

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИЛОМОМЕНТНЫХ ДАТЧИКОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРАМИ

При движении манипулятора в таких операциях, как захват предмета, штабелирование деталей, механообработочных, контрольно-измерительных и других можно выделить среди них транспортные и рабочие перемещения. Отличие их состоит в том, что транспортные перемещения в большинстве случаев характеризуются относительно большой амплитудой движения, а рабочие перемещения наоборот – небольшой. В таких рабочих движениях с небольшой амплитудой необходимо обеспечить управление положением и скоростью манипуляционной системы, находящейся в непосредственной близости от объекта или в непосредственном контакте с ним. Будем рассматривать именно такие перемещения манипулятора. Одним из наиболее информативным для управления рабочими перемещениями является сигнал, получаемый с силомоментного датчика.

Будем строить управление рабочими перемещениями с использованием информации, получаемой с датчика такого типа. Вначале рассмотрим управление перемещением манипулятора при выходе на контакт с предметом. Следует отметить, что такая операция присутствует в качестве исходной практически во всех рабочих перемещениях и ее можно считать одной из основных, базовых операций.

Будем рассматривать одномерное перемещение портального манипулятора. Как показано в работе [1] динамику движения такого манипулятора можно описать выражением

$$M\ddot{X} + d_2\dot{X} = d_1U + F_a, \quad (1)$$

где F_a – сумма всех внешних сил, действующих на штангу манипулятора, \ddot{X} и \dot{X} – первая и вторая производная от перемещения манипулятора, M – приведенная масса всех подвижных частей манипулятора, U – напряжение, подаваемое на электродвигатель. d_1 и d_2 – постоянные положительные коэффициенты, вычисляемые как

$$d_1 = \frac{M_1}{U_n \rho}, \quad d_2 = \frac{M_1 - M_2}{\phi \rho^2}, \quad (2)$$

где M_1 и M_2 – величины пускового и номинального моментов, ϕ – номинальная угловая скорость, U_n – номинальное напряжение, которые

приводятся в паспорте электродвигателя. Значение ρ равно отношению момента силы M_a к силе F_a , действующей на манипулятор.

Рассмотрим перемещение манипулятора по направлению к неподвижному предмету. В некоторый момент силомоментный датчик коснется предмета. При наличии контакта датчика с предметом датчик начинает деформироваться (изгибаться) и действует на предмет с некоторой силой, горизонтальная составляющая которой равна F . Будем считать, что сила трения предмета об основание, на котором расположен предмет, больше, чем сила F , в противном случае произойдет смещение предмета. На манипулятор действует такая же сила F , но с противоположным знаком. Так как жесткость силомоментного датчика обычно велика, а его деформация мала, то можно считать, что сила F пропорциональна разности $X - X_S$, где X – координата датчика, X_S – координата датчика в момент касания предмета. В [2] показана модель силомоментного датчика, где сила F зависит не только от величины деформации датчика, но и от скорости перемещения манипулятора \dot{X} , т. е. учитывается также сила вязкого трения. Таким образом, запишем соотношение

$$F = \begin{cases} k_2\dot{X}, & \text{при } X < X_S \\ k_1(X - X_S) + k_2\dot{X}, & \text{при } X \geq X_S \end{cases} \quad (3)$$

где k_1 и k_2 – постоянные положительные коэффициенты, характеризующие жесткость датчика (коэффициент жесткости) и вязкое трение (коэффициент вязкого трения) соответственно.

Пусть внешняя сила $F_a = F + F_e$, где F_e – дополнительная сила, действующая на манипулятор, которая может быть вызвана, например, сухим трением в двигателе или в редукторе. В этом случае уравнение (1) при перемещении манипулятора относительно неподвижного предмета с координатой X_S , учитывая (3), перепишем в следующем виде

$$M\ddot{X} + (d_2 + k_2)\dot{X} = d_1U + F_e \quad \text{при } X < X_S \quad (4)$$

$$M\ddot{X} + (d_2 + k_2)\dot{X} + k_1(X - X_S) = d_1U + F_e \quad \text{при } X \geq X_S \quad (5)$$

Для избежания выхода из строя электродвигателя управляющее напряжение U , которое подается на электродвигатель, должно быть ограничено некоторой константой U_0 .

$$|U| \leq U_0 \quad (6)$$

В работе [1] при описании силы F , действующей на предмет, не учитывается коэффициент k_2 , описывающий силу вязкого трения. Если в соотношении (3) не учитывать этот коэффициент, то в уравнениях (4)

и (5) слагаемое, в котором используется коэффициент k_2 , можно отбросить. При этом структура уравнения не изменится.

Уравнения (4 – 6) можно рассматривать, как простейшую математическую модель перемещения манипулятора и взаимодействия его с неподвижным предметом. В этой модели считается заданным положение предмета, с которым может контактировать манипулятор. В случае, когда взаимодействие манипулятора с внешней средой задано внешними силами, действующими на силомоментный датчик и на манипулятор, то простейшая математическая модель задается уравнениями (2) и (6). Следует отметить, что эта модель не учитывает ряд обстоятельств, таких как упругость звеньев манипулятора, люфты и другие нелинейности в редукторе. Несмотря на это, с помощью данной модели можно объяснить многие свойства перемещения манипулятора и проанализировать различные способы управления им. В случае если силомоментный датчик расположен в запястье, то уравнения (2) и (4) являются верными при условии, что массой захватывающего устройства можно пренебречь. Уравнение (5) справедливо без этого условия.

Рассмотрим задачу поддержания контакта между манипулятором и внешним объектом. Пусть положение предмета неизвестно и пусть в начальный момент времени контакт между манипулятором и предметом отсутствует, т. е. $X < X_S$. Рассмотрим различные способы влияния на поведения манипулятора и на его перемещение при выходе на контакт с предметом.

Поставим задачу выхода на контакт и поддержания контакта с неподвижным предметом следующим образом. Необходимо найти зависимость управляющего воздействия U от силы F , скорости \dot{X} и положения X , либо от некоторых из этих величин, при котором система имеет стационарное состояние, которое можно описать следующими равенствами

$$F = F_d > 0; \dot{X} = 0, \quad (7)$$

где F_d – постоянная положительная величина, заданное (программное) значение силы прижатия манипулятора к неподвижному предмету. Оно должно достигаться по окончании переходного процесса, который должен затухать достаточно быстро. Следует указать, что величина F_d должна быть больше порога чувствительности силомоментного датчика F_0 , т. е. $F_0 \leq F_d \leq F_e$. Однако величине F_d отвечает координата $X_g \geq X_S$, определяемая из соотношения

$$F_d = k_1(X_g - X_S). \quad (8)$$

В выражении (8) слагаемое, отвечающее за силу вязкого трения, отсутствует, так как по окончании переходного процесса скорость манипулятора $\dot{X} = 0$.

Для поддержания заданной силы взаимодействия манипулятора с внешним объектом в систему необходимо ввести обратную связь по рассогласованию между значением заданной (программной) силы F_d и значением текущей силы F , измеряемой силомоментным датчиком. Наиболее простым является закон управления, который использует в цепи обратной связи только информацию о силах. Примером такого закона управления может быть линейный закон вида

$$U = g_F(F_d - F), \quad (9)$$

где g_F – положительный коэффициент усиления в цепи обратной связи.

В соответствии с выражением (9) рассогласование между F_d и F приводит к движению неподвижного и неконтактирующего с предметом в начальный момент времени манипулятора с ускорением, которое пропорционально этому рассогласованию и обратно пропорционально инерции исполнительных механизмов манипулятора и привода. С учетом соотношений (4), (5) и (9) можно заметить, что увеличение коэффициента усиления в цепи обратной связи при перемещении манипулятора в контакте с предметом по существу эквивалентно увеличению жесткости силомоментного датчика. Однако следует отметить, что демпфирование в системе (выражение (5)) не возрастает, что приводит к увеличению колебательности системы. Это проявляется, в частности, в том, что после первоначального контакта с предметом манипулятор может снова потерять контакт с ним (отскочить от него). Для увеличения демпфирования в систему вводят обратную связь по скорости. В этом случае закон управления манипулятором примет вид

$$U = g_F(F_d - F) + g_V(\dot{X}_d - \dot{X}), \quad (10)$$

где g_V – положительный постоянный коэффициент обратной связи по скорости, \dot{X} – текущее значение скорости манипулятора, которое измеряется с помощью датчика скорости (тахогенератора), \dot{X}_d – заданное значение скорости манипулятора.

В связи с тем, что мы рассматриваем ситуацию, в которой манипулятор должен выйти на контакт с предметом и поддерживать его, то заданное значение скорости $\dot{X}_d = 0$, поэтому можно переписать выражение (10) в виде

$$U = g_F(F_d - F) - g_V \dot{X}. \quad (11)$$

В случаях, когда необходимо, чтобы манипулятор перемещался вдоль заданной траектории, в цепь управления манипулятором вводят не только контуры управления по силе и по скорости, но и контур управления по положению. В этом случае закон управления манипулятором будет иметь следующий вид:

$$U = g_F(F_d - F) - g_V \dot{X} + g_X(X_d - X), \quad (12)$$

где g_F , g_V и g_X – положительные постоянные коэффициенты в контурах обратной связи по силе, скорости и положению соответственно, X – текущее значение положения манипулятора, которое вычисляется по показаниям датчика положения, X_d – заданное (желаемое) значение положения манипулятора, также как и в предыдущем случае $\dot{X}_d = 0$.

Проведем исследование линейного закона управления, который обеспечивает поддержание контакта манипулятора с неподвижным предметом при использовании в системе управления манипулятором контуров управления по силе и по скорости.

Вначале рассмотрим перемещение манипулятора при заданных внешних силах и при законе управления, который описан в (11). Структурная схема системы управления манипулятором, реализующая такой закон управления, показана на рис. 1.

Пусть на силомоментный датчик при любых перемещениях манипулятора действует постоянная сила, но при этом будем считать, что деформация датчика не изменяется. При управлении (11) и при условии $F_d = F_e = 0$ уравнение (5) можно переписать следующим образом

$$M\ddot{X} + (d_2 + k_2 + d_1g_1)\dot{X} + (1 + d_1g_F)F = 0. \quad (13)$$

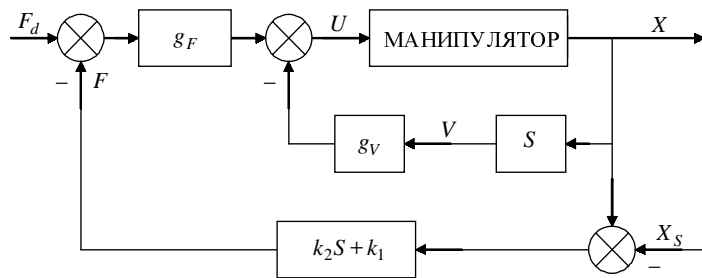


Рис. 1. Структурная схема системы управления манипулятором с контурами управления по силе и скорости

Уравнение (13), описывающее перемещение манипулятора после выхода его на контакт с предметом, имеет асимптотически устойчивый стационарный режим. По окончании переходного процесса устанавливается постоянная скорость \dot{X} перемещения манипулятора

$$\dot{X} = -\frac{1 + d_1g_F}{d_2 + k_2 + d_1g_1} F. \quad (14)$$

Двигатель выходит на этот режим с постоянной времени

$$T = \frac{M}{d_2 + k_2 + d_1g_1}, \quad (15)$$

которая является малой величиной при больших коэффициентах обратной связи g_V .

Предположим, что сила $F = F(t)$, действующая на силомоментный датчик, достаточно медленно меняющаяся функция времени. Если предположить, что характерное время изменения этой силы много больше, чем постоянная времени T , то соотношение (14) остается справедливо приближенно. Соотношение (14) описывает перемещение манипулятора в ответ на действие такой внешней силы. При действии внешней силы $F = F(t)$ манипулятор будет двигаться со скоростью, пропорциональной приложенной силе, тем большей, чем больше коэффициент g_F и чем меньше коэффициент g_V . Такое поведение манипулятора аналогично поведению материальной частицы в вязкой среде и его называют «активной аккомодацией» или «обобщенным демпфированием» [3]. Поведение манипулятора в режиме активной аккомодации субъективно ощущается как послушное. При прикосновении к силомоментному датчику манипулятор начинает перемещение в ту сторону, в которую на него осуществляется давление.

Далее рассмотрим линейный закон управления манипулятором при поддержании контакта с неподвижным предметом при наличии обратных связей не только по силе и скорости, но и по положению. Будем рассматривать перемещение манипулятора при законе управления, описанном в (12). Структурная схема системы управления манипулятором, реализующая такой закон управления, представлена на рис. 2.

Аналогично перемещению манипулятора в режиме активной аккомодации, рассмотрим вначале перемещение под действием заданных внешних сил. Пусть на силомоментный датчик действует постоянная внешняя сила F . При управлении (12) и при выполнении условия $F_d = F_e = 0$ уравнение (5) можно записать следующим образом:

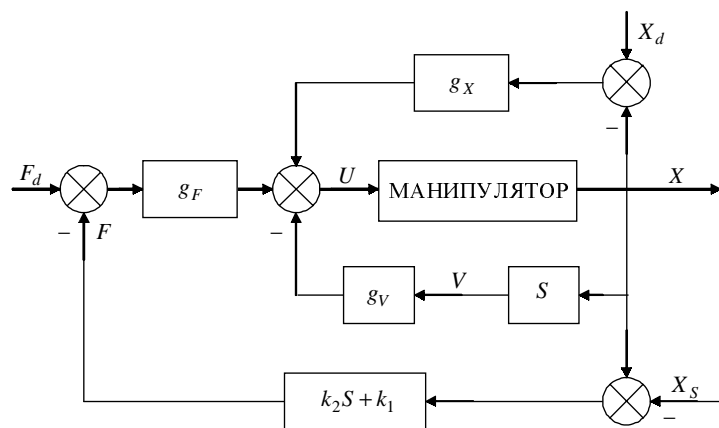


Рис. 2. Структурная схема системы управления манипулятором с контурами управления по силе, скорости и положению

$$M\ddot{X} + (d_2 + d_1(g_V + g_F k_2))\dot{X} + (1 + d_1 g_F)F + d_1 g_X (X - X_d) = 0. \quad (16)$$

Уравнение (16) имеет асимптотически устойчивый стационарный режим. По окончании переходного процесса положение манипулятора установится в стационарное положение, которое можно записать в виде

$$X = X_d - \frac{1 + d_1 g_F}{d_1 g_X} F. \quad (17)$$

Выражение (17) задает поведение манипулятора в ответ на действия внешней силы. Манипулятор будет осуществлять «послушное», но в то же время «упругое» перемещение, это значит, что манипулятор будет смещаться относительно заданного значения положения X_d в сторону действующей на него силы, но при снятии нагрузки (внешней силы) манипулятор вернется в положение, которое определяется координатой X_d . Также следует отметить, что смещение манипулятора относительно положения X_d будет тем больше, чем больше коэффициент обратной связи по силе g_F и меньше коэффициент обратной связи по положению g_X . В случае искусственной податливости поведения манипулятора является аналогичным поведению пружины, имеющей длину X_d в недеформированном состоянии с коэффициентом жесткости H , который равен

$$H = \frac{d_1 g_X}{1 + d_1 g_F}. \quad (18)$$

Описанное выше перемещение манипулятора названо искусственной податливостью в [3]. В иностранной литературе такое перемещение известно как активная податливость (active compliance [4]). Искусственная податливость, возникающая при наличии обратных связей по силе, скорости и положению, является регулируемой в отличие от естественной, которая определяется упругостью конструкции или силомоментного датчика, люфтами в соединениях.

В конце статьи можно сделать следующие выводы.

1. Способ управления манипулятором с использованием активной аккомодации возможно применять в различных операциях, например, в сборочных. Во многих алгоритмах управления осуществляют настройку матриц коэффициентов обратной связи по силе и скорости (подбор коэффициентов) так, чтобы обеспечить необходимую реакцию манипулятора в ответ на действующую между манипулятором и сопрягаемыми деталями силу. Эта реакция приводит к тому, что уменьшаются погрешности взаимного позиционирования деталей.

2. Способ управления движением манипулятора с искусственной податливостью применяется в случаях, когда заданное значение положения конечного звена манипулятора не может быть точно достигнуто. Типичными примерами такого перемещения может являться перемещение инструмента или контрольно-измерительного устройства вдоль поверхности предмета. В случае если перемещение конечного звена манипулятора задано неточно или если система управления манипулятором реализует перемещение с некоторыми ошибками, то возникает рассогласование между заданной траекторией перемещения и реальной траекторией. Если в системе управления не используется искусственная податливость, то выполнение такого перемещения будет невозможно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шнейдер А.Ю. Использование информации об усилиях в управлении манипуляционными и шагающими роботами: Дис. д-ра техн. наук: 05.13.01. Москва, 1989. С. 108–113.
2. Shimura K., Sugai M. and Hori Y. A novel robot motion control based on the decentralized robust servomechanism for each joint. // Proc. of the Int. Conf. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, IECON 91, Oct. 28 – Nov. 1. 1991. P. 1283–1288.
3. Фу К., Гонсалес Р., Лу К. Робототехника. М.: Мир, 1989. С. 242–245.
4. Path planning and control of a cooperative three-robot system manipulating large objects. / Tzafestas C. S., Prokopiou P.A., Tzafestas S.G. // J. Intell. And Rob. Syst. 1998. Vol. 22, № 2. P. 99–116.