

МАТРУНЧИК Ю.Н.

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЙ ОБУЧАЮЩИЙ КОМПЛЕКС

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

Рассматриваются аспекты создания робототехнического обучающего комплекса для обучения по принципу «снизу-вверх» способам проектирования, программирования и моделирования работы промышленных манипуляторов с пятью степенями подвижности на базе современных микроконтроллеров. Основная цель разработки – это повышение эффективности процесса проектирования робототехнических комплексов, импортозамещение.

Предлагается решить следующие задачи: разработка робототехнического обучающего комплекса (далее – РТОК), его имитационной и математической модели; идентификация и оптимизация модели; разработка электрической принципиальной схемы РТОК; создание имитационной модели манипулятора; разработка учебно-методического комплекса для проведения для обучения персонала основам проектирования и программирования промышленных манипуляторов с оснасткой под производственные задачи различной степени сложности.

В качестве примера для оценки работоспособности предлагаемого комплекса рассматривается модель электрической части РТОК, построенной в среде программирования Proteus8Professional. Представлены иллюстрации опытного образца комплекса.

Ключевые слова: робот, манипулятор, модель, микроконтроллер, электрическая принципиальная схема, траектория манипулятора, настройка параметров

Введение

Робототехника – прикладная наука, занимающаяся разработкой автоматизированных технических систем и являющаяся важнейшей технической основой развития производства [1]. Робототехнический комплекс – это вид станочных систем, имеющий одно или более технологическое оборудование в своем составе при наличии в нём промышленных роботов. Роботизированный комплекс состоит из оборудования, в пределах которого изделие перемещается поштучно [2].

За последнее десятилетие среднегодовые темпы роботизации по данным Международной федерации робототехники составили 13,3 процента, удвоившись с 2015 года [3].

На малых предприятиях, характеризующихся мелкосерийным производством, промышленные роботы оснащены одним видом рабочего инструмента и для выполнения полного цикла производства требуется несколько роботов, которые расположены вдоль конвейера, по которому перемещается обрабатываемая заготовка либо же смену инструмента выполняет технический персонал вручную. На более крупных и технически развитых предприятиях конвейерные линии оборудованы универсальными промышленными роботами, оснащенными наборами сменных инструментальных насадок и позволяют проводить несколько технологических операций с применением малого количества основного технологического оборудования [4].

Основная часть

Разработанный на кафедре «Робототехнические системы» БНТУ робототехнический обучающий комплекс (далее – РТОК) является обучающим образцом для конструирования нового поколения на рынке образовательной робототехники. Данный РТОК легко может быть модифицирован из образовательной сферы в производственную путем незначительных доработок с учетом производственных задач конкретного потребителя (машиностроительное производство, приборостроение и радиоэлектронная промышленность, сельское хозяйство, пищевая промышленность и т. д.).

Математическая модель технического устройства дает возможность сопоставления законов управления на этапе проектирования РТОК (проверка управляемости, законы управления с прогнозом и т. п.). Такая модель предполагает учет точности позиционирования, задаваемой производственной задачей (пользователем), что позволяет сделать более рациональным перерасчет координат в зависимости от изменения условий задания.

Таким образом, еще до момента сборки готового робототехнического комплекса можно решать задачу планирования и оптимизации желаемой траектории движения собственного спроектированного манипулятора в различных системах координат, вычисление угловых скоростей движения рабочего органа манипулятора под различные применения РТОК.

Повышение эффективности процесса проектирования сложных РТОК достигается за счет группировки следующих составляющих: математической модели РТОК; открытой электрической схемы РТОК; алгоритмического обеспечения РТОК; открытого кода программы, написанного на языках высокого уровня; 3D моделей всех механических частей РТОК; кинематической схемы манипулятора; имитационной модели РТОК в открытом программном обеспечении САПР.

Обучающий РТОК представляет собой манипулятор с дистанционным устройством управления в виде перчатки с датчиками и кнопками и может быть дополнен магазинами инструментов со сменными головками для обеспечения автоматической смены рабочих органов. Опытный образец РТОК, разработанный на кафедре «Робототехнические системы» БНТУ представлен на рисунке 1.

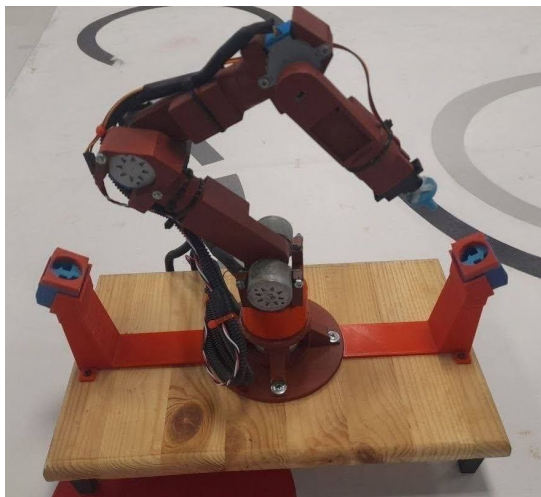


Рисунок 1. Опытный образец робототехнического обучающего комплекса в сборе

Особенность данного РТОК заключается в том, что его механические исполнительные элементы являются сборно-разборными, детали механизмов напечатаны на 3D принтере из пластика PLA, который является экологически чистым материалом и рекомендован Министерством образования для использования в учреждениях образования Республики Беларусь.

РТОК и соответствующие методики могут найти применение при создании робототехнических систем и комплексов для обучения детей и молодежи в системе дополнительного образования, а также в инженерных классах и кружках робототехники, в высших учебных заведениях, осуществляющих подготовку специалистов по специальности «Робототехнические системы».

РТОК состоит из манипуляционного промышленного робота, дополненного вспомогательными устройствами. Робот-манипулятор имеет пять степеней подвижности, в качестве моторов

приводной части используются шаговые двигатели и сервомотор для вращения механического интерфейса с инструментом. Взаимодействие между контроллерами устройств РТОК происходит через модули беспроводной связи. Траектория движения робота зависит от выбранной технологической операции, согласно технологическому заданию по обработке соответствующей детали или сборки. Робот-манипулятор оснащен механизмом смены инструмента, управляемый от микроконтроллера ATmega328P. Дополнительно могут быть установлены датчики положения, параметры которых передаются пользователю для контроля и принятия решения по их изменению для правильного позиционирования робота и обрабатываемых деталей в рабочем пространстве манипулятора. Роботизированный магазин сменных инструментов оснащен механизмом ориентирования сменного инструмента в номенклатуре заданного типоразмера. Для движения манипулятора, а также обеспечения автоматической установки и снятия инструмента в данном РТОК используются шаговые двигатели с драйверами, датчики – гироскоп и акселерометр, управляющие кнопки и сигнальная аппаратура. Управление РТОК осуществляется от контроллера ATmega328P, установленного на плате Arduino Uno или Nano. Дистанционное Wi-Fi соединение плат по интерфейсу ESP8266. Электрическая принципиальная схема опытного образца РТОК представлена на рисунке 2.

Построение схемы и симуляция ее работы производилась в программной среде Proteus 8 Professional. Proteus – является средой для проектирования и отладки электротехнических устройств, а также создания электрических принципиальных схем на основе различных микроконтроллеров. Программная среда Proteus 8 Professional дает возможность реализовывать схему в графическом редакторе, моделировать процесс работы разрабатываемого устройства и печатной платы. Отличительной чертой пакета Proteus является возможность эффективного моделирования работы разнообразных микроконтроллеров (PIC, 8051, AVR, HC11, ARM7/LPC2000 и др.) и отладки их микропрограммного обеспечения [5].

Манипулятор РТОК состоит из звеньев вращательного типа. При этом вращение звеньев манипулятора выполняется вокруг собственной оси. Движение манипулятора РТОК осуществляется в сферической системе координат, что обеспечивает обслуживание наибольшей рабочей зоны. Движение рабочей точки инструмента (РТИ) происходит за счет относительных угловых поворотов звеньев робота. Для нахождения кинематической модели робота-манипулятора решается классическая прямая задача кинематики, которая состоит в расчете положения и ориентации звеньев манипулятора [8].

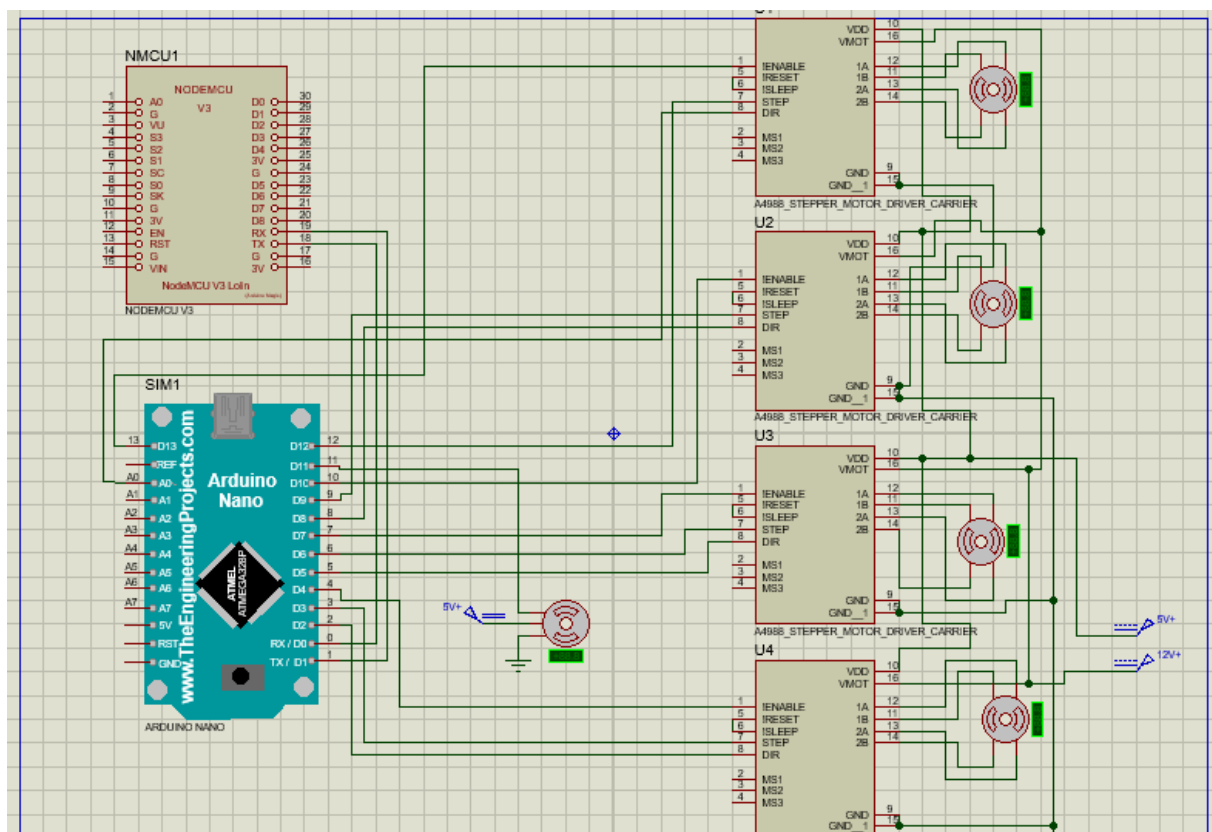


Рисунок 2. Электрическая принципиальная схема опытного образца РТОК

Для того, чтобы описать вращательные связи соседних звеньев манипулятора РТОК и решить прямую задачу кинематики используется метод преобразования Денавита-Хартенберга – матричный способ последовательного расчета систем координат, связанных со звеньями открытой кинематической цепи. Сформированная матрица однородных преобразований дает возможность описать положение системы координат звена относительно системы координат предыдущего. Таким образом, получаем последовательное преобразование координат РТИ манипулятора из системы координат последнего звена (механического интерфейса) в базовую систему координат, которая является неподвижной

и постоянной для рассматриваемой динамической системы [9] (рисунок 3). Системы координат звеньев манипулятора РТОК определяются следующим образом [9]:

- 1) ось Z_{i-1} направлена вдоль оси i -го сочленения, $i = 1; 5$;
- 2) ось X_i перпендикулярна оси Z_{i-1} и направлена от нее;
- 3) ось Y_i дополняет оси X_i, Z_i до правой декартовой системы координат.

Преобразование Денавита-Хартенберга зависит от геометрических параметров каждого звена манипулятора, описывающих его вращательное движение.

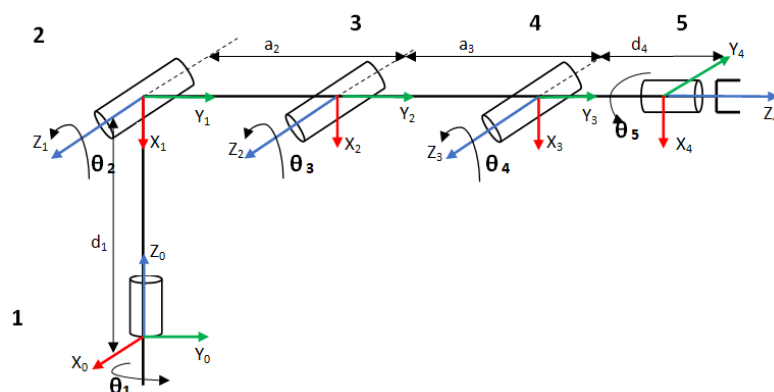


Рисунок 3. Разложение звеньев манипулятора РТОК по методу преобразования Денавита-Хартенберга

Схеме, представленной на рисунке 3, соответствует таблица значений обобщенных параметров звеньев манипулятора РТОК (таблица). Все звенья манипулятора вращательного типа.

Таблица. Таблица обобщенных параметров манипулятора РТОК

Номер звена	Смещение звена d , мм	Длина звена a , мм	Угол поворота α , рад
1	80,0	0	$\pi/2$
2	0	110,0	0
3	0	110,0	0
4	110,0	0	0
5	0	0	$\pi/2$

В таблице 1: α – угол поворота вокруг общей нормали, от предыдущей оси z к новой (постоянная величина). Согласно таблице и рисунку 3 представление Денавита–Хартенберга имеет следующий вид:

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i S\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

где $C_i = \cos\theta_i$, $S_i = \sin\theta_i$, θ – угол между сочленениями манипулятора.

Данный способ описания кинематических связей манипулятора позволяет определить положение любого i -го звена относительно $(i-1)$ -го звена. После формирования системы Денавита–Хартенберга для всех звеньев составляется матрица преобразования T_0^5 , которая связывает i -ю и $(i-1)$ -ю систему координат ${}^{(i-1)}A_i$ [9].

$$T_0^5 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 \quad (2)$$

Таким образом, выражение (2) дает возможность решать прямую задачу кинематики для пятизвездного манипулятора РТОК. Уравнения, полученные в результате решения прямой задачи кинематики, используются при решении обратной задачи кинематики.

Заключение

Разработанный оригинальный образец РТОК, как новое средство обучения, может улучшить качество образовательного процесса. Его полностью открытая структура, как в механической, так и в электрической части, дает возможность обучающимся практиковаться в области проектирования и программирования промышленных роботов по методике «от простого к сложному». Элементы и механизмы робота-манипулятора РТОК могут быть распечатаны обучающимися по 3D моделям образцового манипулятора. Данный РТОК соответствует современным требованиям к оборудованию для изучения основ программирования, конструирования, схемотехники, 3D моделирования и печати.

ЛИТЕРАТУРА

1. Политехнический терминологический толковый словарь / Составление: В. Бутаков, И. Фаграбянц. – М.: Polyglossum, 2014. – 526 с.
2. Гибкие производственные системы, промышленные роботы, робототехнические комплексы: Практ. пособие. В 14 кн. Кн. 6. Б. И. Черпаков, В. Б. Великов и ч. Робототехнические комплексы / Под ред. Б.И. Черпакова. – М.: Высш. шк., 1989. – 95 с.
3. WIPO Всемирная организация интеллектуальной собственности [Электронный ресурс]. – Электронные данные. Режим доступа: <https://www.wipo.int/ru/web/global-innovation-index/w/blogs/2024/robotics-industry>.
4. Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении : материалы XI международной научно-практической конференции, Минск, 5 апреля 2023 г. / Белорус. национальный техн. университет ; редкол.: А. Р. Околов [и др.]. – Минск : БНТУ, 2023. – 166 с.
5. Proteus. Интегрированная среда для разработки электронных устройств, в.ч. на микроконтроллерах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/soft/avr/Proteus.htm> – Дата доступа: 20.02.2025.
6. **Зенкевич, С.Л., Ющенко А.С.** Основы управления манипуляционными роботами. 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 480 с.
7. **Тягунов, О.А.** Математические модели и алгоритмы управления промышленных транспортных роботов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2013. – Т. 5, № 5. – С. 69.
8. **Фу, К., Гонсалес Р., Ли К.** Робототехника / Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 624 с.
9. **Шахинпур, М.** Курс робототехники / Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 527 с.
10. **P. Corke Robotics.** Version and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB/ P. Corke. – Springer, 2011. – 570 p.

REFERENCES

1. Polytechnic terminological explanatory dictionary / Compiled by: V. Butakov, I. Fagradayants. – M.: Polyglossum, 2014. – 526 p.

2. Flexible manufacturing systems, industrial robots, robotic complexes: Practical. manual. In 14 books. Book 6. B. I. Cherpakov, V. B. Velikov, etc. Robotic complexes / Ed. by B. I. Cherpakov. – M.: Higher. school, 1989. – 95 p.
3. WIPO World Intellectual Property Organization [Electronic resource]. – Electronic data. Access mode: <https://www.wipo.int/ru/web/global-innovation-index/w/blogs/2024/robotics-industry>.
4. Innovative technologies, automation and mechatronics in mechanical engineering and instrument engineering: Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference, Minsk, April 5, 2023 / Belarusian National Technical University; editorial board: A. R. Okolov [et al.]. – Minsk: BNTU, 2023. – 166 p.
5. Proteus. Integrated environment for developing electronic devices, including microcontrollers [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/soft/avr/Proteus.htm> – Access date: 02/20/2025.
6. **Zenkevich, S. L., Yushchenko A. S.** Fundamentals of control of manipulation robots. 2nd ed. - M.: Publishing house of Moscow State Technical University. N. E. Bauman, 2014. – 480 p.
7. **Tyagunov, O. A.** Mathematical models and control algorithms for industrial transport robots // Information, measuring and control systems. – 2013. – Vol. 5, No. 5. – P. 69.
8. **Fu, K., Gonzalez R., Lee K.** Robotics / Translated from English. – Moscow: Mir, 1989. – 624 p.
9. **Shahinpour, M.** Course in robotics / Translated from English. – Moscow: Mir, 1990. – 527 p.
10. **P. Corke Robotics.** Version and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB / P. Corke. – Springer, 2011. – 570 p.

MATRUNCHYK YU.N.

ROBOTIC TRAINING COMPLEX

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

The article considers aspects of creating a robotic training complex for teaching, based on the "bottom-up" principle, methods of designing, programming and modeling industrial manipulators with five degrees of freedom based on modern microcontrollers. The main goal of the development is to increase the efficiency of the design process of robotic complexes, import substitution. It is proposed to solve the following problems: development of a robotic training complex (hereinafter – RTC), its simulation and mathematical model; identification and optimization of the model; development of an electrical circuit diagram of the RTC; creation of a simulation model of the manipulator; development of a training and methodological complex for training personnel in the basics of designing and programming industrial manipulators with equipment for production tasks of varying complexity. As an example for assessing the performance of the proposed complex, a model of the electrical part of the RTC, built in the Proteus8Professional programming environment, is considered. Illustrations of a prototype of the complex are presented.

Keywords: robot, manipulator, model, microcontroller, electrical circuit diagram, manipulator trajectory, parameter setting



Матрунчик Юлия Николаевна, старший преподаватель кафедры «Робототехнические системы» Белорусского национального технического университета. Основные направления научной деятельности: автоматизация технологических процессов и производств: системы управления, системы автоматизированного проектирования и моделирования, робототехника, промышленные роботы и робототехнические системы. Куратор профиля «Робототехника» программы дополнительного образования одаренных детей и молодежи УО «Национальный детский технопарк». Член жюри в республиканских конкурсах по робототехнике среди учащихся учебных заведений Республики Беларусь. Секретарь учебно-методического объединения по образованию в области автоматизации технологических процессов, производств и управления. Автор более 90 печатных работ.

Matrunchik Yu.N., senior lecturer of the Department of Robotic Systems of the Belarusian National Technical University. Main areas of scientific activity: Automation of technological processes and production: control systems, computer-aided design and modeling systems, robotics, industrial robots and robotic systems. Curator of the Robotics profile of the additional education program for gifted children and youth of the Educational Institution National Children's Technopark. Jury member in national competitions in robotics among students of educational institutions of the Republic of Belarus. Secretary of the educational and methodological association for education in the field of automation of technological processes, production and management. Author of more than 90 published works.

Тел.: +37517293-95-51

E-mail: matrunchik@bntu.by