

УДК 681.5(045)

ТРАЄКТОРНЕ КЕРУВАННЯ МАНІПУЛЯЦІЙНИМИ РОБОТАМИ В ПРОСТОРІ БАЗОВИХ КООРДИНАТ

В. П. Квасніков, М. М. Вохмянін

Національний авіаційний університет

int2080@ukr.net

Запропоновано алгоритм синтезу траєкторного керування маніпуляційним роботом у просторі зовнішніх координат, що враховує динамічні ефекти, пов'язані зі взаємовпливом ланок.

The algorithm of synthesis of trajectory management by a manipulation robot in the space of external coordinates, which takes into account dynamic effects, connected with mutual influence of links, is presented in the article.

Вступ

Еволюція сучасних робототехнічних систем характеризується підвищеними вимогами до якості процесу керування за умови забезпечення стабільності динамічних властивостей у широкому діапазоні змін параметрів навколишнього середовища, що зумовлюють постійнодіючі зовнішні й внутрішні збурювання.

Нині стабільність показників якості систем керування роботами при параметричних збуреннях забезпечується переважно методами теорії чутливості, теорії адаптивного керування, створенням структур з ковзними режимами й нескінченно більшими коефіцієнтами. Кожному зі згаданих методів тією чи іншою мірою властивий ряд недоліків: невеликі діапазони компенсуючих збурень, небезпека виникнення хаотичних коливань, структурна нестійкість.

Маніпуляційний робот (МР) являє собою електромеханічну систему — багатозв'язний нелінійний динамічний об'єкт керування, що повинен здійснювати рух уздовж траєкторії, заданої відповідно до поставленого завдання. Динаміка МР залежить від типу кінематичної схеми, характеру руху, що задається. Відомі траєкторні алгоритми керування в просторі узагальнених координат [1], які потребують наявності в структурі системи керування блоку вирішення зворотного завдання кінематики (БЗЗК), що небажано, тому що процедура вирішення ЗЗК найчастіше не може бути формалізована, або має складну аналітичну форму, а для кінематично надлишкових схем неоднозначна [2]. Використання чисельних процедур вирішення ЗЗК вносить додаткову методичну похибку у формування сплайнів, що збільшує похибку відпрацювання завдання робочим органом маніпулятора.

Постановка проблеми

Мета роботи — синтез траєкторного алгоритму керування маніпуляційним роботом у просторі базових координат.

Запропонований підхід дає змогу виключити блок вирішення ЗЗК зі структури керування роботом, а також урахувати змінність інерційних характеристик маніпулятора й взаємний вплив рухів за ступенем рухливості.

1. Синтез алгоритму керування. Нехай рівняння динаміки й кінематики МР у просторі узагальнених координат має вигляд [1]:

$$A(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q})\dot{q} + C(q) = Q(q);$$

$$p = \hat{O}(\bar{q}), \quad (1)$$

де $A(q)$ — $[n \times n]$ -матриця інерції рухливих елементів робота; $B(q, \dot{q})\dot{q}$ $[n \times 1]$ -вектор коріолісових і відцентрових сил; $C(q)$ — $[n \times 1]$ -вектор сил ваги; Q — $[n \times 1]$ -вектор узагальнених сил діючих у зчленуваннях робота; q, \dot{q}, \ddot{q} — $[n \times 1]$ -вектори, відповідно узагальнених координат, швидкостей, прискорень; n — кількість ступенів рухливості МР, а рівняння двигуна:

$$\tau \dot{Q}(q) + Q(q) = du - h\dot{q}, \quad (2)$$

де τ — $[n \times n]$ -матриця діагональна постійних часу двигунів; d і h — діагональні $[n \times n]$ -матриці конструктивних параметрів двигунів; u — n -вимірний вектор-стовпець керуючих впливів (уважається, що керуючий вплив подається на підсилювач потужності, що разом із двигуном і редуктором формує єдиний блок) [1]. З огляду на формулу (2), динаміку МР можна описати рівнянням у просторі зовнішніх координат [3]:

$$A(p)\ddot{p} + B(p, \dot{p})\dot{p} + C(p) = \check{Q}; \quad (3)$$

$$A(p) = J^{-T} A(q) J^{-1};$$

$$B(p, \dot{p}) = (J^{-T} B(q, \dot{q}); -J^{-T} A(q) J^{-1} \dot{J}) J^{-1};$$

$$C(p) = J^{-T} C(q);$$

$$\check{Q} = J^{-T} Q(q),$$

де $J = \frac{\partial \hat{O}(\bar{q})}{\partial \bar{q}^T}$ — $[n \times m]$ -матриця Якобіана векто-

ра $p = \hat{O}(\bar{q})$, $m \leq 6$; $J^{-T} = (J^T)^{-1}$; J^T — транспонована матриця Якобіана. З рівнянь (3) видно, що $J^T \check{Q} = Q(q)$.

Нехай моменти Q^* , що відповідають реалізованій програмі руху, мають структуру, аналогічну наведеної в праці [1]:

$$Q^*(p, \dot{p}, q, \dot{q}, \beta, \gamma, \mu) = \\ = C(q) + (B(q, \dot{q}) + b - A(q)J^{-1}\dot{j})\dot{q} - \\ - A(q)J^{-1}[\beta(\dot{p} - \dot{p}^*) + \gamma(p - p^*) + \mu \int (p - p^*) dt],$$

де β, γ, μ — $[n \times n]$ -матриці діагональні параметрів, що налаштовуються; p, \dot{p} — вектори зовнішніх координат і швидкостей МР відповідно; p^*, \dot{p}^* — вектори значень зовнішніх координат, що задаються, і швидкостей.

Потрібно синтезувати таке керування u , що забезпечувало б властивість асимптотичної стійкості моменту Q^* сформованого в просторі зовнішніх координат. Зазначена властивість може бути забезпечено таким диференціальним рівнянням:

$$\tau' \dot{Q}(q) + Q(q) = Q^*, \quad (4)$$

де $\tau' = \alpha^{-1}$ — діагональна $[n \times n]$ -матриця постійних часу, що визначають тривалість перехідних процесів установаження моменту, що задається.

Після закінчення перехідних процесів $Q(q) = Q^*$. Розв'язуючи рівняння (4) відносно \dot{Q} й підставивши отриманий вираз у формулу (2), одержимо загальне рівняння для керування:

$$u = d^{-1} \{ h\dot{q} + Q - \tau\alpha(Q - Q^*) \}, Q = sI, \quad (5)$$

де s — діагональна $[n \times n]$ -матриця коефіцієнтів пропорційності; α — діагональна $[n \times n]$ -матриця параметрів, що налаштовуються, визначальну глибину зворотного зв'язку по струму.

Алгоритм керування (5) аналогічний за своєю структурою до алгоритму керування поданому в праці [1]. Можна використовувати спрощену структуру керування, а саме:

$$u = d^{-1} \{ h\dot{q} + Q^*(p, \dot{p}) \}. \quad (6)$$

Керування (5), отримане з виразу (6) за умови $\tau\alpha = 1$.

Замкнутий керуванням (6) МР, за припущення, що динамікою приводу можна знехтувати, описується диференціальним рівнянням вигляду:

$$\ddot{y} + \beta\dot{y} + \gamma y + \mu y = 0; \quad (7)$$

$$y(0) = y_0, \dot{y}(0) = \dot{y}_0 - p - p^*; \\ \ddot{y}(0) = \dot{p}_0 - \dot{p}_0^* \quad y = \int (p - p^*) dt.$$

Стійкість, необхідна якість перехідних процесів і облік обмежень на керуючий вплив забезпечуються вибором коефіцієнтів, що налаштовуються.

2. Налаштування коефіцієнтів регулятора.

Для вибору коефіцієнтів регулятора скористаємося відомими співвідношеннями [1]:

$$\tau_i \alpha_i > 1, \quad i = \overline{1, n}, \beta_i < \alpha_i, \sqrt{\gamma_i} < \beta_i, \mu_i < \beta_i \gamma_i.$$

Вибрати елементи матриць β, γ, μ слід так, щоб розв'язок рівнянь (7) був сталим, тобто коріння рівняння λ_j $j = \overline{1, 3}$ замкнутої системи — дійсні й негативні. Можна спочатку задати коріння λ_j і вже через λ_j обчислити елементи матриць β, γ, μ . Перепишемо рівняння (7) в операторній формі:

$$p^3 + \beta p^2 + \gamma p + \mu = 0, \quad (8)$$

де $p = \frac{d}{dt}$, тоді при заданих λ_j $j = \overline{1, 3}$ вираз (7) набуде вигляду:

$$(p + \lambda_1)(p + \lambda_2)(p + \lambda_3) = 0.$$

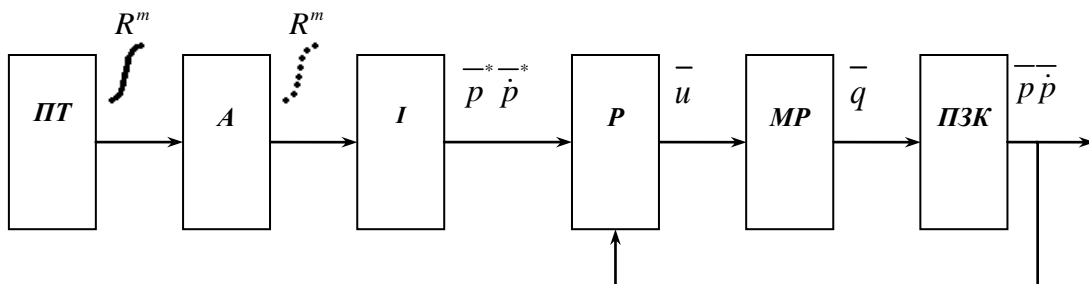
Із виразу (8) отримані залежності коефіцієнтів β_i, γ_i, μ_i від λ_j $j = \overline{1, 3}$ вигляду:

$$\beta_i = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3; \\ \gamma_i = \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_1 \lambda_3 + \lambda_2 \lambda_3; \\ \mu_i = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \quad i = \overline{1, n}.$$

3. Структурна схема замкнутої системи.

Структурну схему замкнутої системи МР показано на рисунку.

Планувальник траєкторій задає траєкторію руху схвачування МР у просторі зовнішніх координат, апроксиматор апроксимує цільову траєкторію точками, інтерполятор формує сплайни — траєкторії руху робота в просторі зовнішніх координат, регулятор реалізує обраний алгоритм керування, маніпулятор відпрацьовує керування. У праці [1] наведено аналогічний виразу (5) за структурою алгоритм траєкторного керування, але він потребує рішення ЗЗК.



Структурна схема замкнутої системи:
ПТ — планувальник траєкторії; А — апроксиматор; І — інтерполятор;
Р — регулятор; МР — маніпуляційний робот

При траєкторному керуванні в просторі узагальнених координат планувальник траєкторій, апроксиматор виконують ті ж функції, що й у структурі керування МР у просторі зовнішніх координат, але з'являється БЗЗК — блок вирішення зворотного завдання кінематики, що реалізує функцію $\bar{q} = \Phi^{-1}(\bar{p})$ й інтерполятор, що формує сплайн — траєкторії руху робота в просторі узагальнених координат. Ці два блоки вносять додаткову похибку у відпрацьовування заданої, відповідно до поставленого технологічного завдання, траєкторії руху. Процедури вирішення ЗЗК і формування сплайнів в узагальнених координатах потребують наявності спеціального обчислювального пристрою, тоді як при використанні керування в просторі зовнішніх координат такого пристрою не потрібно, однак, у цьому випадку для формування керування необхідно більше часу.

Таким чином, обчислювальна складність, у випадку використання траєкторного алгоритму керування в просторі зовнішніх координат, визначається за виразом (5), тоді як у разі використання траєкторного керування в просторі узагальнених координат наявністю трьох блоків: БЗЗК, І, Р (див. рисунок).

Для кінематичної беззбиткової схеми електромеханічної системи ангулярного типу відомо аналітичне вирішення ЗЗК [4]. Для розрахунку керування в просторі узагальнених координат, крім матриць інерції, коріолісових, відцентрових і гравітаційних сил, необхідних для компенсації власної динаміки маніпуляційного робота, потрібно обчислювати необхідні траєкторні швидкості, тобто вираз $\dot{\bar{q}}^* = J^{-1} \dot{\bar{p}}^*$, а також вирішувати зворотне завдання кінематики, — розраховувати значення узагальнених координат $\bar{q}^* = \Phi^{-1}(\bar{p}^*)$, щоб сформувати сплайн у просторі узагальнених координат. Для розрахунку керування в просторі зовнішніх координат, крім матриць інерції, коріолісових, відцентрових і гравітаційних сил, необхідно обчислити вираз $A(q)J^{-1}\dot{J}$.

Таким чином, траєкторне керування в просторі зовнішніх координат дає змогу точніше, за рахунок виключення БЗЗК, задавати цільову траєкторію в просторі зовнішніх координат, а в силу асимптотичної стійкості моменту, що розвивається, якісно відпрацьовувати завдання.

Висновок

Синтезований алгоритм керування маніпуляційним роботом забезпечує бажану швидкість й точність відпрацьовування траєкторії. Виключення блоку рішення ЗЗК зі структури системи керування дозволяє зменшити похибку завдання цільових траєкторій. Крім того, реалізація траєкторного алгоритму в просторі зовнішніх координат вимагає менших обчислювальних потужностей, чим аналогічне за структурою траєкторне керування в просторі узагальнених координат.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бурдаков С. Ф. Связанное управление приводами робота в режиме позиционирования / С. Ф. Бурдаков // Техническая Кибернетика. — № 6. — 1989. — С. 124—129.
2. Тимофеев А. В. Управление роботами / А. В. Тимофеев. — Л.: ЛГУ, 1986. — 240 с.
3. Шахинпур М. Курс робототехники / М. Шахинпур. — М.: Мир, 1990.
4. Takagi T. Fuzzy identification of systems and its Applications to modeling and control // IEEE Trans on System, Man and Cybernetics / T. Takagi, M. Sugeno. — 1985, Vol. 15. — № 1. — P. 116—132.
5. Чернорудский Г. С. Следящие системы автоматических манипуляторов / Г. С. Чернорудский, А. П. Сирин, В. С. Жабреев. — М.: Наука, 1987. — 272 с.
6. Алиев Р. А. Интеллектуальные роботы с нечеткими базами знаний / Р. А. Алиев. — М.: Радио и связь, 1995. — 176 с.
7. Кузин Л. Т. Основы кибернетики / Л. Т. Кузин. — М.: Энергоатомиздат, 1994, т. 1. — 427 с.
8. Афонин В. Л., Макушкин В. А. Интеллектуальные робототехнические системы Интернет-университет информационных технологий. — ИНТУИТ, 2005.

Стаття надійшла до редакції 16.12.09.