

УПРАВЛЕНИЕ СИЛОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА

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

Предложен нетрадиционный подход к решению задачи управления силовым воздействием манипуляционного робота на контактирующую поверхность в условиях произвольного ее расположения в рабочем пространстве робота. Приведен алгоритм, обеспечивающий стабилизацию силового воздействия на желаемом уровне.

Ключевые слова: манипуляционные роботы, обрабатываемое изделие, контактирующая поверхность, стабилизация силового воздействия, корректирующие алгоритмы

Во многих технологических операциях, выполняемых с помощью манипуляционных роботов, необходимо осуществлять физический контакт рабочего органа с обрабатываемым изделием. Иногда, например, при зачистке прихваток перед последующей сваркой деталей или при шлифовании и последующем травлении сварных швов с целью выявления горячих микротрещин очень важно, чтобы в процессе выполнения таких операций рабочий орган робота был прижат к контактирующей поверхности с определенной силой. Для обеспечения указанного режима возникает необходимость в автоматическом управлении силовым воздействием.

Известно, по крайней мере, два принципиально различных подхода к решению данной задачи. Первый базируется на так называемом принципе разделения движений [1, 2], заключающимся в том, что одну часть приводов робота-манипулятора предполагается использовать для реализации движения вдоль заданной траектории, а другую — для организации заданного силового воздействия. Этот подход предусматривает увеличение количества степеней свободы манипулятора за счет введения дополнительных звеньев, что, естественно, приводит к существенному усложнению робота.

В основе второго подхода лежит идея разделения движений на программном уровне [3–5], причем так, чтобы перемещение робота по заданной траектории и необходимое усилие на контактируемую поверхность изделия обеспечивались бы одними и теми же приводами. Такой подход является более привлекательным, но здесь возникают проблемы иного рода, связанные с тем, что информации о силовом воздействии F , поступающей от датчика (Force sensor), расположенного в рабочем органе робота, иногда недостаточно для реализации управления данным силовым воздействием.

Это связано с тем, что направление силы в общем случае может не совпадать с направлением одной из осей системы координат робота, в которой программируется траектория его движения. Поэтому становится неясным, как «расщеплять» получаемый сигнал о фактическом силовом воздействии F на составляющие по координатам и как потом его корректировать.

В данной статье для решения этой задачи используется прием, примененный нами ранее в работе [6] для автоматической коррекции траектории движения манипуляционного робота. Его основная идея заключается в том, чтобы траекторию движения и необходимое усилие задавать при программировании не в системе координат робота (как это обычно делается), а в системе координат, связанной с самой траекторией, используя так называемый репер Френе [7]. В этом случае появляется возможность одну из координатных осей репера всегда ориентировать вдоль предполагаемого силового воздействия, а траекторию движения или ее фрагменты строить в плоскости, нормальной к выбранной оси. Для поддержания заданного усилия на определенном уровне теперь достаточно использовать одноканальную систему стабилизации, независимо от пространственного расположения контактируемой поверхности в рабочем пространстве робота.

Рассмотрим эту возможность более подробно. Репер Френе связан с траекторией движения робота таким образом, что в каждой узловой точке P_i ($i = 1, 2, \dots$) этой траектории ось u_1 данного репера направлена по касательной (рис. 1), ось u_2 — по главной нормали, ось u_3 — по бинормали. Вектор координат $\mathbf{u}_i^R = [u_{i1}^R, u_{i2}^R, u_{i3}^R]^*$, характеризующий положение некоторой точки R в системе отсчета i -го репера $P_i u_{i1} u_{i2} u_{i3}$, и вектор координат $\mathbf{x}^R = [x_1^R, x_2^R, x_3^R]^*$, характеризующий положение этой же точки R в базовой системе отсчета робота $Ox_1 x_2 x_3$, связаны соотношением



$$\mathbf{u}_i^R = \mathbf{T}_i \mathbf{x}^R,$$

в котором матрица однородного преобразования \mathbf{T}_i имеет вид

$$\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_i & \mathbf{b}_i \\ 000 & \mathbf{1} \end{bmatrix},$$

где \mathbf{L}_i — ортогональная матрица, задающая ориентацию репера Френе; \mathbf{b}_i — вектор-столбец, определяющий положение начала координат этого репера относительно системы отсчета $Ox_1x_2x_3$. Знак (*) в верхнем правом углу обозначает операцию транспонирования.

Что касается связи между координатами точки R , определенными в базовой системе отсчета, и управляемыми (или так называемыми обобщенными) координатами робота q_j , $j = 1, 2, \dots, n$, то она задается соотношением $\mathbf{x}^R = \mathbf{A}(\mathbf{q}^R)$, где $\mathbf{q}^R = [q_1^R, q_2^R, \dots, q_n^R]^*$; n — количество степеней свободы манипулятора; $\mathbf{A}(\cdot)$ — вектор-функция, порождаемая его кинематикой.

Теперь очевидно, что если рабочий орган робота сориентировать так, чтобы его осевая линия и силовое воздействие $F(t)$ были направлены параллельно оси u_3 (рис. 1), то появляется реальная возможность осуществлять управление этим силовым воздействием путем изменения одной лишь координаты u_3 . Связь между силовым воздействием $F(t)$ и положением рабочего органа относительно контактирующей поверхности можно выразить в виде соотношения

$$F(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } u_3^R(t) \geq u_{30}^R, \\ -Ku_3^R(t) + F_* & \text{при } u_3^R(t) < u_{30}^R, \end{cases} \quad (1)$$

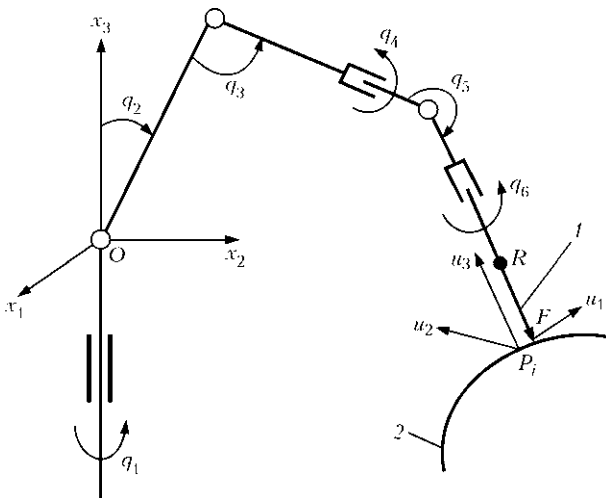


Рис. 1. Схематическое изображение манипуляционного робота антропоморфного типа с шестью степенями свободы, взаимодействующего с внешней средой: 1 — рабочий орган робота; 2 — контактирующая поверхность (обозначения см. в тексте)

где $u_3^R(t)$, u_{30}^R — координаты точки R (расположенной, например, на рабочем органе), характеризующие соответственно ее текущее и заданное положения относительно плоскости u_1u_2 ; K, F_* — положительные константы; t — текущее время (предполагается, что рабочий орган обладает необходимой степенью податливости, характеризующейся величиной K^{-1}).

Следует заметить, что в процессе движения робота по контактирующей поверхности будут возникать еще и силы трения, но поскольку они направлены по касательной к траектории движения, т. е. перпендикулярно к координате u_3 , в этой задаче они рассматриваться не будут. Отклонение $\Delta u_3^R(t) = u_3^R(t) - u_{30}^R$ может быть определено в любой момент времени t путем измерения с помощью какого-либо датчика соответствующих расстояний $d(t)$ и d_0 между точкой R и контактируемой поверхностью, т. е. $\Delta u_3^R(t) = d(t) - d_0$. Следовательно, для синтеза закона управления силовым воздействием $F(t)$ согласно (1) можно воспользоваться очевидным равенством

$$d(t) - d_0 = -K(F(t) - F_0), \quad (2)$$

где F_0 — заданное значение $F(t)$.

Задачу управления силовым воздействием $F(t)$ сформулируем теперь в виде простого требования

$$|d(t) - d_0| \leq \varepsilon, \quad (3)$$

гарантирующего стабилизацию силового воздействия на желаемом уровне: $|F(t) - F_0| \leq \varepsilon K^{-1}$, где ε — положительная величина.

Геометрически соотношение (3) задает в трехмерном пространстве слой толщиной 2ε , расположенный между двумя плоскостями уровня $u_{30} + \varepsilon$ и $u_{30} - \varepsilon$ в системе координат Френе. Поэтому сформулированная выше задача может быть интерпретирована как задача стабилизации движения характеристической точки R внутри указанного слоя.

Итак, для стабилизации усилия на контактирующую поверхность в процессе движения робота по заданной траектории достаточно располагать информацией о текущем расстоянии $d(t)$ от точки R до контактирующей поверхности, а также алгоритмом корректирующего управления движением робота по координате u_3 .

Оснащение манипуляционного робота датчиком расстояния обычно не вызывает принципиальных затруднений. Что же касается построения алгоритма коррекции силового воздействия, то оно во многом определяется возможностями программного обеспечения конкретного манипуляционного робота. В частности, для роботов семейства PUMA, программное обеспечение кото-

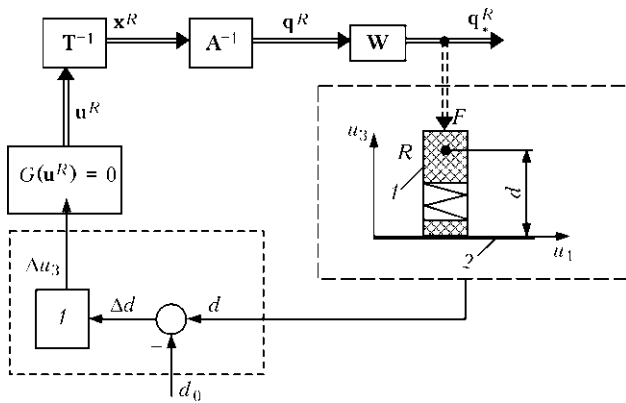


Рис. 2. Структура системы управления роботом с контуром стабилизации силового воздействия: 1 — рабочий орган робота; 2 — контактирующая поверхность; q_*^R — вектор координат фактического положения рабочего органа; W — матрица передаточных функций локальных воспроизводящих систем манипулятора; $G(u^R) = 0$ — программно заданная траектория движения рабочего органа

рых не поддерживает некоторых операций над координатами, закон стабилизирующего управления предпочтительнее строить в виде рекуррентного соотношения

$$u_3(k) = u_3(k-1) + \Delta u_3(k), \quad (4)$$

где

$$\Delta u_3(k) = \begin{cases} h & \text{при } d(k-1) < d_0 - \varepsilon, \\ -h & \text{при } d(k-1) > d_0 + \varepsilon, \\ 0 & \text{при } d_0 - \varepsilon < d(k-1) < d_0 + \varepsilon. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь h — длина шага коррекции ($h \leq \varepsilon$), $k = 1, 2, \dots$ — индекс, характеризующий дискретное время.

Проверка алгоритма (4), (5) на лабораторном робототехническом комплексе подтвердила его достаточно высокую эффективность. Стабилизация силового воздействия $F(t)$ происходит довольно просто: по результатам измерения расстояния d на каждом предыдущем такте ($k-1$) согласно выражению (4) корректируется текущее положение рабочего органа $u_3(k)$ относительно контактирующей поверхности. При этом с учетом выражения (2) соответственно корректируется и силовое воздействие $F(t)$.

Следует заметить, что при необходимости алгоритм (5) можно несколько улучшить, вводя

вместо постоянной длины шага коррекции h шаг с адаптивно изменяющейся длиной. Но в этом случае из-за существенного увеличения количества вычислительных операций могут возникнуть некоторые ограничения на скорость перемещения рабочего органа вдоль заданных траекторий.

Таким образом, используя репер Френе на этапе программирования движений робота, можно довольно просто решить задачу стабилизации силового воздействия рабочего органа на контактирующую поверхность в процессе его перемещения по заданным траекториям. Структура системы управления роботом с контуром стабилизации показана на рис. 2.

Отличительной особенностью предлагаемой схемы стабилизации является то, что она позволяет при необходимости одновременно и независимо проводить еще и коррекцию самой траектории движения рабочего органа робота в плоскости $u_1 u_2$ системы координат Френе. Такая необходимость может возникнуть, например, в том случае, когда из-за значительных сил трения между рабочим органом и контактирующей поверхностью, о которых говорилось выше, фактическая траектория движения рабочего органа недопустимо отклоняется от программно заданной траектории.

1. Цыбулькин Г. А. Двухуровневое координирующее управление манипуляционным роботом с кинематической избыточностью // Пробл. управления и информатики. — 1995. — № 3. — С. 143–150.
2. Куафе Ф. Взаимодействие робота с внешней средой / Пер. с фр. — М.: Мир, 1985. — 360 с.
3. Whitney D. E. Historical perspective and state of the art in robot force control // Proc. of intern. conf. on robotics and automation, 1985. — P. 262–268.
4. Clamroch H., Wang D. Linear feedback control of position and contact force for a nonlinear constrained mechanism // J. Dyn. Syst. Meas. and Contr. — 1990. — 112, № 4. — P. 640–645.
5. Zheng Y. F., Fan Y. Robot force sensor interacting with environments // IEEE Trans. Rob. and Autom. — 1991. — 7, № 1. — P. 156–164.
6. Цыбулькин Г. А. Ситуационные алгоритмы автоматической коррекции траектории движения робота в процессе дуговой сварки // Автомат. сварка. — 2000. — № 11. — С. 11–14.
7. Дубровин Б. А., Новиков С. П., Фоменко А. Т. Современная геометрия: Методы и предложения. — М.: Наука, 1986. — 760 с.

The non-traditional approach is proposed to solve the problem of controlling the force effect exerted by a manipulation robot on the contact surface under conditions of its arbitrary location in the robot work space. The algorithm providing a desirable level of stabilisation of the force effect is given.

Поступила в редакцию 09.02.2009