

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 обеспечивалось 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



$$u_i^R = T_i x^R,$$

в котором матрица однородного преобразования T_i имеет вид

$$T_i = \begin{bmatrix} L_i & b_i \\ 000 & 1 \end{bmatrix},$$

где L_i — ортогональная матрица, задающая ориентацию репера Френе; 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 $x^R = A(q^R)$, где $q^R = [q_1^R, q_2^R, \dots, q_n^R]^*$; n — количество степеней свободы манипулятора; $A(\cdot)$ — 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

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

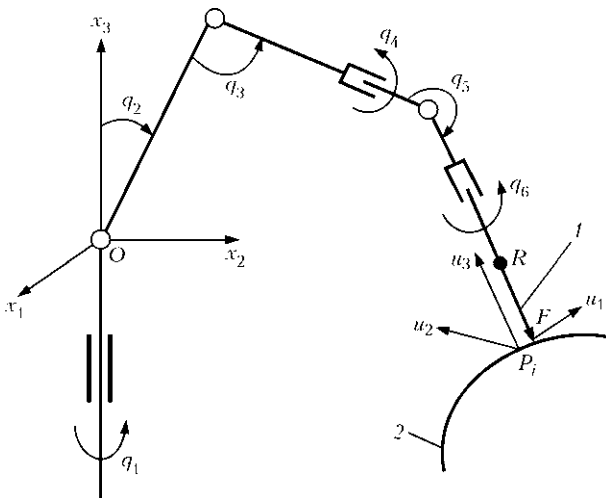


Рис. 1. Схематическое изображение манипуляционного робота антропоморфного типа с шестью степенями свободы, взаимодействующего с внешней средой: 1 — рабочий орган робота; 2 — контактирующая поверхность (обозначения см. в тексте)

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-

