Ростов Николай Васильевич¹, доцент, канд. техн. наук, доцент; Ростова Екатерина Николаевна², аспирант

КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ПЛАНИРОВАНИЯ СИЛОМОМЕНТНЫХ ОПЕРАЦИЙ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННЫМИ РОБОТАМИ

 ¹ Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, rostovnv@mail.ru;
 ² Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, rostovae@mail.ru

Аннотация. В работе рассматриваются системы программного управления манипуляционными 6-звенными роботами, содержащие многокомпонентный датчик силы и момента, развиваемых рабочим органом робота. Проанализированы алгоритмы планирования контактных операций с задаваемыми ориентациями рабочего органа и векторов силы и момента. Разработаны компьютерные модели систем позиционного и силомоментного управления. Осуществлена настройка регуляторов приводов звеньев робота и многомерных цифровых регуляторов силы и момента. По результатам компьютерного моделирования рассматриваемых систем управления при выполнении роботом контактных операций проведена оценка динамических ошибок сил и моментов с разными вариантами задания их ориентаций.

Ключевые слова: манипуляционный робот, система программного управления, многокомпонентный датчик силы и момента, планирование контактных операций, позиционное управление, силомоментное управление, регулятор, компьютерное моделирование, динамическая ошибка.

*Nikolay V. Rostov*¹, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences; *Ekaterina N. Rostova*², Postgraduate Student

COMPUTER ANALYSIS OF PLANNING ALGORITHMS OF FORCE-TORQUE OPERATIONS IN ROBOT MANIPULATOR CONTROL SYSTEMS

¹ Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, rostovnv@mail.ru;

² St. Petersburg Federal Research Center of RAS, St. Petersburg, Russia, rostovae@mail.ru

Abstract. The article investigates program control systems of a 6-link robot manipulator with a multicomponent force-torque sensor in the robot tool. Planning algorithms of

contact operations with given orientation of a robot tool and orientation of force and torque vectors are discussed. Computer models of position and force-torque control systems under consideration are built. Tuning of regulators for robot link drives and multivariable digital regulators of force and torque is completed. Based on the results of computer simulation, dynamic errors of control system for different variants of given orientations of force and torque vectors have been estimated in contact operation modes.

Keywords: robot manipulator, program control system, multicomponent force-torque sensor, planning contact operation, position control, force-torque control, regulator, computer simulation, dynamic error.

Введение

Объектами исследования в данной статье являются системы программного управления 6-звенными манипуляционными роботами, в которых используются многокомпонентные (реальные или виртуальные) датчики, измеряющие или вычисляющие координаты векторов силы и момента, развиваемых рабочим органом (PO) робота при выполнении им контактных технологических операций. В таких системах требуется непосредственно регулировать координаты векторов силы и момента PO робота на заданных уровнях.

Предметом рассмотрения являются алгоритмы планирования контактных операций для систем управления с задаваемой ориентацией не только положения PO, но и с требуемыми ориентациями развиваемыми им векторами силы и момента, а также компьютерное исследование динамических процессов, возникающих при выполнении роботом таких операций.

Основными задачами, поставленными в работе, являются:

1) рассмотрение методов задания ориентаций в системах управления манипуляционными роботами;

2) анализ алгоритмов позиционного и силомоментного управления роботом с задаваемой ориентацией РО и векторов силы и момента;

3) разработка компьютерных моделей систем позиционного и силомоментного управления и настройка регуляторов приводов звеньев робота и 3-мерных цифровых регуляторов силы и момента РО;

4) компьютерное анализ процессов в системах позиционного и силомоментного управления при выполнении роботом контактных операций с разными вариантами задания ориентаций РО и векторов силы и момента и оценка их динамических ошибок.

1. Методы задания ориентации рабочего органа

Как известно, положение и ориентацию рабочего инструмента в базовой системе координат робота определяет 4 × 4 матрица следующего вида [1, 3, 6]:

$$T_N(q) = A_1(q_1)A_2(q_2)\cdots A_N(q_N) = \begin{pmatrix} R & P \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где $A_i(q_i) - 4 \times 4$ матрицы, $P = (X, Y, Z)^T - 3 \times 1$ вектор координат положения, $R = (n \ o \ a) - 3 \times 3$ матрица поворота системы координат РО, столбцами которой являются 3×1 векторы:

$$n = \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix}, o = \begin{pmatrix} o_x \\ o_y \\ o_z \end{pmatrix}, a = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix}.$$

Наиболее общим методом является задание матрицы поворота *R* двумя векторами с 6 параметрами и использованием операции векторного произведения:

$$(o \quad a) \quad \to \quad n = o \times a. \tag{1}$$

Вторым методом является задание ориентации 4 параметрами – углом ϑ поворота вокруг некоторой оси, ориентированной вектором V_c направляющих косинусов:

$$(\vartheta \quad V_c) = (\vartheta \quad c_x \quad c_y \quad c_z). \tag{2}$$

Третьим методом является задание ориентации 3 углами Эйлера (одним из 6 возможных их вариантов):

$$EUL = (\varphi \quad \vartheta \quad \psi)^T. \tag{3}$$

Методом же, наиболее часто используемым в системах управления роботами, является задание ориентации 3 углами крена, тангажа и рысканья:

$$RPY = (\theta_{roll} \quad \theta_{pitch} \quad \theta_{yaw})^T, \tag{4}$$

или другими углами Кардано из 6 их вариантов.

На практике же ориентация РО вначале может задаваться одним из этих методов, а затем при необходимости в алгоритмах управления может преобразовываться в другому варианту.

2. Итерационное решение ОЗК без непосредственного вычисления матрицы Якоби

При позиционном управлении роботом вектором состояния является 6×1 вектор $S = {P \choose 0}$, где *P* и *O* – векторы координат положения $(X, Y, Z)^T$ и углов ориентации РО.

В алгоритмах позиционного управления основной задачей является обратная задача кинематики (ОЗК) о программных положениях звеньев робота:

$$q_p = (q_{p1}, q_{p2}, \dots, q_{p6})^{\mathrm{T}} = F_M^{-1}(S_p),$$
(5)

где $S_p = \begin{pmatrix} P_p \\ O_p \end{pmatrix}$ – заданный программный вектор положения и ориентации, $F_M^{-1}(S_p)$ – нелинейная 6 × 1 вектор-функция, обратная функции $F_M(q)$, соответствующей кинематической схеме исполнительного механизма робота.

Задача (5) требует решения системы нелинейных алгебраических уравнений следующего вида

$$F(q) = F_M(q) - S_p = 0,$$
 (6)

где F(q) – вектор невязки, 0 – нулевой 6 × 1 вектор, q – искомый вектор программных положений q_p звеньев робота.

Решение системы (6) может проводиться с вычислением матрицы Якоби механизма робота по достаточно сложным аналитическим или рекурсивным выражениям [3, 7]. При планировании же контактных операций с задаваемой ориентацией РО целесообразнее решать ОЗК итерационными численными методами в более общей постановке без непосредственного вычисления матрицы Якоби, как нелинейную задачу наименьших квадратов – задачу минимизации квадрата нормы вектора невязки

$$||F(q)||^2 \to \min_{q \in D^N'},\tag{7}$$

где состав элементов и размерность вектора невязки будут зависеть от используемого метода задания ориентации.

Если положения звеньев ограничены областью допустимых значений $q \in D^N$, то задача (7) должна решаться методами условной минимизации. В этом случае точные решения ОЗК могут отсутствовать.

При задании ориентации векторами (о а) вектор невязки имеет размерность (9x1) – 3 ошибки по координатам положения и 6 ошибок по координатам векторов ориентации:

$$\begin{pmatrix} P_p - P(q) \\ o_p - o(q) \\ a_p - a(q) \end{pmatrix}^2 \to \min_{q \in D^N}.$$

$$(8)$$

При задании ориентации углом ϑ и вектором косинусов V_c вектор невязки имеет размерность (7x1) - 3 ошибки по координатам положения, ошибку по углу ϑ и 3 ошибки по направляющим косинусам:

$$\begin{pmatrix} P_p - P(q) \\ \vartheta_p - \vartheta(q) \\ V_p - V_c(q) \end{pmatrix} ^2 \to \min_{q \in D^N}.$$
(9)

При задании ориентации вектором RPY углов вектор невязки имеет размерность (6х1) – 3 ошибки по координатам положения и 3 ошибки по RPY углам:

$$\left\| \frac{P_p - P(q)}{RPY_p - RPY(q)} \right\|^2 \to \min_{q \in D^N}.$$
 (10)

3. Алгоритм замкнутого силомоментного управления

Замкнутое управление по векторам силы и момента включает в себя решение в режиме реального времени следующих задач [4, 5]:

1) задание программных координат силы и момента:

$$F_{p} = (F_{xp}, F_{yp}, F_{zp})^{\mathrm{T}}, T_{p} = (T_{xp}, T_{yp}, T_{zp})^{\mathrm{T}};$$
(11)

2) измерение (или вычисление путем решения ПЗК) векторов обратных связей о реальных силе и моменте:

$$\begin{pmatrix} F_r \\ T_r \end{pmatrix} = \left(J^T(q_r) \right)^{-1} Q_r, \tag{12}$$

где q_r – вектор положений звеньев робота; Q_r – векторы моментов в шарнирах робота;

3) вычисление векторов ошибок по силе и моменту рабочего органа:

$$dF = F_p - F_r, dT = T_p - T_r;$$
(13)

4) вычисление векторов выходов трехмерных регуляторов силы и момента:

$$U_F = (u_{Fx}, u_{Fy}, u_{Fz})^{\mathrm{T}}, U_T = (u_{Tx}, u_{Ty}, u_{Tz})^{\mathrm{T}};$$
(14)

5) решение ОЗК о программных моментах в шарнирах звеньев робота:

$$Q_{,p} = J^T(q_r) \begin{pmatrix} U_F \\ U_T \end{pmatrix},\tag{15}$$

являющихся входными воздействиями для моментных приводов звеньев робота.

4. Компьютерные модели системы управления

На рис. 1 представлена Simulink-модель рассматриваемой системы позиционного управления с 6 приводами с двигателями постоянного тока, ПИ-регуляторами токов и цифровыми ПИД-регуляторами положений звеньев робота. Модель содержит следующие основные блоки:

 – Program: блок массива *q_p* с вычисленными программными положениями 6 звеньев робота; – 6Rdyn-robot: моделирующий динамику исполнительного механизма робота;

 – 6 Torque Drives: содержащий модели моментных приводов с ПИ-регуляторами тока;

– 6 TDigital PID-RP: блок с моделями цифровых ПИД-регуляторов положений звеньев робота;

– ikine-FT: вычисляющий нагрузочные моменты в шарнирах 6 звеньев робота по векторам внешних векторов силы и момента;

– C/M: переключатель операций: С – контактные операции без движения PO, М – операции, выполняемые с его перемещением.



Рис. 1. Модель системы позиционного управления

На рис. 2 представлена Simulink-модель системы силомоментного управления, содержащей приводы с ПИ-регуляторами тока и 2 внешних контура с 3-мерными цифровыми ПИД-регуляторами силы и момента.



Рис. 2. Модель системы силомоментного управления

Модель содержит следующие блоки:

- Program: блок программных координат векторов силы и момента;

– Force-Torque Sensor: вычисляющий обратные связи по силе и моменте рабочего органа;

– Digital PID-F, Digital PID-T: моделируют 3-мерные цифровые ПИДрегуляторы координат векторов силы и момента.

Значения параметров ПИ-регуляторов токов и цифровых ПИД-регуляторов положений звеньев робота и 3-мерных цифровых ПИД-регуляторов силы и момента были настроены в процессе компьютерного моделирования с учетом особых требований, предъявляемых при выполнении контактных операций:

 отсутствие перерегулирования в переходных процессах по входным и возмущающим воздействиям;

– идентичность динамических процессов по XYZ-координатам для уменьшения контурных ошибок при позиционировании РО;

 идентичность динамических процессов по координатам силы и момента для уменьшения ошибок в контактной полиции.

5. Результаты компьютерного моделирования

На рис. 3 представлены результаты позиционирования РО робота из исходного положения с начальной его ориентацией

$$\theta_{roll} = 45$$
 град, $\theta_{pitch} = 45$ град, $\theta_{vaw} = 45$ град,

в контактную позицию с заданной программной ориентацией

$$\theta_{roll} = 0$$
 град, $\theta_{pitch} = 85$ град, $\theta_{yaw} = 0$ град.



Рис. 3. Позиционирование РО в контактную позицию

На рис. 4 представлены результаты выполнения силовой контактной операции с заданной ориентацией вектора силы и приложением вектора внешней нагрузочной силы $Force_L$ в момент времени $t_L = 0.05$ с.



Рис. 4. Выполнение силовой контактной операции

На рис. 5 представлены результаты выполнения моментной контактной операции с заданной ориентацией вектора момента и приложением вектора внешнего момента $Torque_L$ в момент времени $t_L = 0.05$ с.



Рис. 5. Выполнение моментной контактной операции

По результатам моделирования вычислялись модули векторов сил и моментов и их динамических ошибок, представленные на рис. 6.



Рис. 6. Модули векторов

Заключение

Показано, что при планировании контактных операций с задаваемой ориентацией рабочего органа целесообразно решать ОЗК, как нелинейную задачу наименьших квадратов, применяя итерационные численные методы без непосредственного вычисления матрицы Якоби исполнительного механизма робота.

На основе рассмотренных алгоритмов разработаны компьютерные модели цифровых систем программного управления 6-звенным манипуляционным роботом, позволяющие исследовать динамические процессы при выполнении роботом контактных операций и оценивать их показатели.

Компьютерный анализ показывает, что система управления, непосредственно замкнутая по векторам силы и момента, обеспечивает малые динамические ошибки.

Параметры компьютерных моделей исследуемых систем управления задавались не для конкретного робота и в них использовались упрощенные модели исполнительного механизма робота и приводов его звеньев, поэтому приведенные оценки динамических показателей имеют только сравнительный характер.

На практике полученные в работе результаты могут быть использованы в учебном процессе, а также могут учитываться при проектировании систем программного управления манипуляционными роботами с силомоментным очувствлением.

Список литературы

1. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Основы управления манипуляционными роботами: учебник для вузов. – 2-е изд., исправ. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 480 с.

2. Юревич Е. И. Основы робототехники: учеб. для вузов. – 3-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 359 с. 3. Игнатова Е. И., Лопота А. В., Ростов Н. В. Системы управления движением роботов. Компьютерное проектирование. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2014. – 302 с.

4. Ростов Н. В., Ростова Е. Н. Синтез и компьютерное моделирование систем управления манипуляционными роботами с силовым очувствлением // Системный анализ в проектировании и управлении: сб. науч. трудов XXVI Междунар. науч.-практич. конф., г. Санкт-Петербург, 13–14 октября 2022 г.: в 3-х частях. – Ч. 2. – СПб.: Изд-во ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2023. – С. 117–126.

5. Rostova E., Rostov N., Sobolevsky V. Synthesis and simulation of biotechnical position-force control system of a robot manipulator with reconfigurable structure // Proceedings of the 9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control (MIM 2019). – 2019. – Vol. 52, Iss. 13. – Pp. 1097–1101. – DOI:https://doi.org/10.1016/ j.ifacol.2019.11.342.

6. Lewis F. L. Abdallah C. T., Dawson D. M. Robot manipulator control: theory and practice. – 2nd edition. – CRC Press, 2003. – 638 p.

7. Park F., Lynch K. Modern robotics: mechanics, planning and control. – Cambridge University Press, 2016 – 544 p.