

УДК 62-50

СИНТЕЗ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА ПО ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ

БАТЫРКАНОВ Ж.И., КАРМЫШАКОВ А.К.
КГТУ им. И. Раззакова
askar1969@mail.ru

Рассматривается задача управления траекторным движением простейших кинематических механизмов с тремя степенями свободы (трехзвенных роботов) с несколькими управляющими входами. С использованием дифференциально-геометрических методов нелинейной теории управления предложена методика анализа динамики таких систем и процедура синтеза алгоритмов управления, обеспечивающих решение траекторной задачи.

The management problem is considered trajectory movement of the elementary kinematic mechanisms with three degrees of robots with several operating inputs. With use of differential-geometrical methods of the nonlinear theory of management the technique of the analysis of dynamics of such systems and procedure of synthesis of algorithms of the management providing the decision trajectory of a problem is offered.

Введение. Новые задачи управления сложными кинематическими механизмами обусловлены появлением робототехнических систем нетривиальной конструкции, к которым относятся роботы избыточной структуры, шагающие и многоколесные механизмы, маятнкоподобные и гироскопические системы. Наряду с задачами управления избыточными роботами [1, 2, 4], для которых число управляющих входов превышает степень свободы механизма, возникают проблемы стабилизации и управления пространственным движением механизмов, у которых количество входов меньше числа степеней свободы [2], т.е. недостаточно для реализации обычных режимов работы робота – стабилизации, программного или траекторного управления. Тем не менее, несмотря на ограниченные функциональные возможности таких систем, они оказываются вполне пригодны для решения целого ряда специфических задач. К последним относятся задачи стабилизации положения неуправляемого конечного звена манипуляционного робота, задачи стабилизации центра тяжести шагающего механизма, стабилизации положения многоканальной гироскопической системы, а также соответствующие задачи поддержания их колебательных движений или траекторного управления. При этом уменьшение числа входов и, следовательно, исполнительных устройств (приводов) положительно сказывается на энергетических, массогабаритных и стоимостных показателях. С точки зрения теории управления рассматриваемый класс механических объектов может быть отнесен к не полностью управляемым многоканальным объектам, а соответствующие задачи управления – к задачам частичной стабилизации [1,2].

Модели манипуляционных роботов. Разработанный экспериментальный образец манипулятора, предназначенный для имитации рабочего органа, имеет конструктивную схему, показанную на рис.1. Расчетная схема манипулятора, работающего в сферической системе координат $(\varphi_1, \varphi_2, r)$, показана на рис.2. Звено 1 имеет массу m_1 и момент инерции J_1 относительно оси вращения Ox_2 . 11

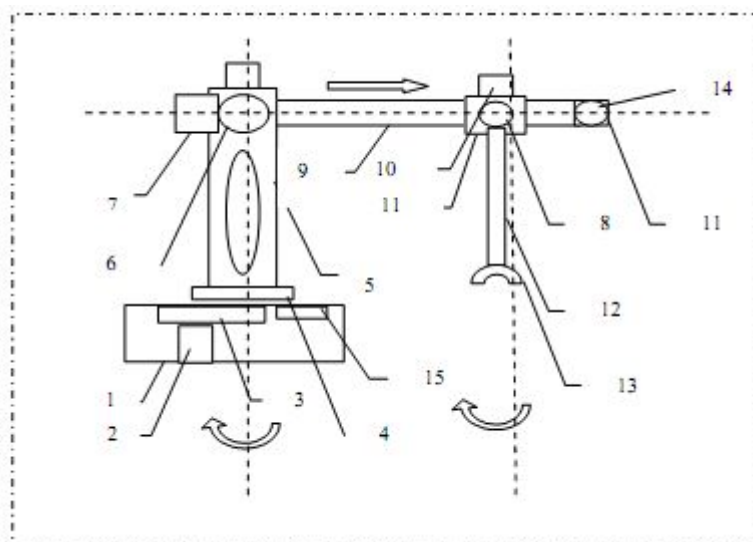


Рис.1. Конструктивная схема манипуляционного робота (МР).

На рисунке обозначены: 1 – корпус основания; 2, 7, 10 – электрические двигатели постоянного тока; 3, 6, 11 – редукторы; 4 – опорная плита 1-го звена; 5 – 1-е звено; 9 – 2-е звено; 12 – 3-е звено (трубка с токоведущими проводами; 13 – схватывающий механизм МР; 14, 15, 8 – датчики положения.

Через m_2 и m обозначена масса второго звена и груза (инструмента). Манипулятор имеет две вращательные и одну поступательную кинематические пары. Обобщенными координатами являются углы поворота φ_1 , φ_2 и длина стрелы r . Считаем, что m -контролируемая точка.

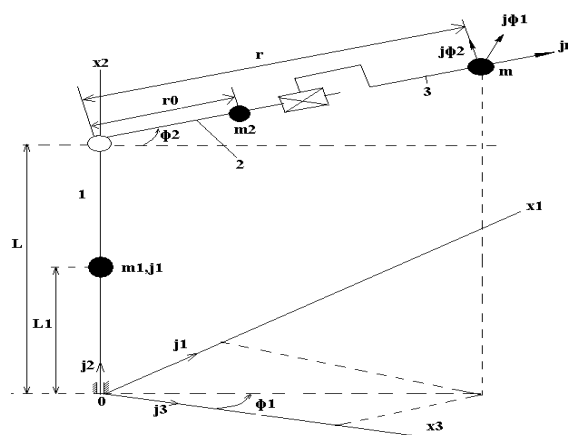


Рис.2. Расчетная схема манипулятора

Ее координаты x_1, x_2, x_3 в декартовой системе $x_1 = r \sin \varphi_1 \cos \varphi_2$, $x_2 = l + r \sin \varphi_2$, $x_3 = r \cos \varphi_1 \cos \varphi_2$. (1)

Уравнения кинематики для скоростей получаются в результате дифференцирования (1) по времени. Вновь продифференцировав уравнения кинематики для скоростей по времени, можно получить уравнения кинематики для ускорений. При необходимости они могут быть записаны в векторной форме. При конструировании алгоритмов управления движением манипуляторов используются кинематические и динамические уравнения. Принимаем, что управляемому исполнительному механизму соответствует векторное кинематическое уравнение

$$x(t) = F(q(t)), x = (x_1, x_2, x_3), q = (q_1, q_2, \dots, q_m). (2)$$

где x_j - координаты пространственного положения контролируемой точки механизма в принятой системе отсчета, q_s - кинематические переменные, характеризующие взаимное положение звеньев механизма. Вектор – функция $F(q)$, входящая в (2), дважды дифференцируема по q и такая, что координаты $x_j(t)$ однозначно определяются значениями $q_s(t)$ в любой момент времени t ; m определяет число степеней подвижности манипулятора.

Применительно к указанным математическим моделям рассмотрим задачи построения алгоритмов стабилизации пространственного положения исполнительного механизма. Синтез алгоритма управления по ускорениям проведен согласно приведенной методике в [3]:

Последовательность синтеза алгоритма управления и постановка задачи.

1. Уравнение динамики МР в сферической системе координат

$$A(q)\ddot{q}(t) + B(q, \dot{q})\dot{q} = \lambda U - NM_c(\dot{q}) \quad (3)$$

Здесь $M = (M_1 M_2 \dots M_m)$ - вектор сил и моментов, развиваемых приводами в степенях подвижности манипулятора. Матрицы $A(q)$, $B(q, \dot{q})$ и вектор $C(q)$ характеризуют инерционные свойства механизма.

$$A(q) = \begin{bmatrix} A_{\varphi_1}(r, \varphi_2) & 0 & 0 \\ 0 & A_{\varphi_2}(r) & 0 \\ 0 & 0 & A_r \end{bmatrix} \text{ - матрица коэффициентов уравнения.}$$

$$A(q) = \begin{bmatrix} 0,027 + 0,0028 \cos^2 \varphi_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0028 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1 \end{bmatrix}$$

$$B(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} b_{\varphi_1}(\varphi, \dot{\varphi}, r, \dot{r}) \\ b_{\varphi_2}(\varphi, \dot{\varphi}, r) \\ b_r(\varphi, \dot{\varphi}, r) \end{bmatrix} \text{ - матрица, характеризующая инерционные свойства механизма.}$$

$$B(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 3,2 * 10^{-6} \dot{\varphi}_1 + 0,005 \cos^2 \varphi_2 \dot{\varphi}_1 \dot{r} - 0,0028 \sin^2 \varphi_1 \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 \\ 2,1 * 10^{-7} \dot{\varphi}_2 + 0,0014 \sin 2\varphi_2 \dot{\varphi}_1 + 0,027 \cos \varphi_2 \\ 2,1 * 10^{-7} \dot{r} + 0,098 \sin \varphi_2 - 0,025 \cos^2 \varphi_2 \dot{\varphi}_1 - 0,025 \varphi_2^2 \end{bmatrix}$$

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0006 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0007 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0007 \end{bmatrix} \text{ - матрица коэффициентов.}$$

$$N = \begin{bmatrix} n_1 & 0 & 0 \\ 0 & n_2 & 0 \\ 0 & 0 & n_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,016 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0125 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0125 \end{bmatrix} \text{ - матрица коэффициентов редукторов.}$$

$$M_c(\dot{q}) = \begin{bmatrix} M_{c1}(\dot{\varphi}_1) \\ M_{c2}(\dot{\varphi}_2) \\ M_{c3}(\dot{r}) \end{bmatrix} \text{ - матрица статических моментов.}$$

2. Постановка задачи: синтезируемый алгоритм управления должен обеспечивать перевод механизма из произвольного начального состояния

$$\varphi(0), \dot{\varphi}(0), \varphi_2(0), \dot{\varphi}_2(0), r(0), \dot{r}(0) \quad (4)$$

в назначенное состояние, которое соответствует неподвижной точке $(\varphi_1^0, \varphi_2^0, r^0)$. Необходимо при этом, чтобы переходные процессы $\varphi_i(t) \rightarrow \varphi_i^0, i = 1, 2; r(t) \rightarrow r^0$ с необходимой точностью следовали за решениями дифференциальных уравнений:



$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}_i^*(t) + \gamma_{i1}\dot{\varphi}_i^*(t) + \gamma_{i0}\varphi_i^*(t) &= \gamma_{i0}\varphi_i^0 & i = 1, 2. \\ \ddot{r}^*(t) + \gamma_{r1}\dot{r}^*(t) + \gamma_{r0}r^*(t) &= \gamma_{r0}r^0 \end{aligned} \quad (5)$$

при начальных условиях, соответствующих (4). γ_{i0}, γ_{i1} - назначаемые коэффициенты;

3. Алгоритм управления:

$$U(t) = \alpha_\varphi \int \varepsilon^* dt - \alpha \dot{q}(t)$$

$$U_1(t) = \alpha_{\varphi_1} \left(\int_0^t \varepsilon_1^* dt - \dot{\varphi}_1 \right); \quad \varepsilon_1^* = \gamma_{10}(\varphi_1^0 - \varphi_1) - \gamma_{11}\dot{\varphi}_1$$

$$U_2(t) = \alpha_{\varphi_2} \left(\int_0^t \varepsilon_2^* dt - \dot{\varphi}_2 \right); \quad \varepsilon_2^* = \gamma_{20}(\varphi_2^0 - \varphi_2) - \gamma_{21}\dot{\varphi}_2 \quad (6)$$

$$U_3(t) = \alpha_r \left(\int_0^t w_r^* dt - \dot{r}(t) \right); \quad w_r^* = \gamma_{r0}(r^0 - r) - \gamma_{r1}\dot{r}$$

Существенная особенность законов управления вида (6) заключается в том, что их синтез выполнен без детального представления уравнений математической модели управляемого объекта. При очень высоком быстродействии контура ускорения замкнутая система обладает выраженными свойствами адаптивности.

Значения параметров матриц уравнения (3) определены следующим образом:

$$A_{\varphi_1}(r, \varphi_2) = I_1 + \bar{I}_1 n_1^2 + I \cos^2 \varphi_2 \quad A_{\varphi_1}(r, \varphi_2) = 0,027 + 0,0018 \cdot 0,016^2 + 0,0028 \cdot \cos^2 \varphi_2; \text{ где}$$

$I_1 = 0,027 \text{ кг м}^2$ - момент инерции звена 1; $\bar{I}_1 = 0,0018 \text{ кг м}^2$ - момент инерции вала двигателя постоянного тока (ДПТ) 1;

$$I = m_2 r_0^2 + m r^2 \quad I = 0,35 \cdot 0,08^2 + 0,01 \cdot 0,25^2 = 0,0028 \text{ кг м}^2;$$

$m_2 = 0,35 \text{ кг}$ - масса звена 2; $r_0 = 0,08 \text{ м}$ - расстояние от начала стрелы до точки вращения;

$m = 0,01 \text{ кг}$ - масса груза (инструмента) звена 3; $r = 0,25 \text{ м}$ - длина стрелы; $n_1 = \frac{1}{60} = 0,016$ -

коэффициент передачи редуктора в сочленении 1.

$$A_{\varphi_2}(r) = I + \bar{I}_2 n_2^2 = 0,0028 + 0,0011 \cdot 0,0125^2 = 0,0028; \quad \bar{I}_2 = 0,0011 - \text{ момент инерции вала ДПТ 2;}$$

$n_2 = \frac{1}{80} = 0,0125$ - коэффициент передачи редуктора в сочленении 2.

$$A_r = \bar{I}_3 n_3^2 + m h_3^2 = 0,0011 \cdot 0,0125^2 + 0,01 \cdot 1 = 0,01; \quad \bar{I}_3 = 0,0011 - \text{ момент инерции вала ДПТ 3;}$$

$h_3 = 1, \quad n_3 = \frac{1}{80} = 0,0125$ - коэффициент передачи редуктора в сочленении 3.

$$b_{\varphi_1} = \frac{k_{m1} k_{w1}}{R_1} n_1^2 \dot{\varphi}_1 + 2 m r \cos^2 \varphi_2 \dot{\varphi}_1 \dot{r} - I \sin^2 \varphi_1 \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2; \quad k_{m1} = 0,5 - \text{ коэффициент момента ДПТ 1;}$$

$k_{w1} = 0,037$ - коэффициент противоЭДС ДПТ 1; $R_1 = 12 \text{ Ом}$ - сопротивление якорной цепи ДПТ 1.

$$b_{\varphi_1} = 3,2 \cdot 10^{-6} \dot{\varphi}_1 + 0,005 \cos^2 \varphi_2 \dot{\varphi}_1 \dot{r} - 0,0028 \sin^2 \varphi_1 \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2;$$

$$b_{\varphi_2} = \frac{k_{m3} k_{w3}}{R_2} n_2^2 \dot{\varphi}_2 + \frac{1}{2} I \sin^2 \varphi_2 \dot{\varphi}_1 + (m_2 r_0 + m r) g \cos \varphi_2 \quad b_r = \frac{k_{m3} k_{w3}}{R_3} n_3^2 \dot{r} + m h_3^2 (g \sin \varphi_2 - r \cos^2 \varphi_2 \dot{\varphi}_1^2 - r \dot{\varphi}_2^2) =$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2; \quad k_{m2} = 0,45; \quad k_{w2} = 0,026; \quad R_2 = 8 \text{ Ом} \quad = 2,1 \cdot 10^{-7} \dot{r} + 0,098 \sin \varphi_2 - 0,025 \cos^2 \varphi_2 \dot{\varphi}_1^2 - 0,025 \dot{\varphi}_2^2$$

Матрица λ :

$$\lambda_{11} = n_1 h_1 \frac{k_{m1}}{R_1} = 0,016 \cdot 1 \cdot \frac{0,5}{12} = 0,0006; \quad \lambda_{22} = \lambda_{33} = n_2 h_2 \frac{k_{m2}}{R_2} = 0,0125 \cdot 1 \cdot \frac{0,45}{8} = 0,0007. \text{ Значени}$$

я γ_{i0}, γ_{i1} принимаются такими, чтобы назначаемые динамические характеристики эталонных моделей были физически реализуемыми. Обычно задают длительность переходного процесса t_j^* и перерегулирование G_j по каждой координате. Попробуем, чтобы переходные процессы

$q_j^*(t) \rightarrow q_j^0$ заканчивались за время $t_{nj} \approx 3\tau_j^*$; τ_j^* – постоянная времени эталонных систем. Получим следующие расчетные формулы:

$$\gamma_{j0} = \frac{1}{\tau_j^*}, \quad \gamma_{j1} = \frac{\sqrt{2}}{\tau_j^*}, \quad \tau_j^* = \frac{t_j^*}{3}, \quad j=1,2,..n.$$

В нашем случае нами заданы значения

$$t_1^* = 3c; \quad t_2^* = 6c; \quad t_3^* = 1,5c.$$

Тогда

$$\tau_1^* = \frac{3}{3} = 1c; \quad \tau_2^* = \frac{6}{3} = 2c; \quad \tau_3^* = \frac{1,5}{3} = 0,5c; \quad \gamma_{10} = \frac{1}{1} = 1; \quad \gamma_{20} = \frac{1}{2} = 0,5; \quad \gamma_{30} = \frac{1}{0,5} = 2;$$

$$\gamma_{11} = \frac{\sqrt{2}}{1} = \sqrt{2} = 1,41; \quad \gamma_{21} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707; \quad \gamma_{31} = \frac{\sqrt{2}}{0,5} = 2,8; \quad \text{Оп}$$

ределение $\alpha_{\phi i}$

$$\alpha_{\phi 1} = \frac{R_{1\max} A_{\phi 1}}{n_1 k_{m1} \tau_{\phi 1}} = 44,5, \quad \tau_{\phi 1} = \frac{t_{\phi 1}}{3} = \frac{3}{3} = 1c, \quad \phi_{2\max} = 170; \quad \alpha_{\phi 2} = \frac{R_{2\max} A_{\phi 2}}{n_2 k_{m2} \tau_{\phi 2}} = 1,9, \quad \alpha_r = \frac{R_3 A_r}{n_3 k_{m3} h_3 \tau_r} - \frac{n_3 k_{w3}}{h_3} = 2,88;$$

На основе полученных выражений промоделирована динамика синтезированной системы на ПЭВМ. На рис.3. приведены результаты моделирования и эксперимента системы при различных значениях t_j^* и G_j . (цифрами обозначены: 1 - t_1^* ; 2 - t_2^* ; 3 - t_3^*). В данном случае для вычисления управляющих напряжений не используются ускорения управляемых координат.

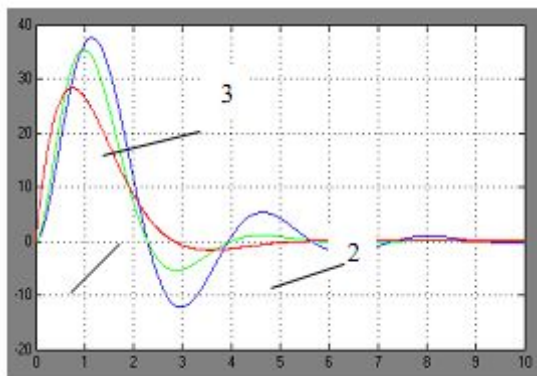


Рис. 3. График изменения угловой скорости при варьировании параметров t_j^* и G_j .

Литература

1. Тимофеев А.В. Построение адаптивных систем управления программным движением. Л. Энергия. 1988. 88 с.
2. Крутько П.Д. Управление исполнительными системами роботов. М.: Наука. 1991, 405 с.
3. Шаршеналиев Ж.Ш., Батырканов Ж.И. Синтез систем управления с заданными показателями качества. Бишкек, Илим, 1991.