

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

© Раин Т., 2023

DOI 10.20310/2686-9667-2023-28-141-90-96

УДК 004.896



## Описание программного комплекса для моделирования робота-манипулятора

Ту РАИН

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет  
(НИУ «БелГУ»)»

308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85

**Аннотация.** В статье предлагается разработка программного модуля для моделирования кинематики и динамики манипулятора с пятью степенями подвижности. Для решения прямой задачи кинематики манипулятора использован метод Денавита–Хартенберга. Для решения обратной задачи кинематики и динамики манипулятора использованы аналитические методы — метод Левенберга–Марквардта, метод Ньютона–Эйлера, и метод мягких вычислений — адаптивная нейро-нечеткая система вывода. Программный модуль для моделирования кинематики и динамики манипулятора разработан с использованием программного комплекса системы автоматизированного проектирования SolidWorks и программы MatLab. Полученный программный модуль позволяет выполнять моделирование кинематики и динамики манипулятора на основе описываемых методов, визуализацию результатов моделирования, формирование траектории для целевого положения и ориентации рабочего органа манипулятора, имитационное моделирование движения манипулятора по заданной траектории.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, моделирование кинематики, метод Левенберга–Марквардта, моделирование динамики, метод Ньютона–Эйлера, манипулятор

**Для цитирования:** Раин Т. Описание программного комплекса для моделирования робота-манипулятора // Вестник российских университетов. Математика. 2023. Т. 28. № 141. С. 90–96. DOI 10.20310/2686-9667-2023-28-141-90-96.

SCIENTIFIC ARTICLES

© T. Rain, 2023

DOI 10.20310/2686-9667-2023-28-141-90-96



## Program complex for modelling a manipulating robot

Thu RAIN

Belgorod State National Research University  
85, Pobedy St., Belgorod 308015, Russian Federation

**Abstract.** The article proposes the development of a software module for modeling the kinematics and dynamics of a manipulator with five degrees of freedom. To solve the forward kinematics problem of the manipulator, the Denavit–Hartenberg method was used. To solve the inverse kinematics and dynamics problem of the manipulator, analytical methods (the Levenberg–Marquardt method, the Newton–Euler method) and a soft computing method (adaptive neuro-fuzzy inference system) were used. The software module for modeling the kinematics and dynamics of the manipulator was developed using the software package of the SolidWorks computer-aided design system and the MatLab program. The developed software module is able to simulate the kinematics and dynamics of the manipulator based on the described methods, visualize the simulation results, generate a trajectory for the target position and orientation of the end-effector of the manipulator, simulate the movement of the manipulator along a given trajectory.

**Keywords:** computer modeling, kinematics modeling, Levenberg–Marquardt method, dynamics modeling, Newton–Euler method, manipulator

**Mathematics Subject Classification:** 34A30, 34C10, 34D05, 34K15.

**For citation:** Rain T. Program complex for modelling a manipulating robot. *Vestnik Rossiyskikh universitetov. Matematika = Russian Universities Reports. Mathematics*, 2023, vol. 28, no. 141, pp. 90–96. DOI 10.20310/2686-9667-2023-28-141-90-96. (In Russian, Abstr. in Engl.)

## Введение

Программное обеспечение для кинематического и динамического моделирования манипуляторов требуется для исследования движения рабочего органа, анализа конструкций, разработки системы автоматического управления и алгоритмов функционирования манипуляторов (см. [1, 2]). Одним из основных преимуществ программных симуляций является то, что они могут предоставить пользователям практическую обратную связь при разработке реальных систем. Это позволяет разработчику определить правильность и эффективность проекта еще до того, как система будет построена. Существуют несколько алгоритмов программного обеспечения для моделирования манипуляторов (см., например, [3, 4]). Во многих работах для кинематического анализа различных манипуляторов использовалась программа RoboAnalyzer. Программное обеспечение для автоматизированного проектирования «САПР», такое как SolidWorks, CATIA и Autodesk, также используется для моделирования манипуляторов.

В данной работе предлагается схема проектирования и осуществлена реализация программного модуля компьютерного и имитационного моделирования манипулятора в рабочей зоне. Реализация разработанных алгоритмов и методов позволит применять их при разработке манипуляторов, синтезе систем управления манипуляторами. Данный программный модуль компьютерного и имитационного моделирования также позволяет проводить эксперименты, необходимые для исследования предложенных в работе методов и алгоритмов. Разработанные программные модули предоставляют следующие функциональности: визуализация 3D моделирования; взаимодействие с пользователем через графический интерфейс; расчет обратной задачи кинематики «ОЗК» манипулятора на основе метода Левенберга–Марквардта и АНСВ; расчет обратной задачи динамики «ОЗД» манипулятора на основе метода Ньютона–Эйлера и АНСВ; формирование траектории для целевого положения и ориентации рабочего органа манипулятора; имитационное моделирование движения манипулятора по заданной траектории.

### 1. Постановка задачи и описание модели

Для программирования математического моделирования манипулятора выбрана среда «MATLAB». При реализации 3D моделирования предложено использовать САПР-программу «SolidWorks». С целью достижения фактического размера, степени свободы и других факторов, касающихся анимации и моделирования манипулятора, был рассмотрен манипулятор с пятью степенями свободы. После разработки 3D-деталей отдельные детали были собраны в один файл «сборка». После ввода деталей в сборку были введены шарниры вращения манипулятора. Также при виртуальной сборке манипулятора, помимо обычных ограничений, учитывалось то, что 3D-детали помещались в вертикальное положение. Это положение было принято для облегчения следующих шагов; собранное положение рассматривалось как исходное, и все изменения углов стыков рассчитывались в соответствии с этим положением.

Значения соответствующих параметров Денавита–Хартенберга, связанных с соглашением о присоединении систем отсчета к звеньям манипулятора (подробнее о параметрах Денавита–Хартенберга см. [5]), указаны в таблице 1, геометрических параметров — в таблице 2.

Таблица 1

Параметры Денавита–Хартенберга (Д-Х)  
манипулятора с пятью степенями свободы

| Звено | $a_i$ (м) | $\alpha_i$ (рад) | $d_i$ (м) | $\theta_i$ (рад) |
|-------|-----------|------------------|-----------|------------------|
| 1     | 0         | $\pi/2$          | $d_1$     | $\theta_1$       |
| 2     | 0.246     | 0                | 0         | $\theta_2$       |
| 3     | 0.163     | 0                | 0         | $\theta_3$       |
| 4     | 0         | $-\pi/2$         | 0         | $\theta_4$       |
| 5     | 0         | 0                | 0.165     | $\theta_5$       |

Таблица 2

Геометрические параметры манипулятора

| Звено | Высота (м) | Радиус (м) | Масса (кг) |
|-------|------------|------------|------------|
| 1     | 0.071      | 0.06       | 0.102      |
| 2     | 0.295      | 0.035      | 0.569      |
| 3     | 0.205      | 0.035      | 0.310      |
| 4     | 0.091      | 0.035      | 0.123      |
| 5     | 0.08       | 0.05       | 0.142      |

Затем модель интерпретируется в формат URDF (Унифицированный формат описания робототехники) для проведения моделирования и анализа. Процесс перевода САПР, по сути, состоит из двух этапов. Первоначально сборка САПР, разработанная в SolidWorks, экспортируется в формат URDF. Затем файл URDF импортируется в MATLAB для создания имитационной модели, которая будет открыта в среде моделирования.

## 2. Разработка компонентов программного интерфейса «GUI»

Для упрощения экспериментальной работы и получения лучшего представления о поведении системы в среде MATLAB был разработан графический пользовательский интерфейс (GUI) с использованием инструмента Среды разработки графического пользовательского интерфейса MATLAB (GUIDE). Для выбранного набора параметров графический интерфейс выполняет моделирование, отображающее временные характеристики углов сочленения, крутящих моментов в сочленениях и положения рабочего органа манипулятора.

Определение положения и ориентации рабочего органа при заданных значениях вектора обобщенных координат манипулятора называется прямой задачей кинематики. Прямую задачу кинематику манипулятора формулируют следующим образом: по заданному вектору обобщенных координат  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)^T$  найти положение и ориентацию рабочего органа  $s = f(\theta)$ . Положение и ориентацию рабочего органа будем искать в форме матрицы однородного преобразования

$$T_i = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad i = \overline{1, 5}$$

которая задает переход от системы координат  $i$ -го звена к системе координат  $(i - 1)$ -го звена,  $i = \overline{2, 5}$ . Согласно правилам Денавита–Хартенберга, матрица однородного преобразования  $T_i$  имеет вид

$$T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\alpha_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\alpha_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Выполняя необходимые вычисления, получим ориентацию рабочего органа

$$\begin{aligned} n_x &= s_1 s_5 - c_5 [c_4 (c_1 s_2 s_3 - c_1 c_2 c_3) + s_4 (c_1 c_2 s_3 + c_1 c_3 s_2)], \\ n_y &= -c_1 s_5 - c_5 [c_4 (s_1 s_2 s_3 - c_2 c_3 s_1) + s_4 (c_2 s_1 s_3 + c_3 s_1 s_2)], \\ n_z &= c_5 (c_4 s_2 s_3 + s_4 c_2 s_3), \\ o_x &= c_5 s_1 + [c_4 (c_1 s_2 s_3 - c_1 c_2 c_3) + s_4 (c_1 c_2 s_3 + c_1 c_3 s_2)], \\ o_y &= s_5 [c_4 (s_1 s_2 s_3 - c_2 c_3 s_1) + s_4 (c_2 s_1 s_3 + c_3 s_1 s_2)] - c_1 c_5, \\ o_z &= -s_5 [c_4 (c_2 s_3 + c_3 s_2) + s_4 (c_2 c_3 - s_2 s_3)], \\ a_x &= c_4 (c_1 c_2 s_3 + c_1 c_3 s_2) - s_4 (c_1 s_2 s_3 - c_1 c_2 c_3), \\ a_y &= c_4 (c_2 s_1 s_3 + c_3 s_1 s_2) - s_4 (s_1 s_2 s_3 - c_2 c_3 s_1), \\ a_z &= s_4 (c_2 s_3 + c_3 s_2) - c_4 (c_2 c_3 - s_2 s_3); \end{aligned}$$

а также положение рабочего органа

$$\begin{aligned} p_x &= d_5 [c_4 (c_1 c_2 s_3 + c_1 c_3 s_2) - s_4 (c_1 s_2 s_3 - c_1 c_2 c_3)] + a_2 c_1 c_2 + a_3 c_1 c_2 c_3 - a_3 c_1 s_2 s_3, \\ p_y &= d_5 [c_4 (c_2 s_1 s_3 + c_3 s_1 s_2) - s_4 (s_1 s_2 s_3 - c_2 c_3 s_1)] + a_2 c_2 s_1 + a_3 c_2 c_3 s_1 - a_3 s_1 s_2 s_3, \\ p_z &= d_1 + a_2 s_2 - d_5 [c_4 (c_2 c_3 - s_2 s_3) - s_4 (c_2 s_3 + c_3 s_2)] + a_3 c_2 s_3 + a_3 c_3 s_2. \end{aligned}$$

Определение вектора обобщенных координат, который позволяет манипулятору достичь желаемых положения и ориентаций рабочего органа, называется обратной задачей кинематики. В данной работе для численного решения обратной задачи кинематики используется метод Левенберга–Марквардта. Кинематические параметры манипулятора представлены набором ограничений, которые накладываются на вектор обобщенных координат. Ограничение по положению рабочего органа можно записать в виде

$$p_i(\theta) = p_i^d,$$

где  $p \in \mathbb{R}^3$  — текущее положение рабочего органа,  $p^d \in \mathbb{R}^3$  — целевое положение в пространстве. Для ограничения ориентации используется условие

$$R_i(\theta) = R_i^d,$$

где  $R_i \in SO(3)$  — ориентация рабочего органа,  $R_i^d \in SO(3)$  — целевая ориентация в пространстве. В обоих случаях вектор невязок  $e_i(\theta)$  может быть определен как

$$e_i(\theta) = \begin{cases} p_i^d - p_i(\theta), \\ \alpha(R_i^d R_i(\theta)^T), \end{cases}$$

где  $\alpha(R) \in \mathbb{R}^3$  для произвольного  $R \in SO(3)$  — эквивалентный вектор угла–оси.

Принимая число всех ограничений равным  $3m$ , определим вектор невязок

$$e(\theta) = [e_1^T(\theta), e_2^T(\theta), \dots, e_m^T(\theta)]^T \in \mathbb{R}^{3m}.$$

Решение обратной задачи кинематики сводится к решению следующего нелинейного уравнения

$$e(\theta) = 0.$$

Алгоритм метода Левенберга–Марквардта включает следующие этапы:

ШАГ 1. Инициализация значений, которые будут использоваться для настройки коэффициента демпфирования: параметров  $\theta$ , весовой матрицы  $W_E$ , параметра  $\lambda$ , а также  $\lambda_{up}$  и  $\lambda_{down}$ .

ШАГ 2. Проверка счетчика итераций: если счетчик итераций не достиг максимального количества шагов, то переход к шагу 3, если достиг, то переход к концу алгоритма.

ШАГ 3. Расчет матрицы преобразования  $T_i$  и оценка вектора невязок  $e$ .

ШАГ 4. Проверка: если  $C < tol$ , то переход к концу; если  $C > tol$ , то переход к шагу 5.

ШАГ 5. Вычисление матрицы Якобиана  $J$ ,  $g_k = JW_E J + \lambda I$ , функции стоимости,  $\nabla C = J^T W_E e$  и  $C = \frac{1}{2}e^2$ .

ШАГ 6. Вычисление нового значения  $\theta_{new} = \theta + g^{-1}\nabla C$ .

ШАГ 7. Оценка нового вектора невязок  $e_{new}$  в точке, заданной  $\theta_{new}$  и вычисление функции оценки в новой точке  $C_{new} = \frac{1}{2}e_{new}^2$ .

ШАГ 8. Проверка: если  $C_{new} > C$ , то отклонить шаг, сохранить старый параметр предположения  $\theta$  и старые невязки  $e$ , настроить  $\lambda = \lambda \times \lambda_{up}$  и перейти к шагу 2; а если  $C_{new} < C$ , то принимать шаг, установить  $\theta = \theta_{new}$  и  $e = e_{new}$ ,  $\lambda = \lambda/\lambda_{down}$  и перейти к шагу 2.

**Закключение.** В данной работе для программирования математического моделирования манипулятора использован язык программирования MATLAB. Для реализации 3D-модели манипулятора использована САПР-программа «SolidWorks». Разработаны программные модули для компьютерного и имитационного моделирования перемещения манипулятора в рабочей зоне со следующими функциями: визуализация 3D-моделирования; взаимодействие с пользователем через графический интерфейс; расчет ОЗК манипулятора на основе метода Левенберга–Марквардта; расчет ОЗД манипулятора на основе метода Ньютона–Эйлера; формирование траектории для целевого положения и ориентации рабочего органа манипулятора; имитационное моделирование движения манипулятора по заданной траектории.

## References

- [1] Т. Раин, В. М. Довгаль, Н. С. Ян, “Моделирование кинематического управления роботом-манипулятором «Intelbot» на основе адаптивной нейро-нечеткой системы вывода (ANFIS)”, *Научные ведомости БелГУ. Сер. Экономика. Информатика*, **45** (2018), 497–509. [T. Rain, V. M. Dovgal, N. S. Yan, “Modelling of the adaptive neuro-fuzzy inference system based control of 5-dof robotic manipulator “Intelbot”, *Belgorod State University Scientific Bulletin. (Economics. Information Technologies)*, **45** (2018), 497–509 (In Russian)].
- [2] Т. Раин, Н. С. Ян, “Моделирование динамики манипулятора с использованием адаптивной нейро-нечеткой системы вывода”, *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*, **7:4** (2019), 1–14. [T. Rain, V. M. Dovgal, N. S. Yan, “Dynamic modelling of manipulator using adaptive neuro fuzzy inference system Modeling”, *Modeling, Optimization and Information Technology*, **7:4** (2019), 1–14 (In Russian)].

- [3] В. Н. Нестеров, К. В. Жеребятьев, “Математическое моделирование шестизвенного манипулятора универсального промышленного робота. Прямая кинематическая задача для робота ПР125”, *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*, 2005, № 32, 19–28. [V. N. Nesterov, K. V. Zherybyatiev, “Mathematical modeling of a six-link manipulator of a universal industrial robot. Direct kinematic problem for the PR125 robot”, *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, 2005, № 32, 19–28 (In Russian)].
- [4] С. В. Алексева, “Математическое моделирование одного типа трехзвенного манипулятора робота”, *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*, 2019, № 229, 255–265. [S. V. Alekseeva, “Mathematical modeling of one type of three-link robot manipulator”, *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoy Akademii*, 2019, № 229, 255–265 (In Russian)].
- [5] J. Angeles, *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems. Theory, Methods and Algorithms*, Springer, New York, 2007.

### Информация об авторе

**Раин Ту**, научный соискатель. Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация. E-mail: thurein.48@gmail.com  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5964-0641>

Поступила в редакцию 21.11.2022 г.  
Поступила после рецензирования 02.03.2023 г.  
Принята к публикации 10.03.2023 г.

### Information about the author

**Thu Rain**, Research Applicant. Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation. E-mail: thurein.48@gmail.com  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5964-0641>

Received 21.11.2022  
Reviewed 02.03.2023  
Accepted for press 10.03.2023