

〔原著論文〕

ロボットアームの位置と力の動的ハイブリッド制御

——手先拘束の記述と関節駆動力の算出——

吉 川 恒 夫*

ロボットアームのより複雑な作業への応用に際しては、手先位置だけでなく、対象物に加える力の制御が必要な場合も多い。このための制御方式として、Raibert と Craig が位置と力のハイブリッド制御を提案している。本論文ではさらにロボットアームの動特性をも考慮に入れた動的ハイブリッド制御の考え方を提案する。まずアームの手先に対する拘束を拘束超曲面で表現している。ついで動的ハイブリッド制御の基本式を導いている。そして最後にサーボ補償器を備えた動的ハイブリッド制御系の基本的な構成を与えている。

1. 緒 言

ロボットアームの適用範囲が広がるにつれて、研磨、ばり取り、組立などの作業に見られるように、手先効果器の位置だけでなく、対象物に加える力の制御が必要な場合も多くなっている(注1)。アームの力制御については種々の研究がなされてきた¹⁻⁶⁾。特にある方向には位置、別の方向には力を制御しなければならないという状況に対処するための1つの方法として、位置と力のハイブリッド制御という考え方が提案された⁷⁾。この制御法は従来のもよりもその考え方が明快であり、実用化の可能性も高い方法であると考えられる。ただしこの方法ではロボットの動特性が十分には考慮されていない。またそのため位置と力が同時に目標値通りに制御できるという理論的保証がない。一方、手先拘束の一般的表現法については Mason の報告⁸⁾があるが、これは運動学的な観点のみからの研究である。

本論文では、アームの動特性を考慮に入れたハイブリッド制御について考察する。まずアームの手先が対象物から受ける拘束を、拘束超曲面によって表現する。つぎにこれとアームの運動方程式より、目標位置軌道ならびに目標力軌道が与えられたとき、それらを実現する関節駆動力を算出するための基本式を誘導する。最後にこの

基本式にもとづく動的ハイブリッド制御系の基本構成について述べる。

2. 手先拘束の記述

アームの力制御について論じるには、手先がどのような拘束を受けるかを定式化することが必要である。手先拘束は一般に、アームの先端に取付けた手先効果器を対象物面に押しつけながらその面をならわせたり、それが把握した部品を他の対象物に組み付けたり、手先効果器が対象物の可動部分を把握して動かしたりすることによって生じる。これらを手先位置の自由度からなれば位置の並進成分の一部のみが拘束される場合、位置並進成分と回転成分の一部ずつが拘束される場合など、種々の場合がある。

ここではこれらの拘束を一般的に、手先の位置を示すベクトルの空間内のある超曲面の組によって表示する。まず手先位置は6自由度をもつものとし、ある基準座標系から見た手先位置ベクトルを $r \in R^6$ (6次元ユークリッド空間) とする。そして手先拘束が、 R^6 のある部分集合 S 内で、互いに独立な m 個の超曲面

$$p_i(r) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

上に r が拘束されるという形で表現できるものと仮定する。ただし $m \leq 6$ で、 $p_i(r)$ は r に関して2回微分可能とする。(1)式を時間変数 t に関して微分することにより

$$E_F \dot{r} = 0 \quad (2)$$

を得る。ただし“ $\dot{}$ ”は時間微分を表し、

$$E_F = [e_{7-m}, e_{8-m}, \dots, e_6]^T \quad (3)$$

原稿受付 1985年7月8日

* 京都大学工学部

(注1) 以下本論文では「位置」を、通常的位置だけでなく姿勢も含むものとして用いる。そして通常的位置は「位置の並進成分」、姿勢は「位置の回転成分」と考えることにする。また「力」についても同様に通常の意味での力とモーメントを合わせたものとする。

$$e_{6-m+i} = \frac{\partial p_i(r)}{\partial r} \Big/ \left\| \frac{\partial p_i(r)}{\partial r} \right\| \quad (4)$$

であり、 $\|\cdot\|$ はユークリッドノルムを意味する。このとき(1)式の独立性の仮定から $\text{rank } E_F = m$ となっている。さらに

$$E_F \ddot{r} + a_{rF} = 0 \quad (5)$$

$$a_{rF} = \dot{E}_F \dot{r} \quad (6)$$

を得る。

さて、 S 内で、ベクトルの集合 $\{e_{7-m}, \dots, e_6\}$ に独立でかつ互いにも独立な単位長さベクトルの組 $\{e_1, \dots, e_{6-m}\}$ を適当に定める。ただし $e_i, i=1, \dots, 6-m$ は r に関して微分可能な関数とする。そして手先の現在位置 r を原点とし、 $\{e_1, \dots, e_6\}$ を基底とする座標系を導入し、これを拘束座標系とよぶことにする。すると拘束座標系から見たベクトル \dot{r}, \ddot{r} は、 $E = [e_1, \dots, e_6]^T$, $E_P = [e_1, \dots, e_{6-m}]^T$ とおくと、

$$E \dot{r} = \begin{bmatrix} E_P \dot{r} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$E \ddot{r} = \begin{bmatrix} E_P \ddot{r} \\ -a_{rF} \end{bmatrix} \quad (8)$$

を得る。(7)式は拘束面法線方向の速度成分が0であること、(8)式はその方向の加速度成分が、速度 \dot{r} が与えられると定まってしまうという当然のことを意味している。

手先の速度は \dot{r} 以外に、基準座標系の各座標軸方向の並進速度と各座標軸まわりの回転速度からなる6次元ベクトルで表示することもできる⁹⁾。このベクトルを v で表わすとき、 \dot{r} と v は一般にある変換 $T(r)$ の関数によって

$$v = T \dot{r} \quad (9)$$

と関係づけることができる。以下では簡単のため T は部分集合 S 内で正則であると仮定する。

なお、拘束超曲面の表現法は一意でない。したがって後の取り扱いが容易になるような表現法を選ぶことが望ましい。特に E_P は E_F に直交し、また各 e_i も互いに直交となるように取るのが望ましいが、複雑な拘束の場合などは、直交性にこだわらず物理的にわかり良いことを優先してもよい。

拘束超曲面には、面のどちら側への動きに対しても拘束が働く双方向性のものと、1方向には拘束が働くがもう1方向には運動が自由な単方向性のものとが存在する。後者の場合には、たとえば(1)式の p_i の値が正となる側に運動が自由であるものとすればよい。ただし本報告では、後者の場合でも p_i の値が負となる方向に力を加えて拘束面に乗るように制御することを目的とする状況のみを考えることにし、両者を特に区別せずに議論を

進める。

超曲面によって手先拘束を表すという考え方は、すでに Mason⁹⁾ によって用いられていることを注意しておく。ただし彼はマニピュレータの運動学にのみ注目しているため、加速度は考慮していない。また超曲面の式を陽に与えていない。また、最近、被操作物の運動自由度構造とその動特性を考慮したマニピュレータの動的制御の研究が高瀬によって報告された¹⁰⁾。被操作物が(特に複雑な)機構的構造をもつ場合には、そこで提案された拘束運動の記述法が有効であろう。

3. 動的ハイブリッド制御のための 関節駆動力

3.1 手先拘束下のアームの運動と拘束力

n 自由度をもつロボットアームを考え、その関節変数を $q \in R^n (n \geq 6)$ とする。そして手先位置 r と関節変数 q の関係が

$$r = c(q) \quad (10)$$

で与えられるとする。これより

$$\dot{r} = J \dot{q}, \quad J = dc(q)/dq^T \quad (11)$$

$$\ddot{r} = J \ddot{q} + a_q, \quad a_q = \dot{J} \dot{q} \quad (12)$$

を得る。

他方アームの動特性は

$$M(q) \ddot{q} + h(q, \dot{q}) + V \dot{q} + g(q) = \tau \quad (13)$$

で与えられるものとする。ここで $M(q)$ は正則な慣性行列(以下 M と略記する)、 $h(q, \dot{q})$ はコリオリ力および遠心力の項、 V は粘性摩擦行列、 $g(q)$ は重力項、 τ は関節駆動力である。さてアームが状態 (q, \dot{q}) にあり、その手先が(1)式の拘束を受けているという条件のもとに、駆動力 τ_c を加えた場合に、関節変数の動き(すなわち \dot{q}) と、拘束面に加わる力を求めよう。

簡単のため、拘束面と手先の間に摩擦はないものとする。すると基準座標系で表示した手先から拘束面に加えられる(各座標軸方向の力と各座標軸まわりのモーメントからなる)力 $f \in R^6$ は、拘束面の法線方向成分だけであるから(2),(9)式より

$$f = \hat{E}_F^T f_F \quad (14)$$

$$\hat{E}_F = -E_F T^{-1} \quad (15)$$

と表せる。ここで $f_F \in R^m$ は未知ベクトルである。この f が各関節に及ぼす反力 $\tau_{F'}$ は

$$\tau_{F'} = -(TJ)^T f = J^T E_F^T f_F \quad (16)$$

となる。この $\tau_{F'}$ と τ_c が各関節に駆動力として加わるのであるから、 $\tau = \tau_c + \tau_{F'}$ を(13)式に代入することにより、

$$M \ddot{q} - J^T E_F^T f_F = \tau_c - \{h(q, \dot{q}) + V \dot{q} + g(q)\} \triangleq b_1 \quad (17)$$

を得る. また (5), (12) 式より

$$E_F J \ddot{q} = -E_F a_q - a_{rF} \triangleq b_2 \quad (18)$$

となる. 上の2式より \ddot{q} と f_F を求めると

$$\ddot{q} = M^{-1} \{ b_1 + (E_F J)^T K (b_2 - E_F J M^{-1} b_1) \} \quad (19)$$

$$f_F = K (b_2 - E_F J M^{-1} b_1) \quad (20)$$

となる. ただし

$$K = (E_F J M^{-1} J^T E_F^T)^{-1} \quad (21)$$

である.

3.2 関節駆動力の算出

前節で任意の駆動力 τ_C を各関節アクチュエータによって加えた場合のアームの運動と拘束力を求めた. 逆に今, 位置の加速度目標値が $\ddot{r}_{EP} \triangleq E_P \ddot{r}$ に対して \ddot{r}_{EPd} で与えられ, 力の目標値が f_F に対して f_{Fd} で与えられたとする. このとき,

$$\tau_C = \tau_P + \tau_F \quad (22)$$

$$\tau_P = M \ddot{q}_d + h(q, \dot{q}) + V \dot{q} + g(q) \quad (23)$$

$$\tau_F = -J^T E_F^T f_{Fd} \quad (24)$$

$$\ddot{q}_d = J^+ \{ E^{-1} [\ddot{r}_{EPd} - a_{rF}] - a_q \} + (I - J^+ J) k \quad (25)$$

によって算出した駆動力 τ_C をアームに加えれば (19) ~ (21) 式より

$$\ddot{r}_{EP} = \ddot{r}_{EPd}, \quad f_F = f_{Fd} \quad (26)$$

が得られ, 目標値が達成されることがわかる. (25) 式中の k は任意の時間関数で, $n > 6$ の場合, すなわち冗長ロボットの場合に現れてくるアーム姿勢の任意性を表すものである.

以上の議論より, (1) 式で表されるような手先拘束に対しては rank $J = 6$ である限り, すなわちアームが特異状態にない限り, 位置の加速度目標値を達成するための駆動力 τ_P と力目標値を達成するための駆動力 τ_F を加え合わせたものを関節駆動力とすることにより, 位置と力が同時に制御できるという自然な結果が明確に示されるとともに, 関節駆動力を算出するための基礎式 (22) - (25) が与えられた.

3.3 動的ハイブリッド制御系の基本構成

前節の結果により, 力制御に関しては目標軌道を変数 f_F を通して与えることができ, 位置制御に関しては変数 \ddot{r}_{EP} を通して与えることができることを示した. しかし \ddot{r}_{EP} を2回積分した値がどのような物理的位置を表わすのか明確でない. 位置制御に対しては加速度でなく位置の目標軌道を指定できることが, サーボ系設計に際しても望ましい. ここではそれができるように

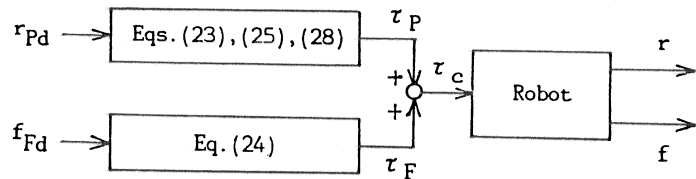


Fig. 1 Open-loop dynamic hybrid control system

$$\dot{r}_P = E_P \dot{r} \quad (27)$$

を満足する r の関数 $r_P = s(r)$ が存在するように E_P を選べるものと仮定する. $s(r)$ は $p(r)$ に対して $\dot{p}(r) = E_P \dot{r}$ となっていることに対応するものであり, $p(r)$ と組になって曲線座標を定義する. そしてこれを局所的に見たものが拘束座標系である. (27) 式が成立するとき

$$\ddot{r}_P = \ddot{r}_{EP} + a_{rP}, \quad a_{rP} = \dot{E}_P \dot{r} \quad (28)$$

となるので, \dot{r} が与えられたとき, \ddot{r}_{EP} と \ddot{r}_P は1対1の関係にある.

さて, このような準備のもとに, (1), (13) 式のモデルが完全に正確ならば, r_P に対する目標軌道を r_{Pd} と表すとき, Fig. 1 のような開ループ系で目標値通りの位置と力が実現できることになる. しかしモデルの不正確さや実システムに入る外乱などのために, 実際の応答は目標値からはずれる可能性がある. ゆえにこれを補償するためのサーボ補償器をつけ加えなければならない. これには種々の形が考えられるが, 1つの基本的な構成は Fig. 2 に示すように位置サーボループと力サーボループに分割し, それぞれ独立にサーボ補償器を備えることである. 位置サーボ, 力サーボを Raibert ら⁷⁾と同様に, 制御誤差に対する PI ないし PID 形補償とした場合に, 彼らの制御系との主な相異点は, (23), (25) 式に示す力学的な力のフィードフォワード項が入っていることである. なお, 彼らは (24) 式に示す f_{Fd} のフィードフォワード項を入れる根拠を準静的動作をするという仮定

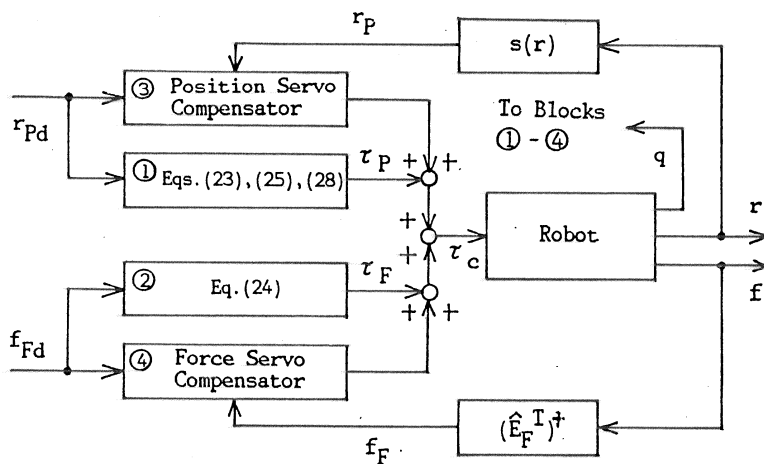


Fig. 2 Dynamic hybrid control system with servo compensators

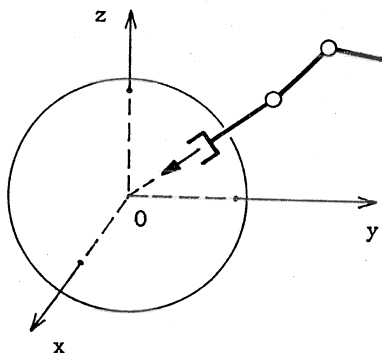


Fig. 3 Constrained motion to a sphere surface

に求めているが、本報告の定式化の範囲内では、このフィードフォワード項が正確な位置と力の制御にとって重要な役割をはたすことが示されている。さらに具体的な制御系構成にあたっては、最近研究の進んでいるサーボ系の理論^{11,12)}が適用できよう。

4. 手先拘束作業の例

4.1 球面への拘束

Fig. 3 に示すように、手先が半径 α の球の表面上に、手先方向を球の中心に向けた姿勢で拘束される場合を考える。このような拘束の例としては Fig. 4(a) のように球の表面を砥石で研摩する場合や、Fig. 4(b) のようにボールジョイントをもつジョイスティックを操作する場合などが考えられる。

r として基準座標系から見た手先並進位置と、Fig. 5 の状態を基準状態とするオイラー角で表した姿勢を合わせた $[x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$ をとるものとし、簡単のため S を $\alpha - |z| > \epsilon$ (ϵ は正の定数) の領域とする。すると拘束超曲面は

$$x^2 + y^2 + z^2 - \alpha^2 = 0 \tag{29}$$

$$\varphi - \text{atan} 2(-y, -x) = 0 \tag{30}$$

$$\theta - \text{atan} 2(\sqrt{\alpha^2 - z^2}, -z) = 0 \tag{31}$$

で与えられる。ここで $\text{atan} 2$ は

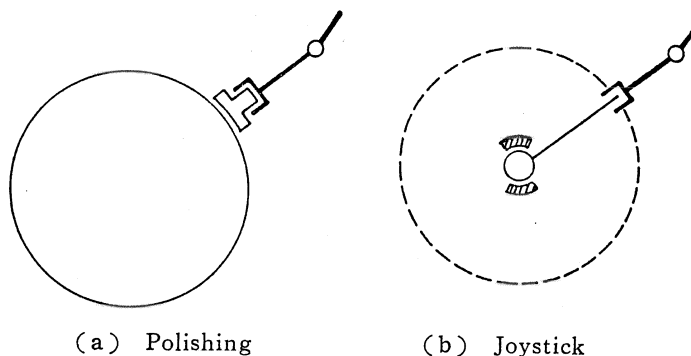


Fig. 4 Examples of constrained motion to a sphere surface

$$\text{atan} 2(a, b) = \arg(b + aj) \tag{32}$$

で定義された角度を意味する。関数 $\text{atan} 2(a, b)$ を時間について微分すると

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [\text{atan} 2(a, b)] &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\arg(b + \Delta b + [a + \Delta a]j) - \arg(b + aj)}{\Delta t} \\ &= \frac{\dot{a}b - a\dot{b}}{a^2 + b^2} \end{aligned} \tag{33}$$

となることに注意すれば

$$\begin{aligned} E_F = & \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & \beta \end{bmatrix}^{-1} \\ & \begin{bmatrix} x & y & z \\ y/(\alpha^2 - z^2) & -x/(\alpha^2 - z^2) & 0 \\ 0 & 0 & -1/(\alpha^2 - z^2)^{1/2} \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{34}$$

を得る。ただし

$$\beta = \left(\frac{1 + \alpha^2 - z^2}{\alpha^2 - z^2} \right)^{1/2} \tag{35}$$

である。また a_{rF} は

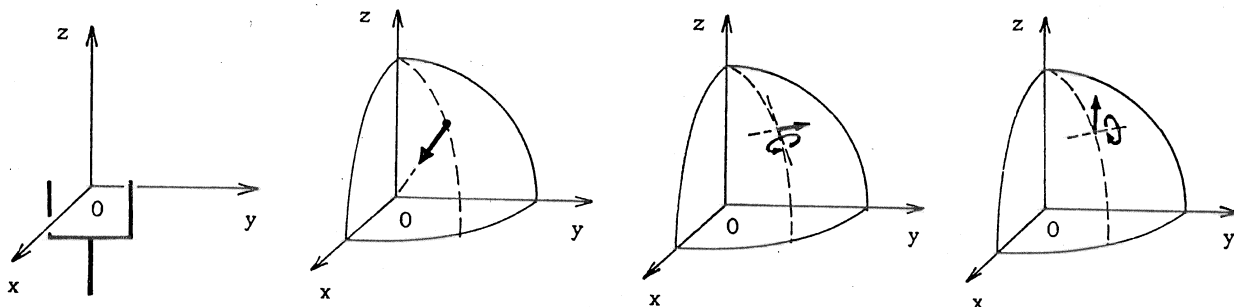


Fig. 5 Zero state of (a) First column vector (b) Second column vector (c) Third column vector
Fig. 6 Column vectors of \hat{E}_F^T

$$a_{rF} = \begin{bmatrix} (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2)/\alpha \\ 0 \\ z\dot{z}/[(\alpha^2 - z^2)(1 + \alpha^2 - z^2)^{1/2}] \end{bmatrix} \quad (36)$$

となる。いま E_P を E_F との独立性を考慮して

$$E_P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

とすれば

$$r_P = [\varphi, \theta, \psi]^T \quad (38)$$

となる。 φ, θ が球面上の位置の並進成分を示し、 ψ が手先の手先方向軸まわりの回転を示すと解釈すれば、 r_P が位置制御のためのわかりよい変数であることが理解できる。他方力制御のための変数 f_F については、 $s\varphi = \sin \varphi$, $c\varphi = \cos \varphi$ などと略記するとき

$$T = \begin{bmatrix} I_3 & 0 \\ 0 & T_a \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$T_a = \begin{bmatrix} 0 & -s\varphi & c\varphi s\theta \\ 0 & c\varphi & s\varphi s\theta \\ 1 & 0 & c\theta \end{bmatrix} \quad (40)$$

であることから (14), (34) 式より

$$f = \begin{bmatrix} -x & y & -z \\ -\frac{y}{\alpha^2 - z^2} & \frac{x}{\alpha^2 - z^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(\alpha^2 - z^2)^{1/2}} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{c\varphi c\theta}{s\theta} & \frac{s\varphi c\theta}{s\theta} & -1 \\ s\varphi & -c\varphi & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & \beta \end{bmatrix}^{-1} f_F \quad (41)$$

という関係を得る。上式右辺の f_F の係数行列は、その各列ベクトルが Fig. 6 に示すような力のベクトルを意味し、これらはいずれも手先位置を一切移動させない方向の力である。そして f_F はそれらを単位として表したときの手先から拘束面に加わる力の大きさを表すものと解釈できる。

今たとえば、6自由度アーム ($n=6$) を用いて、拘束面に回転モーメントは一切加えず原点方向に \hat{f} の大きさの力を加えながら、点 (1, 0, 0) から速度 v で φ が増大する方向に球面をならう作業を遂行したいとする。すると目標軌道は

$$r_{Pd}(t) = \left[\frac{v}{\alpha} t, 0, 0 \right]^T \quad (42)$$

$$f_{Fd}(t) = [\hat{f}, 0, 0]^T \quad (43)$$

で与えられる。アームの初期状態 q_0, \dot{q}_0 が

$$s(c(q_0)) = r_{Pd}(0) = 0 \quad (44)$$

$$E_P J \dot{q}_0 = \dot{r}_{Pd}(0) = \left[\frac{v}{\alpha}, 0, 0 \right]^T \quad (45)$$

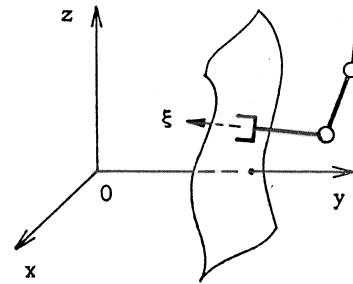


Fig. 7 Constrained motion to an arbitrary smooth surface

を満足していれば、この作業のための駆動入力 τ_C は、(22), (23) 式および

$$\tau_F = -J^T E_F^T [\hat{f}, 0, 0]^T \quad (46)$$

$$\ddot{q}_d = J^{-1} \left\{ E^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ -a_{rF} \end{bmatrix} - a_q \right\} \quad (47)$$

より算出すればよい。

4.2 任意曲面への拘束

Fig. 7 に示すように、手先が任意のなめらかな曲面上に、手先方向を曲面に垂直にした姿勢で拘束される場合を考えよう。曲面は

$$y - u(x, z) = 0 \quad (48)$$

で表されるものと仮定する。ここで $u(x, z)$ は3回微分可能な一価関数であるとする。 $-y$ 軸方向の単位法線ベクトルは

$$\xi = [\xi_x, \xi_y, \xi_z]^T = \gamma^{-1} \left[\frac{\partial u}{\partial x}, -1, \frac{\partial u}{\partial z} \right]^T \quad (49)$$

$$\gamma = \left[1 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (50)$$

で与えられる。 r を 4.1 と同様に定めると、 ξ が手先方向に一致すべきことから姿勢に対する拘束として

$$\phi = \text{atan2}(\xi_y, \xi_z) = \text{atan2} \left(-1, \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (51)$$

$$\begin{aligned} \theta &= \text{atan2}([\xi_x^2 + \xi_y^2]^{1/2}, \xi_z) \\ &= \text{atan2} \left(\left[1 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2}, \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (52)$$

を得る。ゆえに (48), (51), (52) が拘束超曲面を表す。そして

$$E_F = \begin{bmatrix} \gamma & 0 & 0 \\ 0 & \delta_1 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_5 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\frac{\partial u}{\partial x} & 1 & -\frac{\partial u}{\partial z} \\ -\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} & 0 & -\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} \\ \delta_2 & 0 & \delta_3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 & 0 & 0 \\ 0 & \delta_4 & 0 \end{bmatrix} \quad (53)$$

となる。ただし

$$\delta_1 = \left\{ \left[1 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right]^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (54)$$

$$\delta_2 = \left[1 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right] \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} - \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (55)$$

$$\delta_3 = \left[1 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right] \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} \quad (56)$$

$$\delta_4 = r^2 \left[1 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (57)$$

$$\delta_5 = (\delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2)^{1/2} \quad (58)$$

である。この場合 E_P を

$$E_P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (59)$$

と選べば

$$r_P = [x, z, \psi]^T \quad (60)$$

となる。以下 4.1 と同様の議論が成立する。

なお、手先が曲面上にありさえすればよいという場合には、(48) 式のみが有効となり、(53) 式右辺の第 2 行、第 3 行を除去すればよい。そして E_P を

$$E_P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (61)$$

と選べば

$$r_P = [x, z, \varphi, \theta, \psi] \quad (62)$$

となる。

5. 結 言

ロボットアームの動特性を考慮に入れた位置と力のハイブリッド制御方式として、動的ハイブリッド制御の考え方を提案し、そのための基礎的考察を行い、以下の結果を得た。

1) アームの手法に対する拘束を、手先位置を表す座標空間内の拘束超曲面で表現し、これより拘束座標系を定義した。

2) 動的ハイブリッド制御のための基本式を与えた。この基本式は手先の目標位置軌道ならびに目標力軌道が与えられたとき、これらを実現するための関節駆動力を算出するものである。

3) 6 自由度以上のアームでは、アームが特異状態にない限り、手先位置の目標値を達成するための駆動力と力目標値を達成するための駆動力を加え合わせたものを

関節駆動力とすることにより、位置と力が同時に制御できることが明確に示された。

4) サーボ補償器を備えた動的ハイブリッド制御系の 1 つの基本的な構成を示した。

参 考 文 献

- 1) H. Inoue, "Computer Controlled Bilateral Manipulator", Bull. of Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.14-69, pp.199-207, 1971
- 2) 高瀬, 井上, "環境より拘束を受ける系におけるロボットの腕の制御——位置制御とトルク制御の融合——", 電気学会全国大会講演論文集, pp.1632-1633, 1974
- 3) R. P. Paul and B. Shimano, "Compliance and Control", Joint Automatic Control Conference, pp.694-699, 1976
- 4) D. E. Whitney, "Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions", Trans. ASME, J. DSMC, Vol.99-2, pp.91-97, 1977
- 5) K. J. Salisbury, "Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates", 19th IEEE Conference on Decision and Control, pp.95-100, 1980
- 6) M. T. Mason, "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-11-6, pp.418-432, 1981
- 7) M. H. Raibert and J. J. Craig, "Hybrid Position/Force Control of Manipulators", Trans. ASME, J. DSMC, Vol.103-2, pp.126-133, 1981
- 8) 内山 勝, "人工の手の運動制御に関する研究(第2報, 数学モデルによる協調運動の制御)", 日本機械学会論文集(C編), 45 巻, 391 号, pp.323-335, 1985
- 9) R. P. Paul, "Robot Manipulators", MIT Press, Cambridge, Mass., 1981 (吉川訳, "ロボット・マニピュレータ", コロナ社, 1984)
- 10) 高瀬, "束縛運動の表現と束縛下にあるマニピュレータの動的制御", 計測自動制御学会論文集, 21 巻, 5 号, pp.86-91, 1985
- 11) 古田, 原, "サーボ技術と現代制御論", 計測と制御, 19 巻, 10 号, pp.33-41, 1980
- 12) 杉江, 吉川, "2 自由度制御系の基本構造とそのサーボ問題への応用", 第 14 回制御理論シンポジウム資料, 1985



吉川恒夫

(Tsuneo YOSHIKAWA)

昭和 16 年 12 月 19 日生れ。京都大学工学部精密工学科卒業, 昭和 44 年同大学大学院博士課程修了。同年, 同大学工学部助手。昭和 45 年, 同大学助教授(オートメーション研究施設)となり現在に至る。産業用ロボットの制御, 分散制御系, 線形システム理論などの研究に従事。日本自動制御協会, 計測自動制御学会, 日本機械学会, IEEE などの会員。(日本ロボット学会正会員)

Dynamic Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators

—Description of Hand Constraints and Calculation of Joint
Drive Force*

Tsuneo YOSHIKAWA**

ABSTRACT

For application of robot manipulators to complex tasks, it is often necessary to control not only the position of a manipulator but also the force exerted by the hand on an object. For this purpose, Raibert and Craig have proposed the hybrid position/force control method. In this paper, we propose dynamic hybrid control method which takes the manipulator dynamics into consideration. Constraints on the hand are described by a set of constraint hypersurfaces. Then the basic equations for dynamic hybrid control are derived. Finally, a basic structure of the dynamic hybrid control system with servo compensator is given.

Key words : Hybrid control, Manipulator, Force control, Hand constraint

* Received July 8, 1985

** Automation Research Laboratory, Kyoto University