УДК 681.5.01

DOI 10.35211/1990-5297-2021-9-256-17-21

*Н. С. Воробьева***СТАБИЛИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА
ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ****Волгоградский государственный аграрный университет**

vgsxa@mail.ru

Рассматривается метод построения терминального управления, основанный на представлении управляющих функций относительно времени. Параметры функций определяются из условия удовлетворения граничным условиям на концах траектории движения обобщенных координат манипулятора. На основе полученных программных движений строится закон управления с обратными связями.

Ключевые слова: манипулятор-трипод, робот, слабое терминальное управление.

*N. S. Vorob'eva***STABILIZATION OF THE SPATIAL POSITION
OF THE MANIPULATOR OF A PARALLEL-SEQUENTIAL STRUCTURE****Volgograd State Agrarian University**

A method for constructing terminal control based on the representation of control functions relative to time is considered. The parameters of the functions are determined from the condition of satisfying the boundary conditions at the ends of the trajectory of the generalized coordinates of the manipulator. On the basis of the obtained program movements, a control law with feedbacks is constructed.

Keywords: manipulator-tripod, robot, weak terminal control.

Введение

Современный этап развития научно-технического прогресса характеризуется возрастающим применением манипуляционных робототехнических систем. Манипуляционные механизмы находят все большее применение в различных отраслях промышленности [1, 2], при упаковке продукции [3], а также в технологических процессах при производстве и переработке сельскохозяйственной продукции [4].

В последнее время получили распространение разработки манипуляторов параллельно-последовательной структуры (гибридные). К наиболее важным задачам при разработке таких манипуляторов относятся кинематический анализ, разработка методов синтеза перемещений рабочего органа в пространстве с требованием устойчивости заданных параметров, координация движений приводных исполнительных механизмов. На вход системы управления должны поступать управляющие сигналы, формирующие программные законы перемещения исполнительных приводов манипулятора.

Постановка задачи

Рассматривается манипулятор, в основе которого лежит механизм параллельной структуры на основе трипода, состоящий из трех ак-

тивных исполнительных звеньев переменной длины (рис. 1) AM , BM , CM , концы которых соединены между собой посредством пятиподвижного сферического шарнирного узла, обеспечивающего пересечение геометрических осей этих цилиндров в одной точке. Для увеличения маневренности и манипулятивности основание трипода ABC имеет возможность изменять угол наклона к горизонту за счет дополнительного исполнительного звена AD .

Рис. 1. Манипулятор параллельно-последовательной структуры

В точке M к триподу с помощью цилиндрического шарнира присоединен трехзвенный захват ME последовательной структуры с тремя управляемыми степенями свободы [5] (рис. 1, 2).

отсчета Ox_{uz} и обратную задачу для захватного устройства – определение обобщенных координат углов α, ψ, β [7].

На втором этапе решения задачи позиционирования необходимо определить законы изменения обобщенных координат $l_k(t)$, ($k=1 \div 4$), $\alpha(t), \psi(t), \beta(t)$, удовлетворяющих заданным граничным условиям.

Метод решения

Решение задачи определения закона изменения обобщенных координат возможно кинематическим синтезом слабого терминального управления. Слабое терминальное управление переводит объект из заданного начального состояния в заданную окрестность конечного состояния за заданное время.

Считаем, что для каждого исполнительного звена известны контуры управления, замкнутые по обобщенным координатам, $q_i(t)$, $i=1-6$ [8]. В этом случае решение задачи сводится к определению законов формирования задающих воздействий $q_i(t)$ для исполнительных приводов, обеспечивающих перемещение рабочего органа в заданное положение.

В начальный момент времени $t=0$ конфигурация манипулятора определяется длинами исполнительных звеньев $q_i(0)=q_i^0$, $i=1-4$ и углами $\alpha(0)=0$, $\psi(0)=0$, $\beta(0)=0$. В конечной точке $E(x_{E0}, y_{E0}, z_{E0})$ конфигурация манипулятора определяется длинами исполнительных звеньев q_{i0} , $i=1-4$ и направляющими косинусами захватного устройства α_{pq} .

Принимаем, что на траектории движения отклонения обобщенных координат от конечного состояния исполнительных звеньев $\Delta q_k(t) = q_k^0 - q_k(t)$ изменяются в соответствии с решением дифференциального уравнения

$$\Delta \ddot{q}_k(t) + a_{k1} \Delta \dot{q}_k(t) + a_{k2} \Delta q_k(t) + a_{k3} \Delta q_k(t) = 0, \quad (2)$$

где a_{k1}, a_{k2}, a_{k3} – постоянные положительные числа.

Уравнение (2) позволяет сформировать законы движения рабочего органа без скачков ускорений в начальной и конечной точках изменения обобщенных координат манипулятора [9]. Законом формирования задающих воздействий $q_k(t)$ исполнительных приводов, опре-

деляемых уравнениями (2), соответствуют дифференциальные уравнения

$$\ddot{q}_k(t) + a_{k1} \dot{q}_k(t) + a_{k2} q_k(t) + a_{k3} q_k(t) = a_{k3} q_k^0, \quad (3)$$

при начальных условиях, описывающих конфигурацию манипулятора при $t_0 = 0$

$$q_k(0) = q_{k0}, \quad \dot{q}_k(0) = \dot{q}_{k0}, \quad \ddot{q}_k(0) = \ddot{q}_{k0}. \quad (4)$$

Общее решение уравнения (3) имеет вид

$$q_k(t) = q_k^0 + C_{1k} e^{p_{1k}t} + C_{2k} e^{p_{2k}t} + C_{3k} e^{p_{3k}t}, \quad (5)$$

где корни p_{1k}, p_{2k}, p_{3k} – корни соответствующего характеристического однородного уравнения.

Постоянные интегрирования находим из (5) с учетом (4):

$$\begin{aligned} C_{1k} &= \frac{-\Delta l_k(0) p_{2k} p_{3k} - \dot{l}_{k0} (p_{2k} + p_{3k}) + \ddot{l}_{k0}}{(p_{1k} - p_{2k})(p_{1k} - p_{3k})}, \\ C_{2k} &= \frac{\Delta l_k(0) p_{1k} p_{3k} + \dot{l}_{k0} (p_{1k} + p_{3k}) - \ddot{l}_{k0}}{(p_{1k} - p_{2k})(p_{2k} - p_{3k})}, \\ C_{3k} &= \frac{-\Delta l_k(0) p_{1k} p_{2k} - \dot{l}_{k0} (p_{1k} + p_{2k}) + \ddot{l}_{k0}}{(p_{1k} - p_{3k})(p_{2k} - p_{3k})}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\Delta q_k(t) = q_k^0 - q_k(t)$.

Коэффициенты уравнений (2) определяются через корни характеристического уравнения p_{1k}, p_{2k}, p_{3k} :

$$\begin{aligned} a_{k1} &= -(p_{1k} + p_{2k} + p_{3k}), \\ a_{k2} &= p_{1k} p_{2k} + p_{2k} p_{3k} + p_{1k} p_{3k}, \\ a_{k3} &= -p_{1k} p_{2k} p_{3k}. \end{aligned}$$

Для обеспечения требования $q_k(t) \rightarrow q_k^0$ при $t \rightarrow \infty$ корни характеристического уравнения отрицательные разные. Значения корней характеристического уравнения следует выбирать из допустимых параметров мобильности манипулятора [10] (предельно допустимые скорости перемещения захвата в рабочей зоне) и требуемого времени попадания в целевую точку с необходимой погрешностью.

Закон изменения обобщенных координат манипулятора (5) является программным. Чтобы построить закон управления с обратными связями, необходимо вычислять выражения (3) по текущим значениям обобщенных координат

$$\ddot{q}_k^*(t) = -a_{k1} \dot{q}_k(t) - a_{k2} q_k(t) + a_{k3} [q_k^0 - q_k(t)]. \quad (7)$$

В формулах (6) за начальные значения обобщенных координат принимают их текущие значения. Обратная связь в контурах управления приводными двигателями осуществляется по переменным $q_k(t), \dot{q}_k(t), \ddot{q}_k(t)$. Значения

этих переменных используются при вычислении выражений, входящих в формулу (7) погрешностью.

Структурная схема системы управления конечным положением захвата манипулятора приведена на рис. 3.

Рис. 3. Структурная схема терминальной системы управления

На рис. 4, 5 приведены результаты расчетов при перемещении захватного устройства из положения, определяемого координатами точки M ,

$x_{M0}=162,2$ мм, $y_{M0}=154,1$ мм, $z_{M0}=778,6$ мм в точку с координатами $x_M=200$ мм, $y_M=50$ мм, $z_M=970$ мм по законам:

$$\begin{aligned} l_1(t) &= l_{10} - \Delta l_{10} (3e^{-t} - 3e^{-2t} + e^{-3t}), & l_2(t) &= l_{20} - \Delta l_{20} (3e^{-t} - 3e^{-2t} + e^{-3t}), \\ l_3(t) &= l_{30} - \Delta l_{30} (3e^{-t} - 3e^{-2t} + e^{-3t}), & l_4(t) &= l_{40} - \Delta l_{40} (3e^{-t} - 3e^{-2t} + e^{-3t}) \\ \Delta l_{10} &= -219 \text{ мм}, \Delta l_{20} = -73,2 \text{ мм}, \Delta l_{30} = -275,6 \text{ мм}, \Delta l_{40} = -227,5 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Рис. 4. Законы изменения длин исполнительных звеньев

Рис. 5. Законы изменения скоростей штоков исполнительных звеньев

Заключение

Из графиков (рис. 4, 5) видно, что в момент времени 6 с происходит коррекция программной траектории. Необходимость коррекции программной траектории вызвана воздействием внешних возмущений. Анализ замкнутой системы показал, что с течением времени подвижный объект попадает в конечную область целевой точки с заданной точностью, однако величина этой области зависит от динамических свойств системы управления. При принятых значениях параметров системы управления отклонения от заданного положения не превышают 3 %, а скорости и ускорения практически равны нулю.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Афонин, В. Л. Обработка оборудования на основе механизмов параллельной кинематики / В. Л. Афонин, П. В. Подзоров, В. В. Слепцов. – М. : Машиностроение, 2006. – 448 с.
2. Бушуев, В. В. Механизмы параллельной структуры в машиностроении / В. В. Бушуев, И. Г. Хольшев // СТИН. – 2001. – № 1. – С. 3–8.
3. Серков, Н. А. Точность многокоординатных машин с ЧПУ : Теоретические и экспериментальные основы / Н. А. Серков. – М. : ЛЕНАНД, 2015.
4. Робот-манипулятор FlexPicker IRB 360 компании AAB [Электронный ресурс] / www.abb.com/robotics. – Режим доступа : http://www.roboticturnkeysolutions.com/robots/abb/datasheet/IRB_360.pdf
5. Пат. 2616493 Российская Федерация, МПК В66С 23/44. Манипулятор-трипод параллельно-последователь-

ной структуры / В. В. Жога, В. В. Дяшкин-Титов, А. В. Дяшкин, Н. С. Воробьева, И. А. Несмиянов, А. Г. Иванов ; опубл. 17.04.2017. Бюл. № 11.

6. Определение зоны обслуживания мобильного манипулятора-трипода / В. М. Герасун, В. В. Жога, И. А. Несмиянов, Н. С. Воробьева, В. В. Дяшкин-Титов // Машиностроение и инженерное образование. – 2013. – № 3. – С. 2–8.

7. Задача позиционирования манипулятора параллельно-последовательной структуры с управляемым захватным устройством / В. В. Жога, В. В. Дяшкин-Титов, И. А. Несмиянов, Н. С. Воробьева // Мехатроника,

автоматизация, управление. – 2016. – № 8. – Т. 17. – С. 525–530.

8. *Пшихопов, В. Х.* Аналитическое конструирование нелинейных систем терминального управления / В. Х. Пшихопов // Сб. РАН «Новые концепции общей теории управления». – М.; Таганрог, 1995. – С. 125–141.

9. *Коловский, М. З.* Основы динамики промышленных роботов / М. З. Коловский, А. В. Слоущ. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1998. – 240 с.

10. *Крутько, П. Д.* Обратные задачи динамики управляемых систем: нелинейные модели / П. Д. Крутько. – М. : Наука. Физматлит, 1988. – 328 с.