



КОРРЕКЦИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА С УЧЕТОМ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Г. А. ЦЫБУЛЬКИН, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены вопросы обеспечения требуемой точности движения робота по траекториям в условиях, когда пространственное положение этих траекторий заранее точно неизвестно. Синтезирован закон корректирующего управления, основанный на использовании дополнительных измерений в процессе движения и гарантирующий его заданную точность. Проведено моделирование динамики системы, реализующей этот закон управления.

Ключевые слова: роботизированная дуговая сварка, сварные соединения, корректирующее управление, манипуляционный робот, траектория движения

Одной из сложных проблем, которая возникает при управлении движением манипуляционных систем по заданным траекториям, является обеспечение необходимой точности движения. Для решения этой проблемы традиционно используют методы [1–4], направленные на уменьшение динамических ошибок локальных систем (ЛС), входящих в состав многоканальной манипуляционной системы управления. Известны также нетрадиционные подходы, предложенные в свое время М. Б. Игнатьевым [5] и получившие дальнейшее развитие в работах [6–9]. В отличие от [1–4] эти методы предусматривают введение в многоканальную систему дополнительных обратных связей, обеспечивающих минимизацию траекторной ошибки за счет коррекции соотношений между динамическими ошибками по отдельным координатам [7–9] или корректирующего управления темпом движения системы в функции от динамических ошибок ЛС [5, 8, 9].

Однако гарантировать повышение точности движения с помощью указанных методов возможно лишь при условии, что сами программно заданные траектории всегда адекватны требуемым (желаемым) траекториям. На практике же довольно часто возникают ситуации, когда желаемые траектории по тем или иным причинам не совпадают с программно заданными траекториями. Такие ситуации встречаются, в частности, при роботизированной дуговой сварке крупногабаритных изделий, когда свариваемые детали из-за их больших размеров и массы не всегда удается точно поместить в заданное для сварки место или они имеют слишком большие допуски на размеры. Ясно, что при этом пространственное положение фактических линий соединений свариваемых де-

талей может существенно отличаться от положения запрограммированных линий.

Программу движения робота можно скорректировать, если располагать информацией об отклонении фактических линий (желаемых траекторий) от предварительно заданных. Для этого обычно робот оснащают специальным устройством, которое в процессе движения в каждый момент времени t измеряет, например, расстояние от конца электрода до желаемой траектории и на основании сигнала $\rho(t)$, характеризующего это расстояние, производят коррекцию программно заданной траектории. В случаях, когда траектории являются прямолинейными и располагаются вдоль одной из координат рабочего пространства робота, их коррекция осуществляется сравнительно просто [10–12]. Но когда траектории криволинейны, остается неясным, как следует «расщеплять» сигнал $\rho(t)$ на составляющие по координатам для того, чтобы реализовать корректирующее управление. При этом не известны и динамические свойства таких систем.

В данной статье построен закон корректирующего управления, обеспечивающий движение роботов по желаемой траектории независимо от ее формы и расположения в рабочем пространстве робота, и выполнено моделирование динамики системы, реализующей этот закон коррекции.

Синтез закона корректирующего управления. Пусть заданная траектория движения рабочего органа робота описывается уравнением

$$F(x_1, x_2) = 0, \quad (1)$$

устанавливающим в неявной форме вполне определенные соотношения между заданными движениями

$$x_1^0(t) = X_1(s(t)), \quad x_2^0(t) = X_2(s(t))$$

в декартовой системе координат Ox_1x_2 . Здесь $X_1(s)$, $X_2(s)$ — известные непрерывные и диффе-

ренцируемые функции параметра s , представляющего собой длину дуги траектории, которая соединяет изображающую точку задания P_0 с некоторой начальной точкой P_n (рис. 1). Предполагается, что при этом обязательно выполняется условие $F(x_1^0(t), x_2^0(t)) = 0$, а связь между входными воздействиями манипуляционного робота $q^0 = \{q_j^0(t)\}$, $j = 1, 2, \dots, n$ и координатами $x_0 = \{x_i^0(t)\}$, $i = 1, 2$ описывается зависимостью $x_0 = A(q^0)$, в которой $A(\cdot)$ — вектор-функция, порождаемая кинематикой конкретного манипуляционного робота.

Предположим, что желаемая траектория $G(x_1, x_2) = 0$ не совпадает с траекторией $F(x_1, x_2) = 0$, как это показано на рис. 1. Обозначим через ρ расстояние от точки P_0 до точки N , лежащей на пересечении траектории $G(x_1, x_2) = 0$ с нормалью к траектории $F(x_1, x_2) = 0$ в точке P_0 . Цель корректирующего управления состоит в том, чтобы обеспечить выполнение требования $|\rho(t)| \leq \rho_0$, где ρ_0 — положительное число, характеризующее заданную точность движения робота.

Из рис. 1 видно, что для уменьшения ρ целесообразно одновременно с движением точки по траектории $F(x_1, x_2) = 0$ дополнительно перемещать ее по координате x_1 на расстояние $\xi_1 = \rho \sin \alpha$, а по координате x_2 — на $\xi_2 = \rho \cos \alpha$, где α — угол между касательной в точке P_0 и осью x_1 . Такое перемещение осуществимо, если к входным сигналам $x_1^0(t)$ и $x_2^0(t)$ постоянно добавлять сигналы, пропорциональные текущим значениям соответственно $\xi_1(t)$ и $\xi_2(t)$. Подобный ход рассуждений наводит на мысль о том, что закон корректирующего управления следует строить в интегральной форме

$$\xi_1(t) = K \sin \alpha(t) \int_0^t \rho(t) dt, \quad \xi_2(t) = -K \cos \alpha(t) \int_0^t \rho(t) dt, \quad (2)$$

где K — коэффициент пропорциональности, выбираемый из условия устойчивости системы.

Нетрудно убедиться, что текущие значения $\sin \alpha(t)$ и $\cos \alpha(t)$ можно получать непосредственно в процессе движения системы по заданной траектории $F(x_1, x_2) = 0$. В самом деле, угловой коэффициент касательной в точке P_0 определяется как $\operatorname{tg} \alpha(t) = \frac{dx_2^0}{dt} / \frac{dx_1^0}{dt}$. Отсюда

$$\sin \alpha(t) = \frac{1}{v} \frac{dx_2^0}{dt}, \quad \cos \alpha(t) = \frac{1}{v} \frac{dx_1^0}{dt}, \quad (3)$$

где $v = \sqrt{\left(\frac{dx_1^0}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dx_2^0}{dt}\right)^2}$ — скорость движения точки P_0 по траектории $F(x_1, x_2) = 0$.

Таким образом, закон корректирующего управления (2) с учетом (3) принимает окончательный вид

$$\xi_1(t) = \frac{K}{v} \frac{dx_2^0}{dt} \int_0^t \rho(t) dt, \quad \xi_2(t) = \frac{K}{v} \frac{dx_1^0}{dt} \int_0^t \rho(t) dt. \quad (4)$$

Моделирование системы управления. С целью экспериментальной проверки эффективности синтезированного закона (4) корректирующего управления движением манипуляционного робота проводилось моделирование на ЭВМ динамики двухканальной системы управления для случая, когда $q_1^0(t) = x_1^0(t)$, $q_2^0(t) = x_2^0(t)$. Как видно из рис. 2, в эту систему дополнительно введено корректирующее устройство (КУ). В блоках B_1

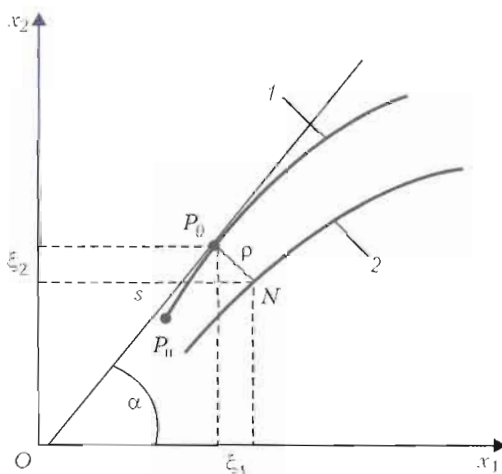


Рис. 1. К расчету корректирующих сигналов $\xi_1(t)$ и $\xi_2(t)$: 1 — $F(x_1, x_2) = 0$; 2 — $G(x_1, x_2) = 0$; остальные обозначения см. в тексте

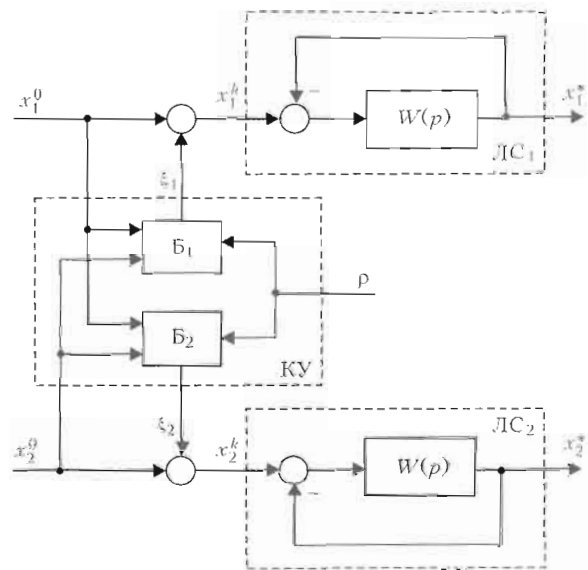


Рис. 2. Структурная схема системы управления с корректирующим устройством

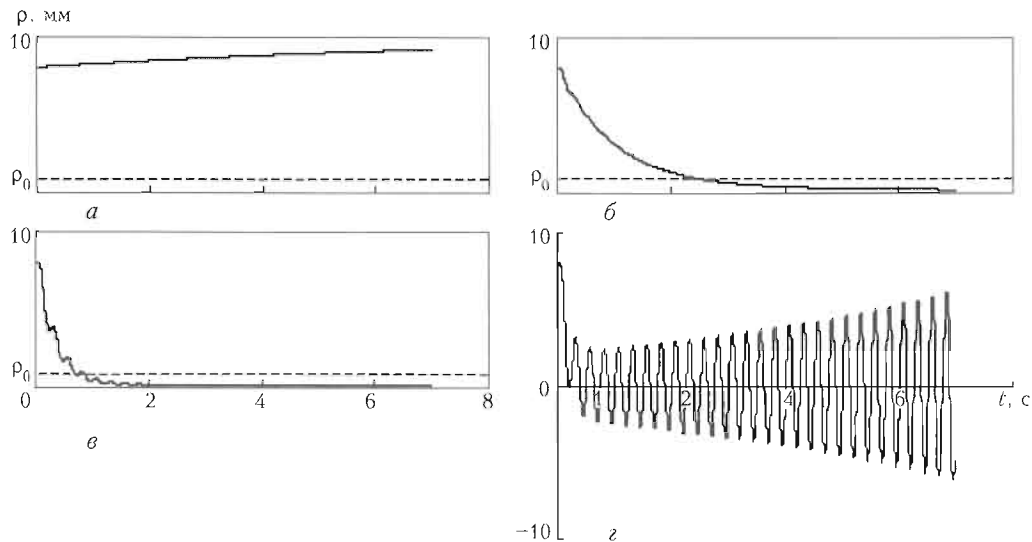


Рис. 3. Графики функции $\rho(t)$, построенные по результатам моделирования: $a - K = 0$; $b - 1$; $v - 3,0$; $z - 6,6 \text{ c}^{-1}$

и B_2 на основе информации об отклонении $\rho(t)$ и о производных от входных сигналов $x_1^0(t)$ и $x_2^0(t)$ формируются по (4) корректирующие сигналы $\xi_1(t)$ и $\xi_2(t)$. На входы локальных систем ЛС₁ и ЛС₂, входящих в состав двухканальной системы управления, поступают сигналы $x_1^k(t) = x_1^0(t) + \xi_1(t)$ и $x_2^k(t) = x_2^0(t) + \xi_2(t)$, по сути представляющие собой скорректированную программу движения робота.

Для удобства моделирования принято, что ЛС₁ и ЛС₂ идентичны, характеризуются астатизмом первого порядка и в разомкнутом состоянии описываются передаточной функцией

$$W(p) = \frac{K_0}{p(Tp + 1)}, \quad (5)$$

где K_0 — коэффициент передачи; T — постоянная времени; p — оператор Лапласа.

Взяты следующие значения параметров передаточной функции (5): $K_0 = 75 \text{ c}^{-1}$, $T = 0,11 \text{ c}$. В качестве программно заданной и желаемой траекторий рассматривались дуги окружности, которые описываются уравнениями

$$x_1^0(t) = R(1 - \cos \omega t), \quad x_2^0(t) = R \sin \omega t, \quad (6)$$

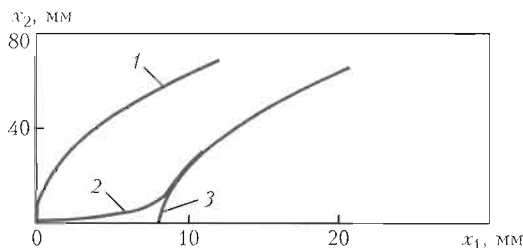


Рис. 4. Траектории движения: 1 — $F(x_1, x_2) = 0$; 2 — $\Phi(x_1^*, x_2^*) = 0$; 3 — $G(x_1, x_2) = 0$; остальные обозначения см. в тексте

$$x_1^0(t) = R + a - R \cos \omega t, \quad x_2^0(t) = b + R \sin \omega t, \quad (7)$$

где R — радиус дуги; $\omega = v/R$ — параметр, выбираемый из условия обеспечения требуемой скорости v движения робота; a, b — начальные отклонения желаемой траектории (7) от программно заданной (6) соответственно по координатам x_1 и x_2 .

Траектории (6) и (7) выбраны таким образом, чтобы расстояние $\rho(t)$ в любой момент времени t в условиях модельного эксперимента можно было бы легко оценить путем расчета. Очевидно, что $\rho(t)$ можно определить по формуле

$$\rho(t) = \sqrt{(x_1^*(t) - R - a)^2 + (x_2^*(t) - b)^2} - R,$$

где $x_1^*(t)$ и $x_2^*(t)$ — координаты фактического положения рабочего органа робота.

На рис. 3, 4 представлены результаты моделирования двухканальной системы управления при следующих значениях параметров: $s = 70 \text{ мм}$; $R = 200 \text{ мм}$; $\omega = 0,05 \text{ c}^{-1}$; $a = 8 \text{ мм}$; $b = -5 \text{ мм}$; $\rho_0 = 1 \text{ мм}$. На рис. 3 показаны процессы изменения $\rho(t)$ в зависимости от значения коэффициента K в законе корректирующего управления (4). Анализ этих кривых показал, что расстояние $\rho(t)$ при отсутствии коррекции ($K = 0$) достаточно велико по сравнению с ρ_0 (рис. 3, a), но стремительно уменьшается (рис. 3, b, v), если введено корректирующее управление ($K > 0$).

При сравнении кривых на рис. 3, b, v видно, что время коррекции, т. е. интервал времени, за который расстояние $\rho(t)$ становится меньше ρ_0 , существенно зависит от значения коэффициента K (с его увеличением время коррекции уменьшается). Однако следует заметить, что при увеличении K начинают появляться колебания $\rho(t)$

и при $K \geq K_{\text{доп}}$ процесс автоматической коррекции приобретает неустойчивый характер (рис. 3, з) (в нашем эксперименте допустимое значение $K_{\text{доп}} = 6,3 \text{ с}^{-1}$). Отсюда ясно, что значение коэффициента K следует выбирать в каждом отдельном случае исходя из компромиссных соображений.

На рис. 4 представлена траектория $\Phi(x_1^*, x_2^*) = 0$, по которой осуществляется движение робота в результате коррекции программно заданной траектории $F(x_1, x_2) = 0$ при $K = 3 \text{ с}^{-1}$. Из рисунка видно, что траектория $\Phi(x_1^*, x_2^*) = 0$ начинается на траектории $F(x_1, x_2) = 0$ и спустя некоторое время коррекции практически совпадает с желаемой траекторией $G(x_1, x_2) = 0$, расположенной на достаточно большом расстоянии от $F(x_1, x_2) = 0$, что свидетельствует о высокой точности корректирующего управления, синтезированного по (4).

Между тем, уместно заметить, что при движении робота по криволинейным траекториям возникает траекторная ошибка $\varepsilon(t)$ даже при таком благоприятном случае, когда программно заданная и желаемая траектории совпадают. Как известно [9], ошибка $\varepsilon(t)$ возрастает с увеличением скорости движения v по траектории и ее кривизны. Но поскольку $\varepsilon(t)$ является лишь частью общего отклонения от траектории, определяемого расстоянием $\rho(t)$, то синтезированный закон автоматической коррекции (4) обеспечивает требуемую точность движения по траектории, независимо от того, чем это отклонение вызвано.

Таким образом, моделирование на ЭВМ показало достаточно высокую эффективность пред-

ложенного закона коррекции программно заданной траектории движения при произвольном ее расположении в рабочем пространстве робота.

1. Тимофеев А. В. Построение адаптивных систем управления программным движением. — Л.: Энергия, 1980. — 88 с.
2. Вукобратович М., Стокич Д., Кирчански Н. Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами / Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 376 с.
3. Бобцов А. А. Алгоритм робастного управления в задаче слежения за эталонным сигналом // Автоматика и телемеханика. — 2003. — № 6. — С. 104–113.
4. Крутько П. Д., Голованов М. А. Траекторное управление движением автоматических манипуляторов при выполнении технологических операций // Пробл. машиностроения и надежности машин. — 2005. — № 3. — С. 88–95.
5. Игнатъев М. Б. Голономные автоматические системы. — Л.: Изд-во АН СССР, 1963. — 203 с.
6. Цыбульский Г. А. Координирующее управление движением по двумерному многообразию с перекрестными связями между воспроизводящими системами // Автоматика. — 1988. — № 2. — С. 83–86.
7. Мирошник И. В. Согласованное управление многоканальными системами. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 128 с.
8. Цыбульский Г. А. Об одном нетрадиционном подходе к проблеме повышения точности движения по заданным траекториям // Управляющие системы и машины. — 2002. — № 2. — С. 20–25.
9. Цыбульский Г. А. Стабилизация бокового отклонения программно управляемого объекта при движении по траекториям с переменной кривизной // Там же. — 2003. — № 3. — С. 12–17.
10. Gao X., Huang S., Yu Y. An artificial neural network for detecting weld position in arc welding process // China Welding. — 1999. — 8, № 1. — P. 74–80.
11. Sugitani Y. Making best use of the arc sensor // J. the Jap. Welding Soc. — 2000. — 69, № 2. — P. 46–50.
12. Цыбульский Г. А. Ситуационные алгоритмы автоматической коррекции траектории движения робота в процессе дуговой сварки // Автомат. сварка. — 2000. — № 11. — С. 11–14.

Issues associated with ensuring the required accuracy of movement of a robot along the paths, the spatial position of which is not known exactly beforehand, are considered. The law of the correction control has been formulated, which is based on utilisation of additional measurements during the movement, and which guarantees the preset movement accuracy. Modelling of dynamics of the system realising this law has been performed.

Поступила в редакцию 15.10.2007