга и в пространстве, о рабочем пространстве, о расположении в пространстве элементов другого робота-манипулятора. Совокупное использование разнообразных типов датчиков, таких как датчики определения местоположения, касания, скольжения и силы движения, в одной конструкции позволит более точно оценить состояние оборудования и нахождение его элементов в пространстве и относительно друг друга.

Для реализации программы, обеспечивающей расчет координат пересечения траекторий сегментов роботоманипуляторов, при их совместной работе в одной рабочей зоне воспользуемся методом Денавита – Хартенберга [13; 14].

Прямая задача кинематики, как известно [13], состоит в расчете координат системы, связанных с рабочим органом, в зависимости от обобщенных координат манипулятора. Положение и ориентация твердого тела в пространстве описывается шестью координатами, три из которых – декартовы (линейные) и еще три – угловые (описываемые, например, углами Эйлера). Вышеупомянутый метод сокращает число параметров до четырех. Параметры Денавита – Хартенберга удается получить с помощью привязки систем координат к звеньям манипулятора.

Результаты исследования и их обсуждение

В построенном алгоритме, показанном на рис. 2, рассматривается работа двух роботоманипуляторов в общей рабочей зоне.

На первом этапе задаются параметры для звеньев первого и второго робота-манипулятора.

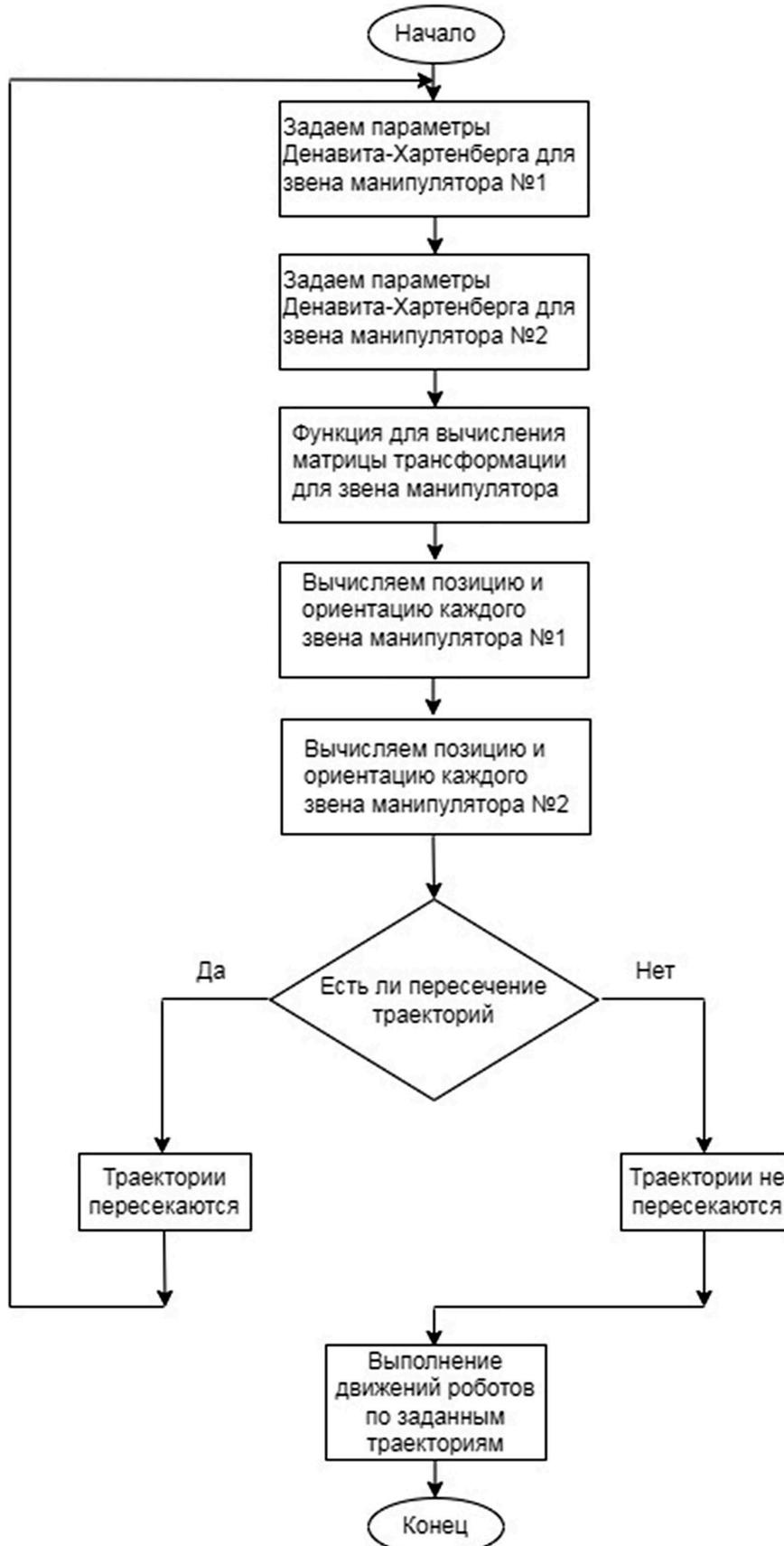


Рис. 2. Алгоритм

```

import numpy as np
import time

def dh_transform(theta, d, a, alpha):
    return np.array([
        [np.cos(theta), -np.sin(theta) * np.cos(alpha), np.sin(theta) *
np.sin(alpha),
        a * np.cos(theta)],
        [np.sin(theta), np.cos(theta) * np.cos(alpha), -np.cos(theta) *
np.sin(alpha),
        a * np.sin(theta)],
        [0, np.sin(alpha), np.cos(alpha), d],
        [0, 0, 0, 1]
    ])

def forward_kinematics(theta_list, dh_params):
    T = np.eye(4)
    for i in range(len(theta_list)):
        T_i = dh_transform(theta_list[i], dh_params[i][0], dh_params[i][1],
dh_params[i][2])
        T = np.dot(T, T_i)
    return T[:3, 3] # Положение конечного эффектора

def check_intersection(pos_a, pos_b, prohibited_area):
    return np.linalg.norm(pos_a - pos_b) < prohibited_area

def avoid_collision(theta_a, theta_b, adjustment=0.1):
    # Простейший алгоритм избегания: изменяем углы для уменьшения вероятности
#пересечения
    theta_a[1] += adjustment
    theta_b[1] -= adjustment

# Параметры ДХ (d, a, alpha) для двух манипуляторов
dh_params_robot_a = [(0.5, 0.5, 0), (0, 0.5, 0), (0, 0.5, 0)]
dh_params_robot_b = [(0.5, 0.5, 0), (0, 0.5, 0), (0, 0.5, 0)]

# Углы суставов
theta_list_a = [0, np.pi / 4, np.pi / 2] # Углы первого робота
theta_list_b = [0, np.pi / 4, np.pi / 2] # Углы второго робота

# Параметры запретной области
prohibited_area = 0.1 # Радиус запретной области

# Главный бесконечный цикл, имитирующий долгую работу роботов
try:
    while True: # Бесконечный цикл
        # Рассчитываем положения конечных эффекторов
        end_effector_a = forward_kinematics(theta_list_a, dh_params_robot_a)
        end_effector_b = forward_kinematics(theta_list_b, dh_params_robot_b)

        # Проверяем пересечение
        if check_intersection(end_effector_a, end_effector_b,
prohibited_area):
            print("Пересечение траекторий! Изменение углов.")
            avoid_collision(theta_list_a, theta_list_b, adjustment=0.1)
        else:
            print("Нет пересечения траекторий.")

        time.sleep(1) # Задержка на 1 секунду между итерациями для имитации
времени выполнения
except KeyboardInterrupt:
    print("Работа завершена пользователем.")

```

Рис. 3. Программный код

На втором этапе по заданным параметрам вычисляются позиции и ориентации звеньев манипуляторов. На третьем этапе происходит проверка пересечения траекторий. В случае отсутствия подтверждения пересечений траекторий движения работа роботов-манипуляторов продолжается. В случае, если есть пересечение траекторий, задаются новые параметры для звеньев и расчет повторяется.

На основе построенного алгоритма был разработан программный код для вычисления координат рабочего органа на Python, показанный на рис. 3, который позволяет определить матрицы преобразования для каждого звена робота и вычислить положение конечного сегмента манипулятора в пространстве для различных значений углов.

Заключение

Для обеспечения эффективной и безопасной работы роботов-манипуляторов на производстве необходимо тщательно планировать их движение и рабочие зоны. Перед внедрением в реальное производство необходимо проводить симуляции взаимодействия роботов-манипуляторов, чтобы убедиться в правильности их настройки. Разработанный код позволит на этапе моделирования исключить коллизии роботов-манипуляторов при совместном взаимодействии. Также необходимо, несмотря на использование точных математических моделей, интегрировать в систему безопасности датчики аварийной остановки.

Список литературы

1. Бойков В.И., Рудаков Р.В., Сержантова М.В. Идентификация n-звенных робототехнических манипуляторов // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 1(139). URL: <https://research-journal.org/archive/1-139-2024-january/10.23670/IRJ.2024.139.166> (дата обращения: 04.02.2025). DOI: 10.23670/IRJ.2024.139.166.
2. Рудаков Р.В., Бойков В.И., Бушуев А.Б., Быстров С.В., Литвинов Ю.В., Нуйя О.С., Сержантова М.В. Адаптивное

управление роботами для работы в условиях действия высоких температур // Информационно-управляющие системы. 2024 № 4. С. 12–23. DOI: 10.31799/1684-8853-2024-4-12-23.

3. Булгаков А.Г., Воробьев В.А. Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление. М.: СОЛОН-Пресс, 2018. 484 с.

4. Дунаева Е.С. Специфика применения роботов-манипуляторов в производстве // Актуальные вопросы современной экономики. 2021. № 10. С. 50–55. DOI: 10.34755/IROK.2021.42.87.007.

5. Xu P., Zheng J., Zhang J., Zhang K., Cui Y., Tang Q. Distributed position-force control for cooperative transportation with multiple mobile manipulators // Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2021. Vol. 12690 LNCS. P. 111–118. DOI: 10.1109/TCST.2017.2720673.

6. Козлов В.В., Макарычев В.П., Тимофеев А.В., Юревич Е.И. Динамика управления роботами. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. 336 с.

7. Тачков А.А., Козов А.В., Яковлев Д.С., Бузлов Н.А., Курочкин С.Ю. Принципы построения систем автономного управления движением наземных робототехнических комплексов специального назначения // Робототехника и техническая кибернетика. 2022. № 10 (2). С. 121–132. DOI: 10.31776/RTCJ.10205.

8. Spong M.W., Hutchinson S., Vidyasagar M. Robot modeling and control. John Wiley & Sons, 2020. 608 с.

9. Kantaros Y., Guo M., Zavlanos M. Temporal logic task planning and intermittent connectivity control of mobile robot networks // IEEE Transactions on Automatic Control. 2019. Vol. 64 (10). P. 4105–4120. DOI: 10.1109/TAC.2019.2893161.

10. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин, 4-е изд., перераб., доп. М.: Наука, 1988. 384 с.

11. Bill M., Muller C., Kraus W., Executive Summary World Robotics 2019 Industrial Robots, International Federation of Robotics, 2019. С. 13–16. URL: <https://ifr.org/downloads/press2018/Executive%20Summary%20WR%202019%20Industrial%20Robots.pdf> (дата обращения: 09.01.2025).

12. Zhang J., Wang S., Wang H., Lai J., Bing Z., Jiang Y., Zheng Y., Zhang Z. An adaptive approach to wholebody balance control of wheel-bipedal robot Ollie. In 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). P. 12835–12842. DOI: 10.1109/IROS47612.2022.9981985.

13. Хомченко В.Г. Метод виртуальных поворотов в решении обратной задачи кинематики платформенного типа // Омский научный вестник. 2015. № 2 (140). С. 41–44.

14. Ту Р. Разработка программного модуля для моделирования кинематики и динамики манипулятора // Прикладная математика & Физика. 2023. № 55 (1). С. 70–83. URL: <https://maths-physics-journal.ru/index.php/journal/article/view/187> (дата обращения: 04.02.25). DOI: 10.52575/2687-0959-2023-55-1-70-83.