ハイブリッド制御系の一構成法

正員 成 清 辰 生 (豊田工大)

正員 泉 照 之 (山口大)

An Architecture of Hybrid Position/Force Control

Tatsuo Narikiyo, Member (Toyota Technological Institute), Teruyuki Izumi, Member (Yamaguchi University)

Precise control of manipulators in contact with constrains in their environments is a prerequisite to feasible application of robot manipulators to complex handling and assembly problems in industry and space. An important step toward achieving such control is to control simultaneously position and force trajectory. Through recent advances in robotics technology many control design methodologies have been proposed for the control of robot manipulators. The hybrid technique is well known technique in these methodologies. In this technique coordinate system on the constrains plays an important role. But decision scheme of the coordinate system has not been proposed clearly.

This paper analyzes the hybrid technique based on the constrained control system and proposes a new conceptually simple approach to the hybrid technique. The new approach is able to control simultaneously manipulator impedance and position trajectories on the constrains. The coordinate system is appropriately selected and divided into two coordinate systems. These two coordinate systems represent two independent input spaces where the hybrid technique is realized.

Finally we also present the results of experiments that explore application of the hybrid technique to a control of a two degrees of freedom manipulator.

キーワード：ハイブリッド制御，インピーダンス制御，拘束条件，ロボットマニピュレータ

1. はじめに

ロボットマニピュレータによる作業は，大別して二つに分けることができる。一つは，ロボットハンドが自由空間上にある目標軌道に沿って滑らかに運動する作業である。例えば，組立て作業などが考えられる。これに対して，鋳物のばり取り作業やクランク回し，はめ合い作業などのように，作業対象物（環境）と常に接触しながら運動する作業がある。これは，コンプライアントマニピュレーションと呼ばれ，位置と力の制御が必要となる作業である。ロボットの制御技術の進歩に伴い，最近では，積極的に力と位置を同時に制御することが試みられている。その代表的な例として，インピーダンス制御^{(1)~(3)}やハイブリッド制御⁽⁴⁾⁽⁵⁾

と呼ばれる制御系構成法がある。インピーダンス制御は，力を制御する方向と位置を制御する方向が同一な場合に有効であると言われている。逆に，ハイブリッド制御は力と位置の制御の方向が直交するような場合に多く適用されている。現実には力制御が要求される作業では，力と位置の制御方向は直交する場合が多いと考えられる。しかし，これに対応すべき，ハイブリッド制御系の構成法には，まだ，あいまいな部分が残されている。文献(5)では，動的ハイブリッド制御の一般的な構成法が示されているが，拘束面上での作業座標の選び方が明確に示されていない。

本論文では，拘束条件付力学系の概念に基づくハイブリッド制御系の構成法を示す。この構成法では，ロボットハンドが拘束される拘束面の法線方向にインピ

一ダンス調節機能を持ち、その拘束面の接平面上で位置制御を実行できるように拘束面上での作業座標を選択できる。この座標系の選択法は拘束条件にのみ依存しており、実際の作業対象物とそれと独立な仮想拘束条件を用いることによって容易に拘束面上の局所座標系を導出できることを示す。また、この座標系は二つの座標系に分離でき、それぞれの座標系に対して独立に制御入力を加えることによって、ハイブリッド制御系の構成が可能になることを示す。

最後に、2自由度マニピュレータを用いた接触動作の制御実験を示し、本制御法の有効性を示す。

2. 作業座標の選択

多関節形マニピュレータの運動方程式は、一般に、次式で表される。

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = \tau_q \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $M(q) : n \times n$ 慣性行列、 $h(q, \dot{q}) : n$ ベクトル値関数、 $q = [q_1, \dots, q_n]^T$: 関節座標系、 $\tau_q = [\tau_{q1}, \dots, \tau_{qn}]^T$: 関節トルク

ロボットの自由度 n は、 $n \geq 6$ を満たすものとする。ロボットハンドの位置、方位を表す作業座標 $r = [r_1, \dots, r_6]^T$ は、 q の関数として $r = r(q)$ で表せるから、ロボットハンドが拘束される拘束面 $\phi(r) = 0$ は $\phi(q) = 0$ と書いて一般性を失わない。ただし、 $\phi = [\phi_1, \dots, \phi_m]^T$ で、 $m \leq 6$ である。ロボットハンドが拘束面上にあるときの運動方程式は、

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = \tau_q + (\partial\phi/\partial q)^T \lambda \quad \dots\dots\dots (2)$$

で表すことができる。

ただし、

$$\lambda = [\lambda_1, \dots, \lambda_m]^T$$

$$(\partial\phi/\partial q)^T = \begin{bmatrix} \partial\phi_1/\partial q_1 & \dots & \partial\phi_m/\partial q_1 \\ \partial\phi_1/\partial q_n & \dots & \partial\phi_m/\partial q_n \end{bmatrix}$$

λ : ラグランジュ乗数

である。

拘束面上でのハイブリッド制御、すなわち拘束面の法線方向の力制御、接空間上での位置制御を実行するためには、座標系 q は適切でない。そこで、拘束面上でのロボットの運動を記述するための新しい座標系を導入する。それを、 $\eta = [\eta_1, \dots, \eta_n]^T$ と書く。ここで、

$$\eta_{n-m+1} = \phi_1, \eta_{n-m+2} = \phi_2, \dots, \eta_n = \phi_m \quad \dots\dots\dots (3)$$

とする。 $\{\eta_1, \dots, \eta_{n-m}\}$ は拘束面に沿った座標である。これを図1に示す。

次に、 $\eta_1, \dots, \eta_{n-m}$ の選び方を考える。

$$P = I - M^{-1}(q)(\partial\phi/\partial q)^T D^{-1}(\partial\phi/\partial q)$$

とおく。ただし、

図1 拘束面と座標系

Fig. 1. Constrained surface and coordinate system.

$$D = (\partial\phi/\partial q)M^{-1}(q)(\partial\phi/\partial q)^T$$

$$\det D \neq 0 \text{ for } \forall q$$

このとき、

$$(i) \quad PM^{-1}(q)(\partial\phi/\partial q)^T = 0$$

$$(ii) \quad (\partial\phi/\partial q)P = 0$$

$$(iii) \quad \text{rank } P = n - m \text{ for } \forall q$$

が容易に示せる。(i) ~ (iii) より、 P は $R[M^{-1}(q)(\partial\phi/\partial q)^T]$ に沿った $\text{Ker}[\partial\phi/\partial q]$ への射影行列である。更に、このことから、 P の独立な $n-m$ 本の列ベクトルは、拘束面に対する接ベクトル空間を作り、また、 P の独立な $n-m$ 本の行ベクトルは $M^{-1}(q)(\partial\phi/\partial q)^T$ と直交していることがわかる。従って、求めるべき座標系 $\{\eta_1, \dots, \eta_{n-m}\}$ は、

$$d\eta_i = [\partial\eta_i/\partial q_1, \dots, \partial\eta_i/\partial q_n] \quad (i=1, \dots, n-m)$$

とすれば、

$$\text{Span}\{d\eta_1^T, \dots, d\eta_{n-m}^T\} = R[P] \quad \dots\dots\dots (4)$$

あるいは、

$$\begin{aligned} \langle d\eta_1, g_1 \rangle &= 0, & \langle d\eta_1, g_2 \rangle &= 0, & \dots, & \langle d\eta_1, g_m \rangle &= 0 \\ &: & &: & & &: \\ \langle d\eta_{n-m}, g_1 \rangle &= 0, & \langle d\eta_{n-m}, g_2 \rangle &= 0, & \dots, & \langle d\eta_{n-m}, g_m \rangle &= 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5)$$

を満足しなければならない。ただし、

$$\langle d\eta_i, g_j \rangle = (\partial\eta_i/\partial q_1)g_{j1} + \dots + (\partial\eta_i/\partial q_n)g_{jn},$$

$$[g_1, \dots, g_m] = M^{-1}(q)(\partial\phi/\partial q)^T, g_j = [g_{j1}, \dots, g_{jn}]^T$$

と記す。 $\text{Span}\{\cdot\}$ は、ベクトル $\{\cdot\}$ によって張られる空間を表し、 $R[\cdot]$ は行列 $[\cdot]$ の値域を表す。また、 $\text{Ker}[\cdot]$ は行列 $[\cdot]$ の零空間を示す。 $\{g_1, \dots, g_m\}$ は、互いに独立なベクトルの集合であるから、この独立なベクトルの集合 $\{g_1, \dots, g_m\}$ に対して、独立なベクトル $\{e_1, \dots, e_{n-m}\}$ を必ず見いだすことができる。なぜなら、独立な m 個の拘束条件 $\{\phi_1, \dots, \phi_m\}$ に対して互いに独立な $n-m$ 個の拘束条件 $\{\phi_{m+1}, \dots, \phi_n\}$ を任意に与えることができる。また、 $M^{-1}(q)$ の正定性も一般的に保障される。従って、

$$\begin{aligned} e_1 &= M^{-1}(q)(\partial\phi_{m+1}/\partial q)^T, \dots, e_{n-m} \\ &= M^{-1}(q)(\partial\phi_n/\partial q)^T \end{aligned}$$

とおけば(6)式を満たす独立なベクトル $\{e_1, \dots, e_{n-m}\}$ を得ることができる。

$$\text{rank}\{e_1, \dots, e_{n-m}, g_1, \dots, g_m\} = n \quad \text{for } \forall q \quad \dots\dots\dots (6)$$

また, e_i, g_i はすべて q について解析的であるとする。これらの条件の下で, Frobenius の定理⁽⁷⁾より(5)式によって与えられた拘束面上の座標系 $\{\eta_1, \dots, \eta_{n-m}\}$ を以下の手順で求めることができる。

[ステップ1] 微分方程式 $dq/ds_1 = e_1$ を
初期条件 $q(0)=0$ の下で解く。

[ステップ2] 同様に, $dq/ds_2 = e_2$ を
初期条件 $q(s_1, 0) = q(s_1)$ の下で解く。

⋮

[ステップ $n-m$] 同様に, $dq/ds_{n-m} = e_{n-m}$ を
初期条件 $q(s_1, \dots, s_{n-m-1}, 0) = q(s_1, \dots, s_{n-m-1})$
の下で解く。

[ステップ $n-m+1$] 微分方程式 $dq/dt_1 = g_1$ を
初期条件 $q(s_1, \dots, s_{n-m}, 0) = q(s_1, \dots, s_{n-m})$
の下で解く。

⋮

[ステップ $n-m+i$] 微分方程式 $dq/dt_i = g_i$ を
初期条件 $q(s_1, \dots, s_{n-m}, t_1, \dots, t_{i-1}, 0) =$
 $q(s_1, \dots, s_{n-m}, t_1, \dots, t_{i-1})$
の下で解く。

⋮

[ステップ n] 微分方程式 $dq/dt_m = g_m$ を
初期条件 $q(s_1, \dots, s_{n-m}, t_1, \dots, t_{m-1}, 0) =$
 $q(s_1, \dots, s_{n-m}, t_1, \dots, t_{m-1})$
の下で解く。

以上の手順より, 関節座標空間 $\{q_1, \dots, q_n\}$ とパラメータ空間 $\{s_1, \dots, t_m\}$ との間の射影関係が定義できた。すなわち,

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1(s_1, \dots, s_{n-m}, t_1, \dots, t_m) \\ \vdots \\ q_n(s_1, \dots, s_{n-m}, t_1, \dots, t_m) \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (7)$$

である。

(7)式において, (6)式の条件を用いれば, 行列

図 2 双曲放物面
Fig. 2. Hyperbolic parabola.

$T =$

$$\begin{bmatrix} \partial q_1/\partial s_1 \cdots \partial q_1/\partial s_{n-m} & \partial q_1/\partial t_1 \cdots \partial q_1/\partial t_m \\ \vdots & \vdots \\ \partial q_m/\partial s_1 \cdots \partial q_m/\partial s_{n-m} & \partial q_m/\partial t_1 \cdots \partial q_m/\partial t_m \end{bmatrix}$$

は, 常に $\text{rank } T = n$ が成り立つため, 逆関数定理によって原点近傍で, $s_1, \dots, s_{n-m}, t_1, \dots, t_m$ は関節座標系 q について解ける。このとき, $\eta_1 = s_1, \eta_2 = s_2, \dots, \eta_{n-m} = s_{n-m}$ とおけば

$$d\eta_i/dt_j = 0 \quad (i=1, \dots, n-m, \quad j=1, \dots, m)$$

となり, この $\eta_1, \dots, \eta_{n-m}$ が求める拘束面上の座標である。なぜなら,

$$\begin{aligned} \langle d\eta_i, g_j \rangle &= \langle d\eta_i, dq/dt_j \rangle \\ &= \partial\eta_i/\partial q_1 \cdot dq_1/dt_j + \dots \\ &\quad + \partial\eta_i/\partial q_n \cdot dq_n/dt_j \\ &= d\eta_i/dt_j = 0 \end{aligned} \quad (i=1, \dots, n-m, \quad j=1, \dots, m)$$

次に, 例題を用いて, 上記の手順を確認する。

[例題] 簡単のため, (1)式の $M(q)$ は単位行列とする。図2に拘束条件を示す。その方程式は

$$\phi_1 = q_3 - q_1^2/a^2 + q_2^2/b^2$$

である。これに対して独立な仮想拘束条件を

$$\phi_2 = q_1 - c_1, \quad \phi_3 = q_2 - c_2$$

とすれば,

$$g_1 = \begin{bmatrix} -2q_1^0/a^2 \\ 2q_2^0/b^2 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad e_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad e_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

を得る。 $q^0 = [q_1^0, q_2^0]^T$ は, 拘束条件上の局所座標系 η_1, η_2 を求めるための座標原点である。

先の手順より次のように座標系が求まる。

[ステップ1] $dq/ds_1 = e_1$ を初期条件 $q(0)=0$ の下で解けば $q = [s_1, 0, 0]^T$ を得る。

〔ステップ2〕 $dq/ds_2 = e_2$ を初期条件 $q(s_1, 0) = q(s_1)$ の下で解けば $q = [s_1, s_2, 0]^T$ を得る。

〔ステップ3〕 $dq/dt_1 = g_1$ を初期条件 $q(s_1, s_2, 0) = q(s_1, s_2)$ の下で解けば $q = [s_1 - 2q_1^0 t_1/a^2, s_2 + 2q_2^0 t_1/b^2, t_1]^T$ を得る。これより、 $t_1 = q_3, s_1 = q_1 + 2q_1^0 q_3/a^2, s_2 = q_2 - 2q_2^0 q_3/b^2$ を得る。従って、曲面上の座標系として

$$\eta_1 = s_1 = q_1 + 2q_1^0 q_3/a^2$$

$$\eta_2 = s_2 = q_2 - 2q_2^0 q_3/b^2$$

$$\eta_3 = \phi_1$$

を選べばよい。これは、明らかに、 $\langle d\eta_1, g_1 \rangle = 0$, $\langle d\eta_2, g_1 \rangle = 0$ を満足する。

3. 制御系の構成

前章で与えられる座標系 η は、 n 次元多様体 N 上で定義されるものであるため、それぞれ、

$$q^0 = [q_1^0, \dots, q_n^0]^T, q_1 = [q_1^1, \dots, q_n^1]^T, \dots,$$

$$q^i = [q_1^i, \dots, q_n^i]^T$$

の各座標原点上で局所的に与えられるものである。従って、局所座標 η は、 $\eta = \eta(q, q^i)$, $i=0, 1, \dots$ として、サンプリングごとに、座標系 η も更新されなければならない。しかし、 $\eta = \eta(q, q^i)$ において、 q^i にかんする構造は、 N 上では不変であるため、サンプリングごとに観測される q^i の値を用いて容易に η を定めることができる。

拘束面での座標系 $\{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n\}^T$ が与えられれば、これに対して、次のように制御系の構成が可能となる。まず、座標系 $\{\eta_1, \dots, \eta_n\}^T$ の時間に関する二階微分をとる。

$$\ddot{\eta} = [\partial\eta/\partial q] \ddot{q} + d/dt[\partial\eta/\partial q] \dot{q} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、

$$[\partial\eta/\partial q] = \begin{bmatrix} \partial\eta_1/\partial q_1 & \partial\eta_1/\partial q_2 \dots \\ \vdots & \vdots \\ \partial\eta_{n-m}/\partial q_1 & \partial\eta_{n-m}/\partial q_2 \dots \\ \partial\eta_{n-m+1}/\partial q_1 & \partial\eta_{n-m+1}/\partial q_2 \dots * \\ \vdots & \vdots \\ \partial\eta_n/\partial q_1 & \partial\eta_n/\partial q_2 \dots \\ \vdots & \vdots \\ \partial\eta_1/\partial q_n & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ * \partial\eta_{n-m}/\partial q_n & \vdots \\ \partial\eta_{n-m+1}/\partial q_n & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ \partial\eta_n/\partial q_n & \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial\eta_f/\partial q \\ \partial\eta_c/\partial q \end{bmatrix}$$

とする。ただし、

$$\eta_f = [\eta_1, \dots, \eta_{n-m}]^T, \quad \eta_c = [\eta_{n-m+1}, \dots, \eta_n]^T$$

とする。

(8)式を(2)式を用いて書きなおすと、

$$\ddot{\eta} = [\partial\eta/\partial q] \{M^{-1}(q)(-h(q, \dot{q}) + \tau_q + (\partial\phi/\partial q)^T \lambda)\} + d/dt[\partial\eta/\partial q] \dot{q} \quad \dots\dots\dots (9)$$

である。ここで、関節トルクを

$$\tau_q = (\partial\eta_f/\partial q)^T u_1 + (\partial\eta_c/\partial q)^T u_2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

とする。このとき、(9)式は、

$$\begin{aligned} \ddot{\eta}_f &= -(\partial\eta_f/\partial q) M^{-1}(q) h(q, \dot{q}) \\ &\quad + d/dt(\partial\eta_f/\partial q) \dot{q} \\ &\quad + (\partial\eta_f/\partial q) M^{-1}(q) (\partial\eta_f/\partial q)^T u_1 \\ \ddot{\eta}_c &= -(\partial\eta_c/\partial q) M^{-1}(q) h(q, \dot{q}) \\ &\quad + d/dt(\partial\eta_c/\partial q) \dot{q} \\ &\quad + (\partial\eta_c/\partial q) M^{-1}(q) (\partial\eta_c/\partial q)^T (u_2 + \lambda) \\ &\quad \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

となる。(11)式は、拘束面上の座標系で記述されたロボットの運動方程式である。これよりロボットの拘束運動は、二つの座標系 $\{\eta_f\}$ と $\{\eta_c\}$ に関する運動へと分離できることが示された。

座標系 $\{\eta_f\}, \{\eta_c\}$ の独立性と $M(q)$ の正則性から

$$\begin{aligned} \det[(\partial\eta_f/\partial q) M^{-1}(q) (\partial\eta_f/\partial q)^T] &\neq 0 \\ \det[(\partial\eta_c/\partial q) M^{-1}(q) (\partial\eta_c/\partial q)^T] &\neq 0 \end{aligned}$$

である。(11)式で、 λ はラグランジュ乗数と呼ばれ、物理的には接触面の法線方向に働く反力である。この値は $\phi = \dot{\phi} = \ddot{\phi} = 0$ であれば、解析的に求めることができる⁽⁶⁾。しかし、実際の接触作業では、 $\phi = \dot{\phi} = \ddot{\phi} = 0$ とはなり得ない。この場合、 $\lambda(t)$ の値は、力センサによって得られるものとする。従って、 u_2 を

$$\begin{aligned} u_2 &= [(\partial\eta_c/\partial q) M^{-1}(q) (\partial\eta_c/\partial q)^T]^{-1} \\ &\quad \times \{(\partial\eta_c/\partial q) M^{-1}(q) h(q, \dot{q}) \\ &\quad - d/dt(\partial\eta_c/\partial q) \dot{q} + \phi(\eta_c, \dot{\eta}_c, \Delta u)\} - \lambda \\ &\quad \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

とおけば、拘束面の法線方向には

$$\ddot{\eta}_c = \phi(\eta_c, \dot{\eta}_c, \Delta u) \quad \dots\dots\dots (13)$$

が成り立つ。

(13)式で、 Δu は希望反力であり、 $\phi(\eta_c, \dot{\eta}_c, \Delta u)$ によって、反力 Δu と拘束面座標 η_c に関するインピーダンスを任意に設定することができる。

しかし、入力 u_2 を

$$\begin{aligned} u_2 &= [(\partial\eta_c/\partial q) M^{-1}(q) (\partial\eta_c/\partial q)^T]^{-1} \\ &\quad \times \{(\partial\eta_c/\partial q) M^{-1}(q) h(q, \dot{q}) \\ &\quad - d/dt(\partial\eta_c/\partial q) \dot{q} + \phi(\eta_c, \dot{\eta}_c)\} \quad \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

とすれば

図 3 ハイブリッド制御系
Fig. 3. Hybrid control system.

$$\ddot{\eta}_c = \phi(\eta_c, \dot{\eta}_c) + (\partial \eta_c / \partial q) M^{-1}(q) (\partial \eta_c / \partial q)^T \lambda \quad (15)$$

となり、接触反力 $(\partial \eta_c / \partial q) M^{-1}(q) (\partial \eta_c / \partial q)^T \lambda$ の下でのインピーダンス制御が実行できる。接触反力の正確な検出は困難であることから、拘束面の法線方向には、このような制御系を構成するほうがより現実的である。

一方、 η_f に関しては u_1 を次式のように選べば、任意の位置制御が可能である。

$$u_1 = [(\partial \eta_f / \partial q) M^{-1}(q) (\partial \eta_f / \partial q)^T]^{-1} \times \{(\partial \eta_f / \partial q) M^{-1}(q) h(q, \dot{q}) - d/dt(\partial \eta_f / \partial q) \cdot \dot{q} + \psi(t)\} \quad (16)$$

(11)式より

$$\ddot{\eta}_f = \psi(t) \quad (17)$$

が成り立つ。

以上をまとめて、次の結果を得る。

(結果) 座標系 $\{\eta_1, \dots, \eta_n\}^T$ に対して

$$\eta_{n-m+1} = \phi_1, \dots, \eta_n = \phi_m \quad (\eta_c = \phi)$$

とする。 $\eta_f = \{\eta_1, \dots, \eta_{n-m}\}^T$ に関しては、前章で述べた手順に従い決定する。

関節トルク τ_q を

$$\tau_q = (\partial \eta_f / \partial q)^T u_1 + (\partial \eta_c / \partial q)^T u_2$$

と置き、 u_1, u_2 を (12), (16) 式のように置けば

$$\ddot{\eta}_f = \psi(t)$$

$$\ddot{\eta}_c = \phi(\eta_c, \dot{\eta}_c, \Delta u)$$

となり、位置と力の制御が実現できる。

図 3 にこの制御系の構成図を示す。

4. 実験結果

本論文で提案するハイブリッド制御系の構成法を立証するために、図 4 に示される実験システムで実験を行った。これは、2 自由度マニピュレータによる接触

図 4 2 自由度マニピュレータ
Fig. 4. Two degrees of freedom manipulator.

動作を表している。マニピュレータの先端には、プラスチック製の車輪が装着され、対象物面を滑らかに移動できる。更に、先端の車輪近くに、2 枚のひずみゲージを張り、接触時の反力情報を検出できるようになっている。マニピュレータの関節角 q_1, q_2 は、ポテンシオメータで検出され、それぞれ 100 W のプリントモータ (安川製)、小形直流モータ LN 22-00703 (CANON 製) で駆動される。このシステムの運動方程式は同定実験によって、次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} 0.035 & 0 \\ 0 & 0.109 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.122 \operatorname{sgn}(\dot{q}_1) \\ 0.0439 \operatorname{sgn}(\dot{q}_2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.3 \sin(q_1) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

ここで、 v_1, v_2 は各々のサーボモータへエネルギーを供給するパワーアンプ MODEL BPA-353 (メトロニクス製)、MODEL POW 35-5 (菊水製) に加えられる電圧信号である。慣性力とコリオリ、遠心力は、すべて外乱として無視した。

図 5 に示すように q_1 の回転中心を座標原点にとれば、マニピュレータの先端座標 (X, Y) は、次式で与えられる。

$$X = l_1 \sin(q_1) + l_2 \sin(q_1 + q_2)$$

$$Y = l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 + q_2)$$

ただし、 $l_1 = 13.5 \text{ cm}$ 、 $l_2 = 9 \text{ cm}$ である。

この (X, Y) 座標は、拘束条件

$$aX + bY - 1 = 0$$

を満足しなければならない。ここで、 $a = 10.2$ 、 $b = 9.5$ である。 $\phi_1 = aX(q) + bY(q) - 1$ として、第 2 章で示した手順に従って、拘束面上の座標系を定める。ここで、 ϕ_1 と独立な仮想拘束条件として、 $\phi_2 = -bX + aY - 1$ を選ぶ。第 2 章の手順より、 η_1, η_2 が次の

図 5 拘束運動
Fig. 5. Constrained manipulation.

ように求める。

$$\eta_1 = \{p_2(i)q_1 - p_1(i)q_2\}/D(i)$$

$$\eta_2 = \phi_1(q)$$

ただし、

$$p_1(i) = a\{l_1 \cos(q_1^i) + l_2 \cos(q_1^i + q_2^i)\}$$

$$- b\{l_1 \sin(q_1^i) + l_2 \sin(q_1^i + q_2^i)\}$$

$$p_2(i) = al_2 \cos(q_1^i + q_2^i) - bl_2 \sin(q_1^i + q_2^i)$$

$$D(i) = q_1^i p_2(i) - q_2^i p_1(i)$$

(結果)を用いて、制御入力 v を次のように与える。

$$v = K[(\partial \eta_1 / \partial q)^T u_1 + (\partial \eta_2 / \partial q)^T u_2] \dots \dots (19)$$

ただし、

$$K = \text{diag}(0.035, 0.109)$$

$$u_1 = [(\partial \eta_1 / \partial q)(\partial \eta_1 / \partial q)^T]^{-1} \{\xi(t)\}$$

$$u_2 = [(\partial \eta_2 / \partial q)(\partial \eta_2 / \partial q)^T]^{-1} \{a \eta_2\}$$

これらの演算は、スーパーミニコン DS 600/40 (東芝製)を用いて、サンプリング時間 16.2 ms で実現される。

図 5 に実験の様子を示す。このように、ある任意の初期位置より拘束面へと引き込まれ、拘束面上を約 10 cm 直線的に移動し、端点で拘束面から離れる。この間、制御入力は(19)式で与えられ、力制御モード、位置制御モードのモード切換えを行わずに位置と力の制御が達成される。図 6 はこのときのひずみゲージの出力を示す。(a)図はフィードバックゲイン $a = -10$ の場合で、(b)図は $a = -15$ の場合の接触トルクを示している。この図の縦の目盛 1 cm は、0.03 kg・cm のひずみ量を示し、横軸 1 cm は 10 s の時間推移を示す。この結果に示されるように、拘束面の法線方向に設定されたインピーダンスによって柔軟な接触作業が達成されている。(19)式で明らかなように、この制御系では力フィードバックを行っていない。それにもかかわらず、接触時において強い衝撃が加わることなく接触動作に入っている。 $\xi(t) = 0.5 \text{ cm/s}$ であるが、接触抵抗のため、その速度は必ずしも設定スピードに

図 6 実験結果
Fig. 6. Experimental result.

は一致していない。これに対しては、接空間方向へのフィードバックゲインを大きくすることによって、十分対応できると考えられる。また、接触トルクが直線的に増加しているが、これに対しても、力フィードバックを行うことによって、一定の接触トルクによる作業も可能である。これらの点については、今後更に実験的検討を加える必要がある。

5. 終りに

ハイブリッド制御系の構成法について述べた。本論文で述べた構成法は、拘束面の法線方向と接空間方向に座標系を分離する手法に基づいている。更に、法線方向に対しては、インピーダンスを調整できるような制御系になっている。そのため、制御モードの切換えが不必要であり、また力フィードバックを必要とせず滑らかな接触作業が実現できる制御系が構成できた。

今後、更に実験的検討を加えることによって、自由度の大きなロボットマニピュレータに対しても十分適用可能な制御系であることを実証することが重要である。その際、問題となるのが制御則そのもののもつ複雑さである。この問題は、制御系のロバスト性とも密接にかかわってくるものであり、今後、実装化にあたって更に検討を加えたい。(平成 2 年 3 月 26 日受付)

文 献

- (1) N. Hogan: Impedance Control: "An approach to manipulation, Part I ~ II". *Trans. ASME J. Dynamic Syst., Meas. Control*, **107**, 1 (1985)
- (2) H. Kazerooni, et al.: "Robust Compliant Motion for Manipulations. Part I, II". *IEEE J. Robotics & Automation*, **RA-2**, 83 (1986)
- (3) 窪・伊藤: 「コンプライアントマニピュレーションのためのロボット制御設計」, SICE 論文集, 26 (掲載予定)
- (4) M. H. Raibert & J. J. Craig: "Hybrid Position/Force Control of Manipulators". *Trans. ASME J. Dynamic Syst., Meas. Control*, **102**, 126 (1981)
- (5) 吉田: 「ロボットアームの位置と力の動的ハイブリッド制

- 御」, ロボット学誌, 3, 25 (昭60)
- (6) 成清・伊藤・細江: 「拘束条件付力学系の一解法」, SICE 論文集, 18, 55 (昭57)
- (7) 松島: 多様体入門 (昭51) 裳華房

成 清 辰 生 (正員)

昭和27年7月27日生。53年3月名古屋大学工学部応用物理学学科卒業。58年3月名古屋大学情報工学専攻博士課程単位取得中退。同年4月通産省工業技術院九州工業技術試験所入所。62年9月～63年9月アメリカ合衆国・オハイオ州立大学客員研究員。平成2年4月豊田工業大学助教授。ロボッ

トの制御技術に関する研究に従事。工学博士。計測自動制御学会会員。

泉 照 之 (正員)

昭和21年12月14日生。46年3月広島大学工学部電子工学科卒業。同年4月通産省工業技術院九州工業技術試験所に入所。平成元年4月山口大学工学部助教授。不規則信号の発生法や検出法, ロボットの視覚や力覚の信号処理に関する研究に従事。工学博士。日本ロボット学会, 計測自動制御学会, 情報処理学会, 日本音響学会会員。