

УДК 531.8

СИЛОВАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ

**ГУРФИНКЕЛЬ В. С., ДЕВЯНИН Е. А., ЛЕНСКИЙ А. В.,
МОЖЖЕВЕЛОВ С. Б., ФОРМАЛЬСКИЙ А. М., ШНЕЙДЕР А. Ю.**

Использование информации о силах взаимодействия робота с объектом манипулирования расширяет возможности управления роботом и круг задач, которые с его помощью могут быть решены. Наличие датчиков усилий позволяет роботу в определенной степени адаптироваться к окружающей обстановке [1-7].

При использовании силовой информации можно построить такое управление роботом, при котором он будет обладать податливостью. Подобную податливость, в отличие от естественной, обусловленной упругостью звеньев манипулятора и люфтами в соединениях, можно назвать искусственной. Свойство податливости манипулятора полезно и важно для многих операций, в частности для автоматической сборки. Используя это свойство, можно снизить требования к точности позиционирования робототехнических систем. Перестраивая параметры системы управления, можно регулировать искусственную податливость, чего нельзя сказать о естественной.

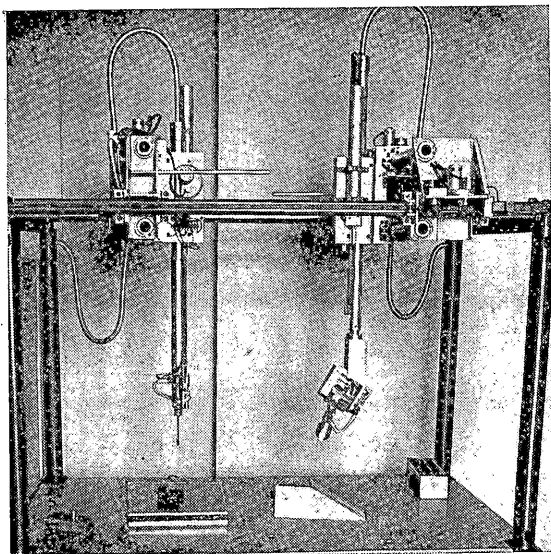
Используя информацию о силах, удастся решить, например, задачу вывода манипулятора на контакт с предметом (деталью), положение которого неизвестно, и обеспечить поддержание этого контакта с заданной силой прижатия, задачу перемещения манипулятора вдоль контура предмета заранее неизвестной формы.

Установление и поддержание контакта с объектом манипулирования можно рассматривать как одну из базовых операций, на которые расчленяется процесс манипулирования робота с объектами. Подобная операция присутствует как составная часть во многих процессах, например в автоматической сборке.

В публикуемой работе изучается задача вывода манипулятора на контакт с предметом и поддержания этого контакта. Эта «элементарная» операция исследуется при одномерном движении манипулятора. В процессе такого исследования выясняются основные трудности, возникающие при синтезе силовой обратной связи, и предлагаются способы их преодоления. Описаны некоторые другие операции, которые удается выполнить на основе предлагаемых здесь способов управления.

В исследованиях использовался экспериментальный двурукий робот портального типа УМ-1.25 (фиг. 1). Каждая рука робота имеет три поступательные степени подвижности. На руке (штанге) смонтирована кисть с тремя вращательными степенями подвижности. Установленный на ней захват имеет две независимо управляемые губки, оснащенные датчиками деформаций — тензорезисторами, которые позволяют определять три компоненты силы, действующей на губку. Губки захвата выполняют одновременно моторные и сенсорные функции. Поэтому с их помощью можно получать информацию в процессе манипулирования с объектом. Манипулятор снабжен электроприводами постоянного тока, позиционными датчиками, датчиками скорости — тахогенераторами. Система управления роботом состоит из аппаратно реализованных аналоговых следящих систем и ЭЦВМ — Nova 2/10, содержащей аналого-цифровой и цифроаналоговый преобразователи.

1. Математическая модель. Уравнения одномерного движения. Рассмотрим прямолинейное движение манипулятора, при котором захват перемещается в горизонтальной плоскости вдоль одной поступательной степени подвижности. На фиг. 2 приведена схема такого одномерного движения манипулятора с одной губкой при выходе его на контакт с предметом (1 — двигатель, 2 — редуктор, 3 — штанга манипулятора, 4 — губка-датчик, 5 — предмет). Цифрой I помечено положение манипулятора до контакта с предметом, цифрой II — при контакте с предметом. Через x обозначена



Фиг. 1

отсчитываемая от какого-то положения текущая координата губки, через x_0 — координата ближайшего к губке края предмета.

Уравнение одномерного движения манипулятора без учета индуктивности в цепи якоря электродвигателя можно записать [8] в виде

$$Mx'' + d_2x' + F = d_1u + F_e \quad (1.1)$$

Здесь M — приведенная масса всех подвижных частей — штанги манипулятора, шестерен редуктора, якоря двигателя и др., d_2x' — сила, складывающаяся из вязкого трения и противоэлектродвижущей силы двигателя, d_1u — сила, развиваемая приводом, u — напряжение, подаваемое на обмотку якоря, d_1 , d_2 — положительные постоянные, зависящие от характеристик привода и редуктора, F — сила, действующая со стороны губки на штангу манипулятора, F_e — внешняя сила, действующая на манипулятор, например сила сухого трения в редукторе.

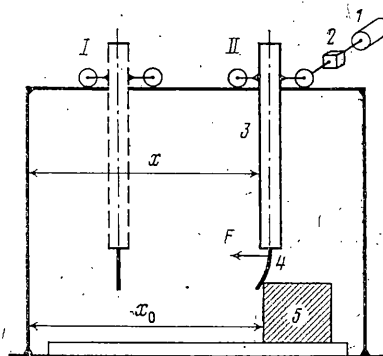
Пренебрегая массой губки, заключаем, что в отсутствие ее контакта с предметом — при $x < x_0$ — сила $F = 0$. При контакте с предметом (см. положение II на фиг. 2) губка деформируется (изгибается) и развивает силу $F \neq 0$. При небольших деформациях эту силу можно считать пропорциональной разности $x - x_0$. Таким образом приходим к формуле

$$\begin{aligned} F &= 0 \quad \text{при } x \leq x_0, \\ F &= k(x - x_0) \quad \text{при } x \geq x_0 \end{aligned} \quad (1.2)$$

Постоянный положительный коэффициент k , характеризующий жесткость губки-датчика, включает в себя модуль Юнга материала.

Соотношение (1.2) представляет собой статическую характеристику губки-датчика. В предположении, что губка является безмассовой, это соотношение остается справедливым также и в динамических процессах.

Тензодатчики, наклеенные на губку, измеряют ее деформацию.



Фиг. 2

В дальнейшем будем считать, что они измеряют деформацию $x-x_0$, а значит, с точностью до постоянного множителя, и силу взаимодействия с объектом F .

Управляющее напряжение u , которое может быть подано на обмотку якоря электродвигателя, ограничено некоторой константой u_0 :

$$|u| \leq u_0 \quad (1.3)$$

Выписанные выше уравнения можно рассматривать как простейшую математическую модель одномерного движения манипулятора. Она, помимо указанных выше, не учитывает еще ряда обстоятельств, таких, как упругость конструкции, люфт в редукторе. Вместе с тем ниже при помощи этой модели проводится анализ поведения манипулятора с разными способами управления. Ряд выводов и рекомендаций, получаемых при таком анализе, подтверждается экспериментально, что говорит о полезности указанной модели.

2. Постановка задачи. Пусть координата $x_0 = \text{const}$ предмета заранее не известна. Известным будем считать только знак разности $x-x_0$ в начальный момент времени. Задачу поставим следующим образом. Найти зависящее от измеряемых силы F и скорости $\dot{x}$ управление u , при котором манипулятор, начиная свое движение из любого начального состояния, по окончании переходного процесса прижимается к неподвижному ($x_0 = \text{const}$) предмету с заданной силой $F_g > 0$. Значение силы F_g может определяться, например, пороговой величиной силы трения, удерживающей предмет от сдвигания с места.

Величине F_g отвечает координата $x_g > x_0$, определяемая соотношением (см. (1.2)) $F_g = k(x_g - x_0)$. Для разрешимости поставленной задачи необходимо, чтобы $F_g \leq d_1 u_0$ ($x_g \leq x_0 + d_1 u_0 / k$).

3. О линейном и релейно-линейном управлении. В теории автоматического регулирования известны различные способы синтеза управления [9], при помощи которого можно решить поставленную задачу. Среди возможных самым простым управлением является линейное

$$u = -k_1(F - F_g) - k_2 \dot{x} \quad (k_1 > 0, k_2 > 0) \quad (3.1)$$

Здесь и ниже знаки в законах управления выбираются в предположении, что предмет находится справа от губки манипулятора, как на фиг. 2. Вследствие ограничения (1.3) формула (3.1) может быть реализована только в некотором диапазоне значений напряжения. При управлении (3.1) уравнение (1.1) с учетом (1.2) переписывается в виде (для $F_e = 0$):

$$M\ddot{x} + (d_2 + d_1 k_2)\dot{x} + d_1 k_1 k(x_0 - x_g) = 0 \quad (x \leq x_0) \quad (3.2)$$

$$M\ddot{x} + (d_2 + d_1 k_2)\dot{x} + k(x - x_0) + d_1 k_1 k(x - x_g) = 0 \quad (x \geq x_0) \quad (3.3)$$

При $F_g > 0$ ($x_g > x_0$) скорость $\dot{x}$, определяемая уравнением (3.2), начиная с некоторого момента времени, становится положительной, какими бы ни были начальные условия. Поэтому при управлении (3.1) манипулятор в какой-то момент времени касается предмета. Во время контакта с предметом движение манипулятора описывается уравнением (3.3). Предпоследнее слагаемое в левой части уравнения (3.3) описывает непосредственное влияние губки на движение манипулятора. Находясь в контакте с предметом, губка действует на штангу манипулятора как механическая пружина. Рассмотрение последнего слагаемого в уравнении (3.3) показывает, что линейная обратная связь по силе влияет на движение манипулятора так же, как обычная механическая пружина; нейтральное положение которой определяется координатой x_g . Следовательно, введение обратной связи по силе эквивалентно введению в систему дополнительной жесткости. Изменяя коэффициент обратной связи k_1 , можно «электрическим» путем регулировать жесткость системы, о чем говорилось выше.

Стационарное состояние системы при управлении (3.1) в отсутствие внешней силы F_e описывается равенствами

$$F = \frac{d_1 k_1}{1 + d_1 k_1} F_g \quad \left(x - x_0 = \frac{d_1 k_1}{1 + d_1 k_1} (x_g - x_0) \right), \quad \dot{x} = 0 \quad (3.4)$$

При условиях

$$d_2 + d_1 k_2 > 0, \quad 1 + d_1 k_1 > 0 \quad (3.5)$$

равновесное состояние (3.4) асимптотически устойчиво. Систему (3.2), (3.3) можно записать в виде

$$M \ddot{x} + (d_2 + d_1 k_2) \dot{x} + \varphi(x) = 0 \quad (3.6)$$

$$\varphi(x) = d_1 k_1 k (x_0 - x_g) \quad \text{при} \quad x \leq x_0$$

$$\varphi(x) = k(x - x_0) + d_1 k_1 k (x - x_g) \quad \text{при} \quad x \geq x_0$$

График функции $\varphi(x)$ показан на фиг. 3. Нетрудно показать, пользуясь, например, критерием В. М. Попова [10], что при условиях (3.5) состояние равновесия (3.4) системы (3.6) является устойчивым в целом. Другими словами, система (3.6) из любых начальных состояний асимптотически стремится к состоянию (3.4). Таким образом, изменение структуры системы, происходящее при возникновении и потере контакта губки с предметом, не вызывает неустойчивости, т. е. не является дестабилизирующим фактором. Заметим, что ограничение (1.3) при исследовании устойчивости в целом не учитывалось.

Переходные процессы при линейном (с насыщением) законе управления исследовались экспериментально на манипуляторе. Сигнал обратной связи (3.1) вычислялся на ЭЦВМ. При таком управлении задача выхода манипулятора на контакт с предметом и поддержания этого контакта решается. Однако при небольших значениях коэффициента k_1 быстродействие системы невелико и велика статическая ошибка в отслеживании силы прижатия. Наличие сил сухого трения увеличивает ошибку. С ростом коэффициента k_1 возникает и возрастает колебательность системы. Колебания можно в какой-то степени задемпфировать, увеличивая коэффициент k_2 . Однако такому демпфированию мешает ограничение (1.3) на управление. Эти выводы получаются также и теоретически. При больших значениях k_1 в эксперименте наблюдаются незатухающие колебания, которые могут быть связаны с запаздыванием в цепи управления, люфтами и другими факторами, неучтенными в приведенной выше математической модели.

Поставленная задача решается также при помощи релейно-линейного управления

$$u = -u_0 \operatorname{sign} [k_1 (F - F_g) + k_2 \dot{x}] \quad (3.7)$$

Состояние равновесия системы (1.1), (1.2), (3.7) описывается равенствами ($F_e = 0$):

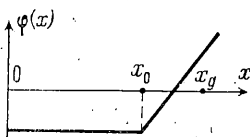
$$F = F_g (x = x_g), \quad \dot{x} = 0 \quad (3.8)$$

т. е. при релейном управлении система не имеет статической ошибки, которая также отсутствует и при наличии внешней силы F_e , если только $|F_e - F_g| < d_1 u_0$.

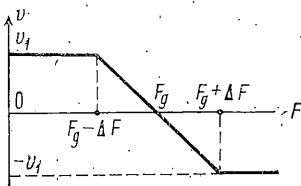
При управлении (3.7) фазовая точка системы либо пересекает линию переключения

$$k_1 (F - F_g) + k_2 \dot{x} = 0 \quad (k_1 k (x - x_g) + k_2 \dot{x} = 0) \quad (3.9)$$

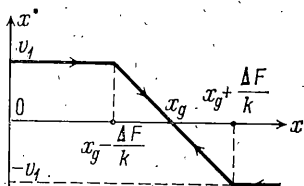
либо скользит по ней [9, 11]. Скользящий режим, как известно [9], имеет место лишь на некотором отрезке прямой (3.9), содержащем точку равновесия (3.8). При условиях $k_1 > 0$, $k_2 > 0$ равновесие (3.8) является асимпто-



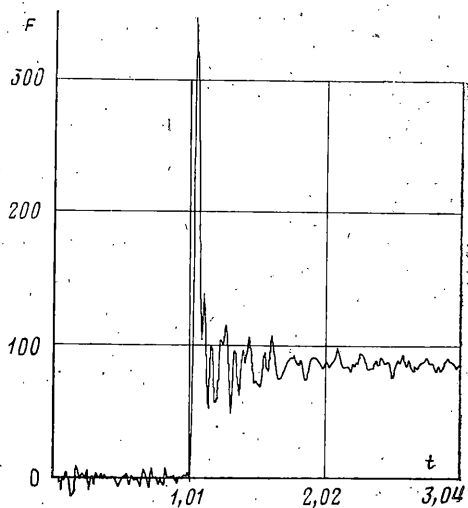
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6

тически устойчивым (даже при наличии внешней силы F_e). С ростом отношения k_1/k_2 отрезок скольжения уменьшается, при этом система (1.4), (1.2), (3.7) становится более колебательной.

Всюду выше рассматривалась задача о контакте манипулятора с неподвижным предметом ($x_0 = \text{const}$). Однако имеет смысл также задача поддержания контакта и с предметом, который перемещается, например, с деталью, находящейся на конвейере ($x_0 = x_0(t)$). При небольшом значении коэффициента k_1 в законе (3.1) или небольшой величине k_1/k_2 в законе (3.7) быстродействие системы (1.1), (1.2) невелико. При малом быстродействии манипулятор вяло реагирует на перемещения предмета. Другими словами, при удалении предмета от захвата манипулятор медленно догоняет его. Если же предмет наводится на захват, то манипулятор медленно «отстывает» (плохо поддается давлению со стороны предмета). С увеличением коэффициента k_1 или отношения k_1/k_2 манипулятор быстрее реагирует на перемещения предмета — податливость его возрастает. Однако при этом, как отмечалось выше, возрастает колебательность системы в переходном процессе и при остановке предмета наблюдается значительное число колебаний. Наиболее податливой и одновременно наиболее колебательной система (1.4), (1.2), (3.7) становится при $k_2 = 0$. В этом случае, однако, при неподвижном предмете в эксперименте возникают незатухающие колебания.

4. Оптимальное и квазиоптимальное управление. Описанные в предыдущем разделе линейный и релейный законы управления, решая поставленную задачу, не обеспечивают, как отмечено выше, достаточно высокого качества процесса регулирования. В связи с этим возникает задача отыскания оптимального по быстродействию закона управления системой (1.4), (1.2). В случае ограничения (1.3) управление, при котором выход системы в желаемое состояние (3.8) происходит за минимальное время, является, как известно [12], релейным $u = \pm u_0$. Переключение напряжения u со значения $+u_0$ на значение $-u_0$ и наоборот должно происходить на некоторой линии переключения. Уравнения этой линии зависят от параметров манипулятора, которые, однако, не всегда бывают известны с достаточной степенью точности. Кроме того, эти уравнения, будучи существенно нелинейными, имеют сложный вид. Реализация подобного закона управления без использования ЭЦВМ затруднительна. Использо-

ние же ЭЦВМ, тем более для вычисления сложных функций, приводит к временной задержке управляющего сигнала, что может вызвать незатухающие колебания.

Из сказанного следует, что реализация оптимального управления связана с определенными трудностями, которые удается обойти ценой некоторого отступления от оптимального закона управления. Далее описывается «квазиоптимальное» управление и соображения, которые к нему приводят.

Если система уже приведена в малую окрестность желаемого состояния, то в дальнейшем, отказавшись от оптимального управления, будем использовать какой-либо стабилизирующий это состояние закон управления, например релейный закон (3.7). Если при этом «вдали» от желаемого состояния использовать, как при оптимальном управлении, максимально возможные управляющие напряжения $u = \pm u_0$, то проигрыш в быстродействии будет невелик [13]. В этом случае речь идет о сравнении времен приведения системы не точно в желаемое состояние (3.8), а в некоторую его окрестность. Но в рассматриваемых прикладных задачах обычно требуется приведение системы в желаемое состояние с некоторой точностью.

В соответствии с высказанными соображениями в начале процесса управления, когда известно только направление, в котором нужно двигаться к предмету (выраво), положим $u = u_0$.

Через некоторое время после начала движения с датчика усилий поступает сигнал о наличии силы $F > 0$. Это указывает на возникновение контакта манипулятора с предметом. После возникновения контакта, считая, что система находится уже в малой окрестности желаемого состояния, переходим на управление «по скорости»

$$u = -\text{sat} [k_2(x^* - v)] \quad (4.1)$$

$$v = v_1 \text{ при } F \leq F_g - \Delta F, \quad v = -v_1 \text{ при } F \geq F_g + \Delta F \quad (4.2)$$

$$v = k'(F - F_g) \text{ при } F_g - \Delta F \leq F \leq F_g + \Delta F$$

$$(\text{sat } y = y \text{ при } |y| \leq u_0, \text{ sat } y = u_0 \text{ sign } y \text{ при } |y| \geq u_0)$$

В этих выражениях k_2 и k' — постоянные коэффициенты усиления, ΔF — подбираемая экспериментально величина коридора, в котором задаваемая скорость v зависит линейно от рассогласования по силе, v_1 — постоянная величина скорости, также подбираемая экспериментально.

Соотношение (4.1) реализовано при помощи следящей системы, на один вход которой с тахогенератора поступает сигнал $\dot{x}$, а на другой — величина v , вычисляемая на ЭЦВМ. Коэффициент усиления выбран большим — $k_2 \approx 7 \cdot 10^4$ В·с/см. Большой коэффициент усиления k_2 позволяет отслеживать малые скорости движения даже при наличии возмущающей силы F_g , например силы сухого трения. Это нетрудно показать теоретически при помощи уравнений (4.1) и (4.3). При экспериментальных исследованиях удается отслеживать скорости от 0,01 до 10 см/с (диапазон регулирования составляет 10^3). Благодаря возможности отслеживания малых скоростей можно задавать (и отслеживать) малые скорости v_1 (см. выражение (4.2)). Уменьшая скорость v_1 , можно уменьшить колебательность системы. В то же время уменьшение величины v_1 приводит к затягиванию переходных процессов. В экспериментах величина v_1 выбиралась равной 0,05–0,5 см/с.

Максимальное напряжение $u = u_0$ можно реализовать также при помощи формулы (4.1), подавая на вход следящей системы сигнал $v > v_0$. Здесь v_0 — установившееся при $u = u_0$ значение скорости движения манипулятора в отсутствие его контакта с предметом.

При бесконечном увеличении коэффициента k_2 выражение (4.1) принимает вид

$$u = -u_0 \text{ sign}(x^* - v) \quad (4.3)$$

Если нижнюю строчку из выражения (4.2) подставить в формулу (4.1), то, введя обозначение $k_1 = k_2 k'$, в «линейной зоне» получим выражение (3.1), а если эту строчку подставить в формулу (4.3), то получится выражение (3.7).

На фиг. 4 в плоскости переменных F и v показан график функции (4.2) при условии ее непрерывности $k' \Delta F = v_1$. На фиг. 5 этот график перестроен в плоскости переменных x , $\dot{x}$, в которых он описывается формулой

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v_1 \quad \text{при} \quad x \leq x_g - \Delta F/k & \dot{x} &= -v_1 \quad \text{при} \quad x_g + \Delta F/k \leq x \\ \dot{x} &= k' k (x_g - x) \quad \text{при} \quad x_g - \Delta F/k \leq x \leq x_g + \Delta F/k \end{aligned} \quad (4.4)$$

Стационарное состояние (3.8) системы (1.1), (1.2), (4.3), (4.2) делит ломаную (4.2) или (4.4) на две части, каждая из которых в области

$$0 < F < d_1 u_0 \quad (x_0 < x < x_0 + d_1 u_0/k)$$

при достаточно малом значении v_1 является интегральной кривой этой системы. Направление движения по этим траекториям, происходящее в скользящем режиме, показано на фиг. 5 стрелками. Выражение (4.3) в скользящем движении доопределяется известным способом [9, 11]. Эти интегральные траектории являются притягивающими множествами, т. е. все траектории системы, начинающиеся из некоторой малой окрестности кривой (4.4), попадают на кривую, не выходя из этой окрестности. После попадания на кривую (4.4) система (1.1), (1.2), (4.3), (4.2) без колебаний движется к состоянию равновесия (3.8). Благодаря наличию скользящего режима система оказывается инвариантной по отношению к внешним возмущениям, действующим на нее. Использование для релейного управления в качестве линии переключения ломаной (4.2) вместо прямой (3.9) позволяет сохранить большой участок скольжения и одновременно ускорять переходные процессы. Движения системы (1.1), (1.2) с управлением (4.1), (4.2) при конечном, но большом коэффициенте усиления близки к движениям системы с управлением (4.3), (4.2). Учитывая сказанное, нетрудно оценить влияние на характер переходного процесса различных параметров, входящих в выражения (4.2), (4.4), в частности величин v_1 и k' .

На фиг. 6 приведен полученный при помощи графопостроителя ЭЦВМ график зависимости $F(t)$ для одного из экспериментов при $F_g = 100 \text{ Г} \approx 1 \text{ Н}$, $\Delta F = 50 \text{ Г} \approx 0,5 \text{ Н}$, $v_1 = 0,3 \text{ см/с}$, $k' = 0,001 \text{ см/г} \cdot \text{с} \approx 0,1 \text{ см/Нс}$ (по оси абсцисс откладывается время в секундах, по оси ординат — сила в граммах). Скорость v_0 подхода манипулятора к предмету составляет 5 см/с . В начале движения сила пружины F (см. фиг. 6) колеблется около нуля, поскольку в это время отсутствует контакт губки манипулятора с предметом ($F(t) \neq 0$ из-за погрешностей в канале измерения силы). После возникновения контакта сила F резко возрастает, достигает своего максимального значения, равного примерно $3,5 \text{ Н}$, затем резко падает и после некоторого числа колебаний приходит к установившемуся значению, близкому к F_g . При этом контакт манипулятора с предметом не теряется. Значительное число колебаний в переходном процессе объясняется, по-видимому, упругостью конструкции самого манипулятора. Несмотря на реверс двигателя, в момент соприкосновения манипулятора с предметом происходит резкое возрастание силы, что связано с недостаточным быстроедействием системы. Если скорость приближения манипулятора к объекту v_0 такова, что при ударе предмет сдвигается с места, то эту скорость приходится уменьшать, теряя при этом в быстроедействии. Другая возможность состоит в том, чтобы в момент возникновения контакта на фоне управления (4.1), (4.2) совершать также реверс двигателем, который приводит во вращение кисть манипулятора. При помощи этого двигателя быстрее осуществляется перемещение губки.

Описанное «квазиоптимальное» управление позволяет быстро выводить манипулятор на контакт с неподвижным предметом.

Путем некоторой модификации указанное управление удастся использовать также и для поддержания контакта манипулятора с перемещающимся предметом ($x_0 = x_0(t)$). В работе модифицированного алгоритма управления используется обычный потенциометрический датчик положения штанги манипулятора. При помощи этого и силового датчика определяется координата x_0 предмета при возникновении и потере контакта с ним. Эта информация дает возможность судить о том, движется ли предмет и в каком направлении. Поддержание контакта удастся осуществить, конечно, не при любом законе $x_0(t)$ перемещения предмета.

При реализации управления (4.1), (4.2) величина (4.2) вычисляется, как сказано выше, на ЭЦВМ. Это вычисление происходит с постоянным запаздыванием θ (то, что вычисляемая на ЭЦВМ величина является кусочно-постоянной функцией времени, не учитываем), поэтому уравнения (1.1), (4.1), (4.2) при $x > x_0$ в линейной зоне приобретают вид

$$Mx''(t) + (d_2 + d_1 k_2) x'(t) + k[x(t) - x_0] + d_1 k_2 k' [x(t - \theta) - x_s] = 0 \quad (4.5)$$

Считая запаздывание θ малым и ограничиваясь величинами первого порядка малости по θ , заменим функцию $x(t - \theta)$ выражением $x(t) - \theta x'(t)$. Тогда уравнение (4.5) примет вид

$$Mx''(t) + [d_2 + d_1 k_2 (1 - k' k \theta)] x'(t) + k(1 + d_1 k_2 k') x(t) - k x_0 - d_1 k_2 k' k x_s = 0$$

Стационарное решение этого уравнения устойчиво при $d_2 / (d_1 k_2) + 1 - k' k \theta > 0$.

Если величина k_2 велика, то неравенство можно заменить следующим: $k' k \theta < 1$.

Из рассмотрения этих неравенств следует, что устойчивость системы может нарушиться как с ростом коэффициента обратной связи по силе, так и с ростом жесткости датчика. Эти выводы подтверждаются экспериментально.

Многие движения манипулятора можно рассматривать как суперпозицию нескольких движений, в одном из которых требуется обеспечить поддержание контакта с предметом. Такой подход и разработанный алгоритм управления позволяют решить ряд манипуляционных задач.

Одной из решенных является задача организации движения манипулятора, при котором губка захвата перемещается вдоль контура какого-то неизвестного объекта (обводит, ощупывает его). Это движение рассматривается как суперпозиция движений по нормали к предмету в точке касания с ним и по касательной. Для управления движением по нормали используется алгоритм (4.1), (4.2), обеспечивающий контакт с предметом, а движение по касательной происходит просто с постоянной скоростью.

Процесс захватывания одиночных предметов также можно рассматривать как совокупность элементарных операций, в число которых входит установление контакта с предметом и обводка его. Используя алгоритмы управления отдельными операциями, удалось организовать также и этот процесс.

Пользуясь алгоритмом управления (4.1), (4.2), удастся осуществить одну из важных сборочных операций — вставление вала в отверстие (разность их диаметров в эксперименте составляет 20 мкм). Для осуществления этой операции нужно, чтобы силы взаимодействия вала со стенками отверстия поддерживались равными нулю [2, 3]. Для этого в алгоритме управления вида (4.1), (4.2) следует положить $F_s = 0$.

Процессы вывода манипулятора на контакт с неподвижным и перемещающимся предметом, обводки предмета, его захватывания, а также вставление вала в отверстие зарегистрированы на киноплёнке.

Описанные в публикуемой работе задачи и способы управления рукой манипулятора, выполняющей те или иные действия, представляют интерес не только для робототехники, но, по-видимому, и для биомеханики — с точки зрения моделирования аналогичных действий, производимых живыми существами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Whitney D. E. Force Feedback Control of Manipulator Fine Motion.— Trans. ASME. Ser. G. J. Dynam. Systems, Measur. and Control, 1977, v. 99, No. 2, p. 91—97.
2. Mason M. T. Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators.— IEEE Trans. Syst., Man and Cybern., 1981, v. SMC-11, No. 6, p. 418—432.
3. Reibert M. H., Craig J. J. Hybrid Position/Force Control of Manipulators.— Trans. ASME. Ser. G. J. Dynam. Systems, Measur. and Control, 1981, v. 103, No. 2, p. 126—133.
4. Гурфинкель В. С., Девянин Е. А., Анищенко С. А., Ленский А. В., Можжевелов С. Б., Шнейдер А. Ю. Адаптивный автоматический манипулятор с силоизмерительными датчиками.— Станки и инструмент, 1981, № 12, с. 19—22.
5. Девянин Е. А., Карташев В. А., Ленский А. В., Шнейдер А. Ю. Силовая обратная связь в системе управления шагающего аппарата.— В кн.: Исследование робототехнических систем. М.: Наука, 1982, с. 147—158.
6. Девянин Е. А., Гурфинкель В. С., Ленский А. В., Можжевелов С. Б., Шнейдер А. Ю. Робот-манипулятор с регулируемой жесткостью.— В кн.: Исследование робототехнических систем. М.: Наука, 1982, с. 176—181.
7. Гурфинкель В. С., Девянин Е. А., Анищенко С. А., Ленский А. В., Можжевелов С. Б., Формальский А. М., Шнейдер А. Ю. Управление манипулятором на основе силовой обратной связи.— In: Abstracts 2 nd Int. Conference Artificial Intelligence and Information Control Systems of Robots. Smolenice, 1982, p. 103—106.
8. Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода. М.: Энергоиздат, 1981. 576 с.
9. Воронов А. А. Основы теории автоматического управления. Ч. 2. М.—Л.: Энергия, 1966. 372 с.
10. Айзерман М. А., Гантмахер Ф. Р. Абсолютная устойчивость регулируемых систем. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 140 с.
11. Филиппов А. Ф. Приложение теории дифференциальных уравнений с разрывной правой частью к нелинейным задачам автоматического управления. Тр. 1-го Междунар. конгресса Междунар. федерации по автоматическому управлению. Т. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1961, с. 699—708.
12. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1969. 384 с.
13. Фельдбаум А. А. Вычислительные устройства в автоматических системах. М.: Физматгиз, 1959. 800 с.

Москва

Поступила в редакцию
13.V.1983