ロボットマニピュレータのロバストな位置と力のハイブリッド制御†

成 清 辰 生*・Günther SCHMIDT**・芥 田 友 彦*

Robust Hybrid Position/Force Control for Robot Manipulators

Tatsuo NARIKIYO*, Günther SCHMIDT** and Tomohiko AKUTA*

This work presents a robust control methodology for hybrid position/force control. It develops a method for the design of controllers of constrained manipulators in the presence of model uncertainties. The control input of this methodology consists of a nonlinear and a linear part. The nonlinear control part gives a new coordinate system which can be defined for any constraints. By this coordinate system robot dynamics is decoupled and input spaces are divided into two orthogonal spaces of position and force control. Position control gives desired velocity of the end-effector through the constraints and force control gives desired reaction force on the constraints. The linear control part improves robustness properties of the proposed nonlinear hybrid control scheme. According to the nonlinear part the linear part is divided into two parts of position and force control. Model feedback control scheme is applied to the linear part of position control and integral control is used in the linear part of force control in order to suppress tracking errors due to model uncertainties. The robustness of the proposed hybrid control scheme is demonstrated through simulation of a constrained 2 degrees of freedom manipulator.

Key Words : robot manipulator, hybrid position/force control, robust control

1. はじめに

ロボット・マニピュレータによるバリ取り研磨作業や
はめあい作業などのように、力と位置を同時に制御する
必要のある作業は、今後、様々な分野でその重要性を増
してゆくものと考えられる^{1)~3)}。特に、研削・研磨加工や
放電改質加工などでは、加工むらを防ぐため一定の速度
および加工反力の下で、工具や電極を広範囲の曲面上で
制御しなければならない。このような作業を実現する制
御手法として、Raibert らによって提案された位置と力
のハイブリッド制御系が知られている⁴⁾。この設計法は
ロボットのダイナミクスを考慮していないため、静的な
設計法といえることができる。一方、吉川はロボットのダ
イナミクスを考慮し、Raibert のハイブリッド制御系設
計法を理論的に改善した⁵⁾。これらの設計法では、作業に

適した座標系を指定することが最も重要であり、かつ、
この座標系において、位置を制御する入力空間と力を制
御する入力空間を完全に非干渉化する必要がある。しか
し、従来の設計法は、動的な非干渉化を達成する座標系の
構成法を理論的に与えるものではなかった。このことは、
文献 6) においても、位置と力の制御空間の完全非干渉化
に対する疑問という形で提起されている。この疑問は、
従来のハイブリッド制御系では作業対象物の拘束面上で
のみ座標系が指定されていることに起因すると考えられ
る。これに対して、文献 7) では、ロボットの慣性行列と
拘束条件とによって決定される多様体上で座標系が指定
され、動的な非干渉化が達成されている。しかし、提案
された座標系や制御系の構成に対する理論的考察が行わ
れていない。さらに、ロボットパラメータの変動に伴う
制御系の特性変動などに対する議論も行われていない。

本論文では、文献 7) で提案されたハイブリッド制御系
設計法を解析し、ロバスト性を考慮した制御系設計法を
与える。ここで提案する制御系では、非線形ハイブリッ
ド制御則をマイナーループに用い、主制御ループに線形制
御則を用いている。主制御ループは位置制御ループと力
制御ループとに分離されており、おのおの異なる線形制

† 第 8 回日本ロボット学会学術講演会の一部発表(1990・11)

* 豊田工業大学 名古屋市天白区久方 2-12-1

* Toyota Technological Institute, Nagoya

** Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik,
Technische Universität München, München
(Received July 7, 1992)

(Revised November 24, 1992)

御則が用いられている。

本論文の構成はつぎのとおりである。第2章では、座標系の指定法を示す。第3章では、非線形ハイブリッド制御系の設計法を示し、ロバスト性を議論する。さらに、線形制御ループを付加することによって、ロバスト・ハイブリッド制御系を構成する。第4章では、数値例により、本論文で提案する制御法の有効性を示す。

2. 座標系の指定法

多関節ロボットの運動方程式は、次式で与えられる。

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

ここで、 $\tau(t)$ は $n \times 1$ 関節トルクベクトル、 $q, \dot{q}, \ddot{q}$ はおのおの $n \times 1$ 関節角度、角速度、角加速度ベクトルである。また、 $h(q, \dot{q})$ は $n \times 1$ ベクトル値関数であり、コリオリ力、重力などの非線形力や粘性摩擦などの線形力を表わす。 $M(q)$ は $n \times n$ 慣性行列である。

ロボットが障害物や作業対象物に接触した場合、運動方程式は次式で表わされる。

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

ここで、 $\phi(q)$ は $m \times 1$ ベクトル値関数、すなわち、

$$\phi(q) = [\phi_1, \dots, \phi_m]^T$$

と書け、拘束式を表わす。また、 λ は $m \times 1$ ベクトルであり、拘束式で表現される多様体の法線方向に働く拘束反力を表わす。通常、ロボットによる位置と力のハイブリッド制御に現れる拘束条件には、被加工物面(一部曲線)を表わす幾何学的な拘束と工具の姿勢を表わす姿勢拘束が考えられる。幾何学的拘束は、基準の直交座標系 $[X, Y, Z]^T$ を用いて、 $\phi_i(X, Y, Z) = 0$ と記述される。工具座標を $r(q) = [x(q), y(q), z(q), \theta_1(q), \theta_2(q), \theta_3(q)]^T$ とすれば、 $\phi_i(x(q), y(q), z(q)) = 0$ は工具が拘束面上に存在することを表わしている。一方、姿勢拘束は被加工物面に対して工具や電極の主軸を希望の姿勢に保持したい場合などに用いられる。 $\phi_i(r(q)) = 0$ は工具が希望の姿勢を保っている状態を表わしている。したがって、工具座標で表わされる拘束式の値は、関節座標 q のとる値によって変化する。このため、ハイブリッド制御では、工具座標で表わされた拘束式の値を零に保ったままで、希望の加工反力と軌道(速度)が実現されねばならない。

このように、ハイブリッド制御は拘束面上で実行されるため、関節座標系を用いて制御系を構成することはきわめて困難である。そこで、ハイブリッド制御に適した新しい座標系を導入する。今、その座標系を η として、つぎのように記述する。

$$\eta = [\eta_1, \dots, \eta_n]^T$$

この座標系 η において、後半の m 個の座標 $\{\eta_{n-m+1}, \dots, \eta_n\}$ は次式で与えられる。

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

すなわち、この m 個の座標は拘束式を工具座標で表現したものである。

座標系 η を完全に指定するには、残りの座標系 $\{\eta_1, \dots, \eta_{n-m}\}$ を定めなければならない。そこで、次式で定義する行列 H を用いて、座標 η_i ($i=1, \dots, n-m$) に要求される性質を求める。

$$H = I_n - M^{-1}(q) \left(\frac{\partial\phi}{\partial q} \right)^T D^{-1} \left(\frac{\partial\phi}{\partial q} \right) \quad (3)$$

ここで、

$$D = \left(\frac{\partial\phi}{\partial q} \right) M^{-1}(q) \left(\frac{\partial\phi}{\partial q} \right)^T, \det D \neq 0 \text{ for } \forall q$$

である。この H に対して以下の性質が成立する。

- (i) $HM^{-1}(q) \left(\frac{\partial\phi}{\partial q} \right)^T = 0$
- (ii) $\left(\frac{\partial\phi}{\partial q} \right) H = 0$
- (iii) $\text{rank } H = n-m \text{ for } \forall q$

これらの性質より、 H は $R[M^{-1}(q)(\partial\phi/\partial q)^T]$ に沿った R^n から $\text{Ker}(\partial\phi/\partial q)$ への射影行列であることがわかる。ただし、 $R(\cdot)$ は $(\cdot)$ の値域、また $\text{Ker}(\cdot)$ は $(\cdot)$ の零空間である。この H 行列の q を時間に対して止め、 $H(q^0)$ として、 H の互いに独立な $n-m$ 本の行ベクトルを選び、 $z = H_{n-m}(q^0)q$ と置けば、 z は近似的に q^0 近傍で拘束運動を表わす座標と考えることができる⁹⁾。しかし、この z は近似的な意味しかもたず、また、 H の独立な $n-m$ 本の行ベクトルを選びだすことも簡単ではない。したがって、ここでは、性質(i)に注目し、その微分形式が行列 $H(q)$ の性質を満足するように座標 η_i を定める。

まず、次式で新座標 η_i の微分形式を定義する。

$$d\eta_i = \frac{\partial\eta_i}{\partial q_1} dq_1 + \frac{\partial\eta_i}{\partial q_2} dq_2 + \dots + \frac{\partial\eta_i}{\partial q_n} dq_n$$

$$(i=1, \dots, n-m)$$

この微分形式は、つぎのように行列表現を用いて略記することができる。

$$d\eta_i = \left[\frac{\partial\eta_i}{\partial q_1}, \frac{\partial\eta_i}{\partial q_2}, \dots, \frac{\partial\eta_i}{\partial q_n} \right]$$

$$(i=1, \dots, n-m)$$

これらの $n-m$ 本の行ベクトルが行列 H の行ベクトルと等価な性質をもつためには、 $\{\eta_1, \dots, \eta_{n-m}\}$ の微分形式は以下の微分方程式を満足しなければならない。

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

ここで、

$$\begin{aligned} [g_1, \dots, g_m] &= M^{-1}(q) \left(\frac{\partial\phi}{\partial q} \right)^T \\ g_j &= [g_{j1}, \dots, g_{jn}]^T \end{aligned}$$

$$\langle d\eta_i, g_j \rangle = \frac{\partial \eta_i}{\partial q_1} g_{j1} + \frac{\partial \eta_i}{\partial q_2} g_{j2} + \cdots + \frac{\partial \eta_i}{\partial q_n} g_{jn}$$

である。

微分方程式(5)は通常の偏微分方程式の解法を用いて容易に解くことができる。以下に、その手順を示す。

[1st Step] 次のランク条件を満足する互いに独立な $n-m$ 本のベクトル $e_1, \dots, e_{n-m}$ を求める。

$$\text{rank}[e_1, \dots, e_{n-m}, g_1, \dots, g_m] = n \text{ for } \forall q$$

これらのベクトルは容易に求めることができる。たとえば、 $e_1 = M^{-1}(q)(\partial \phi_{m+1}/\partial q)^T, \dots, e_{n-m} = M^{-1}(q)(\partial \phi_n/\partial q)^T$ と置けば良い。

ただし、 $\phi_{m+1}, \dots, \phi_n$ は、以下のランク条件を満たす互いに独立な仮想拘束条件である。

$$\text{rank}[\partial \phi_1/\partial q, \dots, \partial \phi_m/\partial q, \partial \phi_{m+1}/\partial q, \dots, \partial \phi_n/\partial q] = n \text{ for } \forall q$$

[2nd Step] 微分方程式 $dq/ds_1 = e_1$ を以下の初期条件の下で解く。 $q(0) = 0$ 。

[3rd Step] 微分方程式 $dq/ds_2 = e_2$ を以下の初期条件の下で解く。 $q(s_1, 0) = q(s_1)$ 。

⋮

[($n-m+1$)th Step] 微分方程式 $dq/ds_{n-m} = e_{n-m}$ を以下の初期条件の下で解く。

$$q(s_1, \dots, s_{n-m-1}, 0) = q(s_1, \dots, s_{n-m-1})$$

[($n-m+2$)th Step] 微分方程式 $dq/dt_1 = g_1$ を以下の初期条件の下で解く。

$$q(s_1, \dots, s_{n-m}, 0) = q(s_1, \dots, s_{n-m})$$

⋮

[($n+1$)th Step] 微分方程式 $dq/dt_m = g_m$ を以下の初期条件の下で解く。

$$\begin{aligned} q(s_1, \dots, s_{n-m}, t_1, \dots, t_{m-1}, 0) \\ = q(s_1, \dots, s_{n-m}, t_1, \dots, t_{m-1}) \end{aligned}$$

この手順は R^n から R^n への写像を与える。すなわち $(s_1, \dots, s_{n-m}, t_1, \dots, t_m) \rightarrow (q_1(s_1, \dots, t_m), \dots, q_n(s_1, \dots, t_m))$

この写像のヤコビ行列は次式で与えられる。

$$T = \begin{bmatrix} \partial q_1/\partial s_1 & \cdots & \partial q_1/\partial t_m \\ \vdots & & \vdots \\ \partial q_n/\partial s_1 & \cdots & \partial q_n/\partial t_m \end{bmatrix}$$

原点 q^0 では、 $T = [e_1, \dots, e_{n-m}, g_1, \dots, g_m]$ である。したがって、 T は R^n の原点 q^0 の開近傍において、正則で、その写像は可微分同相写像である。逆関数定理により、原点 q^0 近傍で $q_1, \dots, q_n$ の関数として $s_1, \dots, s_{n-m}, t_1, \dots, t_m$ を求めることができる。ここで、 $\eta_1 = s_1, \eta_2 = s_2, \dots, \eta_{n-m} = s_{n-m}$ と置けば、座標系 $\{\eta_1, \dots, \eta_{n-m}\}$ は偏微分方程式(5)を満足する。なぜなら、 $g_j = dq/dt_j, ds_i/dt_j = 0$ より、(5)式の微分形式とベクトル場の内積は

$$\begin{aligned} \langle d\eta_i, g_j \rangle &= \frac{\partial \eta_i}{\partial q_1} \frac{dq_1}{dt_j} + \frac{\partial \eta_i}{\partial q_2} \frac{dq_2}{dt_j} + \cdots \\ &+ \frac{\partial \eta_i}{\partial q_n} \frac{dq_n}{dt_j} = \frac{d\eta_i}{dt_j} = 0 \end{aligned}$$

と書ける。

□

これらの新しい座標系は、 $M^{-1}(q)(\partial \phi/\partial q)^T$ で記述されるベクトル場をもつ多様体上で定義される局所座標系であり、ヤコビ行列 T が原点 q^0 で正則であれば必ず存在する。Fig. 1 に、座標系 $[\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{n-m}]$ の微分形式と $M^{-1}(q)(\partial \phi/\partial q)^T$ で記述されるベクトル場との関係を示す。

新座標の幾何学的意味を示すためにつぎの例題を考える。

[例題] 簡単のため、 $M(q) = I_2$ とする。Fig. 2 に拘束条件を示す。拘束条件は次式で表わされる。

$$\phi_1 = q_1^2 + q_2^2 - a^2$$

[1st Step] 仮想拘束条件を $\phi_2 = q_1$ とすれば、

$$e_1 = [1, 0]^T, g_1 = [2q_1, 2q_2]^T \text{ を得る。}$$

[2nd Step] 微分方程式 $dq/ds_1 = e_1$ を初期条件

$$q(0) = 0 \text{ の下で解けば } q = [s_1, 0]^T \text{ を得る。}$$

[3rd Step] 微分方程式 $dq/dt_1 = e_2$ を初期条件

$$q(s_1, 0) = q(s_1) \text{ の下で解けば}$$

$$q = [s_1 + 2q_1^0 t_1, 2q_2^0 t_1]^T \text{ を得る。}$$

Fig. 1 Coordinate system

Fig. 2 Constraint & coordinate

以上の手順から、 $(q_1, q_2) \rightarrow (s_1, t_1)$ への写像が求まった。 $q_2^0 \neq 0$ であるから、原点 (q_1^0, q_2^0) の近傍で局所座標 $\{\eta_1, \eta_2\}$ がつぎのように求まる。

$$\eta_1 = s_1 = q_1 - (q_1^0/q_2^0)q_2$$

$$\eta_2 = \phi_1 = q_1^2 + q_2^2 - a^2$$

Fig. 2 に示すように、 $\eta_2 > 0$ は円の外部、 $\eta_2 < 0$ は円の内部を示すことから、 η_2 は法線方向の座標である。これに対して、 η_1 は図的表現が難しい。ただし、 η_1 の微分形式 $d\eta_1$ は図に示すような q^0 における拘束条件への接ベクトルとなる。したがって、 $\dot{\eta}_1$ は拘束運動の速度に対応する物理量を表現する座標であることがわかる。

3. ハイブリッド制御系の構成

3.1 非線形ハイブリッド制御系

座標系 $\{\eta\}$ は R^n 上で定義される q^0 近傍の局所座標である。この座標 η を時間 t に関して 2 回微分すれば、次式を得る。

$$\ddot{\eta} = \left(\frac{\partial \eta}{\partial q} \right) \ddot{q} + \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \eta}{\partial q} \right) \dot{q} \quad (6)$$

ここで、

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \eta}{\partial q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \eta_1}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial \eta_1}{\partial q_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial \eta_{n-m}}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial \eta_{n-m}}{\partial q_n} \\ \hline \frac{\partial \eta_{n-m+1}}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial \eta_{n-m+1}}{\partial q_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial \eta_n}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial \eta_n}{\partial q_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \eta_f}{\partial q} \\ \frac{\partial \eta_c}{\partial q} \end{bmatrix}$$

である。ただし、 $\eta_f = [\eta_1, \dots, \eta_{n-m}]^T$ は位置制御変数、 $\eta_c = [\eta_{n-m+1}, \dots, \eta_n]^T$ は力制御のための制御変数である。

(2) 式を (6) 式に代入すれば、

$$\ddot{\eta} = \left(\frac{\partial \eta}{\partial q} \right) \left[M^{-1}(q) \left(-h(q, \dot{q}) + \tau + \left(\frac{\partial \phi}{\partial q} \right)^T \lambda \right) \right] + \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \eta}{\partial q} \right) \dot{q} \quad (7)$$

を得る。ここで、新座標 η はつぎの関係を満たす。これらの関係は、座標系の導出過程より自然に導かれる。特に、非干渉化された位置と力の制御空間は、(i) 式によって関係付けられている。

$$(i) \quad \left(\frac{\partial \eta_f}{\partial q} \right) M^{-1}(q) \left(\frac{\partial \eta_c}{\partial q} \right)^T = 0$$

$$(ii) \quad \left[\left(\frac{\partial \eta_f}{\partial q} \right) M^{-1}(q) \left(\frac{\partial \eta_f}{\partial q} \right)^T \right] \neq 0$$

$$(iii) \quad \left[\left(\frac{\partial \eta_c}{\partial q} \right) M^{-1}(q) \left(\frac{\partial \eta_c}{\partial q} \right)^T \right] \neq 0$$

これらの関係を用いれば、次式で与えられる制御入力によって、力と位置のハイブリッド制御が達成できる。

$$\begin{aligned} \tau &= \left(\frac{\partial \eta_f}{\partial q} \right)^T u_1 + \left(\frac{\partial \eta_c}{\partial q} \right)^T u_2 \\ u_1 &= \left[\left(\frac{\partial \eta_f}{\partial q} \right) M^{-1}(q) \left(\frac{\partial \eta_f}{\partial q} \right)^T \right]^{-1} \left\{ \left(\frac{\partial \eta_f}{\partial q} \right) \cdot M^{-1}(q) h(q, \dot{q}) - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \eta_f}{\partial q} \right) \dot{q} + \Psi(\eta_f, \dot{\eta}_f) + \nu_f \right\} \\ u_2 &= \left[\left(\frac{\partial \eta_c}{\partial q} \right) M^{-1}(q) \left(\frac{\partial \eta_c}{\partial q} \right)^T \right]^{-1} \left\{ \left(\frac{\partial \eta_c}{\partial q} \right) \cdot M^{-1}(q) h(q, \dot{q}) - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \eta_c}{\partial q} \right) \dot{q} + \Phi(\eta_c, \dot{\eta}_c) \right\} \\ &\quad - F(t) \end{aligned} \quad (8)$$

ただし、 $\Psi(\eta_f, \dot{\eta}_f) = -K_1 \dot{\eta}_f - K_2 \eta_f$ であり、 K_1, K_2 は任意に指定できる正定行列、 ν_f は希望の位置軌道、また、 $\Phi(\eta_c, \dot{\eta}_c) = -L_1 \dot{\eta}_c - L_2 \eta_c$ であり、 L_1, L_2 は任意に指定できる正定行列である。

性質 (i), (ii), (iii) を考慮して、(8) 式で与えられる制御入力を (7) 式に代入すれば、簡単な計算で次式を得る。

$$\begin{aligned} \ddot{\eta}_f &= \Psi(\eta_f, \dot{\eta}_f) + \nu_f \\ \ddot{\eta}_c &= \Phi(\eta_c, \dot{\eta}_c) \quad (\phi \neq 0) \\ \lambda &= F(t) \quad (\phi = 0) \end{aligned} \quad (9)$$

Fig. 3 に、この制御系の構成図を示す。この制御系の特徴は、位置制御空間と力制御空間の動的な非干渉化を達成し、力フィードバックを用いていない点にある。これを実行する座標系は局所座標系であるが、それは座標原点 q^0 の関数として大域的に求められているため、各サンプリング時点での値を代入するだけで与えられる。このため、実質的には大域的な座標系と考えて制御系の構成が可能である。

Fig. 3 Nonlinear hybrid position/force control scheme

3.2 ロバスト性を考慮したハイブリッド制御系

一般に、多関節マニピュレータの運動方程式を正確に同定することはきわめて困難である。それゆえ、制御系の設計に用いられるモデルが実際の制御対象とかなり異なる場合も考えられる。また、これとは別に、意図的にモデル式を実システムの物理式と異なる形に与える場合がある。これは、物理式をそのまま制御系の設計に用いた場合、計算負荷があまりに大きくなることや、制御系の設計そのものが難しくなるためである。このため、モデルの低次元化や線形化が行われる。いずれの場合も、モデル化誤差に伴うパラメータ変動や外乱に対する制御系のロバスト性を考慮に入れる必要がある。

本節では、モデル化誤差や外乱が存在する場合に対してロバストなハイブリッド動作を実現する制御系を提案する。(8)式で表わされる力制御アルゴリズムには力情報のフィードバックが用いられていない。このことは、制御系の構造を簡単にする利点があるが、力応答が外乱などの影響を受け、大きな偏差や不安定応答を生じやすい欠点がある。このため、希望の力軌道 $F(t)$ を力フィードバックを用いた次式に置き換える。

$$F(t) = -\alpha \int \lambda(t) dt + \beta t \quad (10)$$

これにより、力制御ループの閉ループ系は

$$\dot{\lambda}(t) = -\alpha \lambda(t) + \beta$$

で表わされる。ここで、 α は正定行列であり、希望の力軌道は $\alpha^{-1}\beta$ で与えられる。これに対して、希望の力軌道が任意の時間関数で与えられる場合には、つぎに述べる位置制御ループに用いられるモデルフィードバック制御系などのロバスト制御系を新たに付加する必要がある。しかし、ここでは、実用上最も重要な一定加工反力の下でのロバストなハイブリッド制御に限定して議論を進める。

一方、位置制御ループでは、 $q, \dot{q}$ から生成される η_f と $\dot{\eta}_f$ のフィードバックが用いられ、(9)式の閉ループ系が得られる。しかし、2章の例題に示したように、位置制御ループの制御変数 η_f に物理的意味を与えることはきわめて困難である。物理量として意味があるのは、2章で定義されたベクトル場 g_i ($i=1, \dots, m$) に直交する $\dot{\eta}_f$ のみである。 $\dot{\eta}_f$ は運動量の次元をもつ物理量であるが、拘束面上の軌道速度と 1 対 1 の関係にあるので、互いに変換が可能である。したがって、ここでは、拘束面上の軌道に沿って $\dot{\eta}_f$ を一定値に保持する制御系を構成する。

閉ループ系は速度制御系となり、 $K_2=0$ と置けば、

$$\ddot{\eta}_f = -K_1 \dot{\eta}_f + \nu_f$$

と書き換えられ、目標値は $V_0 = K_1^{-1}\nu_f$ で与えられる。こ

こで、制御対象の非線形項にモデル化誤差

$$h(q, \dot{q}) \rightarrow h(q, \dot{q}) + \Delta h(q, \dot{q})$$

が生じた場合を考える。このとき、閉ループ系は次式で記述できる。

$$\ddot{\eta}_f = -K_1 \dot{\eta}_f + \nu_f + d_f(q, \dot{q})$$

$d_f(q, \dot{q})$ はモデル化誤差に起因する外乱ベクトルである。このような場合、一般にゲイン K_1 を大きくすれば、比較的外乱などの影響を小さく抑えることができる。しかし、有限の K_1 では必ず偏差が生じ、また、 $K_1 \rightarrow \infty$ に対して $\|d_f(q, \dot{q})\| \rightarrow \infty$ となる可能性も存在する。したがって、モデル化誤差が存在する場合、外乱やパラメータ変動の影響を考慮して、設計パラメータ K_1, ν_f の値を調整しなければならない。

本稿では、希望の閉ループ系を

$$\dot{\eta}_f = V_0 \quad (\Leftrightarrow G_0(s) = I_{n-m}/s)$$

として、Fig. 4 に示すモデルフィードバック系を用いた⁹⁾。すなわち、モデル化誤差や外乱によって閉ループ伝達関数が $G(s)$ に変動し、外乱や観測ノイズの下で、 $K_1^{-1}\nu_f$ を調整し、希望の制御特性を達成することを考える。一般に、 V_0 が任意の時間関数の場合、新たに補償器 $G_c(s)$ を用いて η_f からのフィードバックループを構成すれば、定常偏差をより小さく補償できる。しかし、4章の数値例に示すように、 V_0 が定数の場合、Fig. 4 の簡単なモデルフィードバック制御系で十分な追従特性を得ることができる。 $f(s)$ は $V_0(s)$ から $K_1^{-1}\nu_f(s)$ までのループゲインを調整するフィルタである。ここでは、次式で与える。

$$f(s) = \text{diag}[f_1(s), \dots, f_{n-m}(s)]$$

この系で、 $V_0(s), d_f(s)$ から η_f までの伝達関数は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \eta_f(s) = & [I_{n-m} + G(s)(I_{n-m} - f(s))^{-1} \\ & \times G_0^{-1}(s)]^{-1} G(s)(I_{n-m} - f(s))^{-1} V_0(s) \\ & + [I_{n-m} + G(s)(I_{n-m} - f(s))^{-1} \\ & \times G_0^{-1}(s)]^{-1} G(s) d_f(s) \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 $[I_{n-m} - f(s)] = k(s)I_{n-m}$ 、すなわち、

$$f(s) = \text{diag}[1 - k(s), \dots, 1 - k(s)]$$

Fig. 4 Model feedback control system

Fig. 5 Robust hybrid position/force control scheme

と置けば、(11)式はつぎのように書き換えられる。

$$\begin{aligned} \eta_f(s) = & [k(s)I_{n-m} + G(s)G_0^{-1}(s)]^{-1}G(s)V_0(s) \\ & + k(s)[k(s)I_{n-m} + G(s)G_0^{-1}(s)]^{-1} \\ & \times G(s)d_f(s) \end{aligned} \quad (12)$$

閉ループ系の安定性は $f(s)$ の選択によって達成できる⁹⁾。もし、 $f(s)$ が I_{n-m} 、すなわち $k(s)=0$ と選ばれるならば、(12)式は次式となる。

$$\eta_f(s) = G_0(s)V_0(s)$$

これは、 $f(s)$ が I_{n-m} と選ばれるならば、完全な外乱除去が達成できることを示している。しかし、この場合、観測ノイズ n_f から出力 η_f までの伝達関数が -1 となり、外乱除去特性と観測ノイズの影響の間にトレード・オフが存在する。このトレード・オフをいかに調整するかは $d_f(s)$ や $n_f(s)$ などの周波数特性に依存している。一般には、低周波数域で外乱除去特性を強調し、高周波数域でノイズ特性を強調する。しかし、モデル化誤差に起因する外乱などの周波数特性を同定することは、ほとんど不可能である。そのため、事前のシミュレーションがきわめて重要な役割を果たす。

位置制御ループにモデルフィードバック系を用い、力制御ループに積分補償器を用いたロバスト・ハイブリッド制御系の概念図を Fig. 5 に示す。

4. 数 値 例

Fig. 6 に 2 自由度ロボットと拘束面を示す。このロボットと拘束条件によるハイブリッド制御を実行する。ロボットの i 番目のリンクの質量、質量中心回りの慣性モーメント、長さをおのおの m_i, I_i, l_i とする。また、 r_i は $(i-1)$ 番目のジョイントから i 番目のリンクの質量中心までの距離を表わす。 k_i は $(i-1)$ 番目のジョイントの線形摩擦係数である。これらのパラメータを用いて、ロボットの運動方程式は次式で記述される。

$$M(q)\ddot{q} + h_{NL}(q, \dot{q}) + h_L(\dot{q}) = \tau + (\partial\phi/\partial q)^T \lambda \quad (13)$$

ここで、 $M(q) = [M_{ij}(q)]$ 、 $h_{NL}(q, \dot{q}) = [h_{NL1}, h_{NL2}]^T$ 、

Fig. 6 Schematic model of 2 degrees of freedom robot

$$h_L(\dot{q}) = [h_{L1}, h_{L2}]^T,$$

$$M_{11}(q) = I_1 + I_2 + m_1 r_1^2 + m_2 l_2^2 + 2m_2 l_1 r_2 \cos(q_2)$$

$$M_{12}(q) = I_2 + m_2 r_2^2 + m_2 l_1 r_2 \cos(q_2)$$

$$M_{21}(q) = M_{12}(q)$$

$$M_{22}(q) = I_2 + m_2 r_2^2$$

$$\begin{aligned} h_{NL1}(q, \dot{q}) = & -2m_2 l_1 r_2 \sin(q_2) \dot{q}_1 \dot{q}_2 \\ & - m_2 l_1 r_2 \sin(q_2) \dot{q}_2^2 \end{aligned}$$

$$h_{NL2}(q, \dot{q}) = m_2 l_1 r_2 \sin(q_2) \dot{q}_1^2$$

$$h_{L1}(\dot{q}) = k_1 \dot{q}_1, \quad h_{L2}(\dot{q}) = k_2 \dot{q}_2$$

拘束条件の方程式は次式で表わされる。

$$\phi_1 = A \sin(x) + y^0 - y$$

仮想拘束条件を $\phi_2 = x - C$ とすれば、2章に示された手順によって新座標 η_f, η_c がつぎのように求まる。

$$\eta_f = -p_1(q^0)q_1 + p_2(q^0)q_2$$

$$\eta_c = A \sin(X(q)) + y^0 - Y(q) \quad (14)$$

ここで、

$$\begin{aligned} p_1(q^0) = & \left[M_{21}^{-1}(q^0) \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial q_1} \right)_0 \right. \\ & \left. + M_{22}^{-1}(q^0) \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial q_2} \right)_0 \right] / D(q^0) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_2(q^0) = & \left[M_{11}^{-1}(q^0) \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial q_1} \right)_0 \right. \\ & \left. + M_{12}^{-1}(q^0) \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial q_2} \right)_0 \right] / D(q^0) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D(q^0) = & \left[M_{11}^{-1}(q^0) \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial q_1} \right)_0 \right. \\ & \left. + M_{12}^{-1}(q^0) \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial q_2} \right)_0 \right] \\ & \times \left[M_{21}^{-1}(q^0) \left(\frac{\partial \phi_2}{\partial q_1} \right)_0 \right. \\ & \left. + M_{22}^{-1}(q^0) \left(\frac{\partial \phi_2}{\partial q_2} \right)_0 \right] \\ & - \left[M_{21}^{-1}(q^0) \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial q_1} \right)_0 + M_{22}^{-1}(q^0) \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial q_2} \right)_0 \right] \end{aligned}$$

Table 1 Parameters used for simulation

No.	Feedback gain	Robust control	Modelling error	Robot parameters & constraint	Fixed gain
Fig. 7 ($V_0=3$)	$K_1=50$ $\nu_f=150$			$m_1=2(\text{kg})$ $m_2=1(\text{kg})$ $I_1=0.15(\text{kgm}^2)$ $I_2=0.1(\text{kgm}^2)$ $l_1=1(\text{m})$ $l_2=0.8(\text{m})$ $r_1=0.5(\text{m})$ $r_2=0.4(\text{m})$ $k_1=100(\text{Nms})$ $k_2=100(\text{Nms})$ $A=0.3(\text{m})$ $y^0=1.2(\text{m})$	$L_1=600$ $L_2=50$ $v_k=0$ $K_2=0$
Fig. 8(a) ($V_0=3$)	$K_1=50$ $\nu_f=150$		$h_{NL}(q, \dot{q})$		
Fig. 8(b) ($V_0=3$)	$K_1=50$ $\nu_f=150$	$T=100$ $\alpha=150$ $\beta=750$	$h_{NL}(q, \dot{q})$		
Fig. 9(a) ($V_0=1$)	$K_1=50$ $\nu_f=50$		$h_{NL}(q, \dot{q})$		
Fig. 9(b) ($V_0=1$)	$K_1=50$ $\nu_f=50$	$T=100$ $\alpha=150$ $\beta=750$	$h_{NL}(q, \dot{q})$		

$$\times \left[M_{11}^{-1}(q^0) \left(\frac{\partial \phi_2}{\partial q_1} \right)_0 + M_{12}^{-1}(q^0) \left(\frac{\partial \phi_2}{\partial q_2} \right)_0 \right]$$

$$q^0 = [q_1^0, q_2^0]^T, \quad M_{11}^{-1}(q^0) = [M^{-1}(q^0)]$$

$$\phi_2 = X(q) - C \quad (C : \text{constant})$$

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

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

制御目標は、ロボットの手先効果器を拘束面に一定の力で押しつけながら、拘束面に沿って一定の $\dot{q}_f$ で移動させることである。この制御目標を達成するため、(8)式で表わされる制御アルゴリズムの設計パラメータ K_2 を 0 とし、 $\dot{q}_f$ の目標値は $K_1^{-1}\nu_f$ で指定する。また、このシミュレーションにおいては、 $L_1=600$, $L_2=50$ に固定されている。そのほか、シミュレーションで用いたパラメータを Table 1 に示す。

Fig. 7 にモデル化誤差がない場合の力軌道と拘束面上の $\dot{q}_f$ の応答を示す。希望の押しつけ力は 5(N), $\dot{q}_f$ の応答を示す。希望の押しつけ力は 5(N), $\dot{q}_f$ の目標値は 3(kgm/s) である。ロボットの手先は、初期状態には、拘束面から離れた位置にあり、引き込み制御で速やかに拘束面上へ到達する。到達後は一定の押しつけ力を達成し、希望の $\dot{q}_f$ で拘束面上を移動する。

Fig. 8(a), (b) にモデル化誤差が存在する場合の応答を示す。目標値の指定は、Fig. 7 の場合と同じである。制御則の計算に用いられるモデル式は、

$$M(q)\ddot{q} + h_L(\dot{q}) = \tau + (\partial\phi/\partial q)^T \lambda \quad (15)$$

で与えられる。ここでのモデル化誤差は非線形力ベクトル $h_{NL}(q, \dot{q})$ である。すなわち、(13)式のロボットの運動方程式から、 $h_{NL}(q, \dot{q})$ が完全に無視されている。(a)には、線形ロバスト制御則を用いない場合の制御応答が示されている。すなわち、(15)式を用いて制御入力 τ が(8)式によって求まり、この τ によって(13)式で表わされる制御対象が駆動される。この結果、モデル化誤差の影響で、特に力フィードバックを用いない力制御応答に

Fig. 7 Simulation result under no existence of uncertain dynamics for the case of $V_0=3(\text{kgm/s})$

(a) Simulation result without robust control under existence of uncertain dynamics for the case of $V_0=3(\text{kgm/s})$

(b) Simulation result with robust control under existence of uncertain dynamics for the case of $V_0=3(\text{kgm/s})$

Fig. 8

著しい乱れが生じた。 $\dot{q}_f$ の応答も、Fig. 7の場合に比して著しい劣化が見られる。(b)では、線形のロバスト制御則を用いた場合の制御応答が示されている。力制御ループでは、設計パラメータとして、 $\alpha=150$, $\beta=750$ を用いた。位置制御ループでは、モデルフィードバックを用いて、 $K_1^{-1}\nu_f$ の値を調整した。ここでは、 $f(s)=T/(s+T)$ とし、 $T=100$ を与えた。 $K_1^{-1}\nu_f$ は次式で調整される。

$$K_1^{-1}\nu_f = V_0 - \dot{q}_f + T \int (V_0 - \dot{q}_f) dt \quad (16)$$

ただし、 V_0 は拘束面(線)に沿った $\dot{q}_f$ の目標値を表わし、 $V_0=3(\text{kgm/s})$ に指定されている。図に示すように、力応答に著しい改善が見られた。力制御ループと位置制御ループ間の設計パラメータの調節で多様な応答パターンが得られるため、位置制御ループの応答の改善を力応答に優先させることも可能である。一般に、フィルタ $f(s)$ の設計パラメータ T を大きくすれば位置制御ループの応答を改善することができる。しかし、 V_0 が $3(\text{kgm/s})$ と大きい場合、 T を大きくするにつれて、力の過渡応答に著しい変動が見られ、好ましい応答を得ることができない。このように、力と位置の応答を調整するには、設計パラメータの最適設計が必要になる。しかし、この問題は今後の課題として残ることになる。

モデルフィードバックの効果をより一層明確にするため、 V_0 を小さくした場合のシミュレーション結果をFig. 9に示す。この場合、 V_0 は $1(\text{kgm/s})$ である。希望の押しつけ力は、Fig. 7, 8と同様に $5(\text{N})$ とする。モデル化誤差は、Fig. 8と同様である。すなわち、非線形力ベクトル $h_{NL}(q, \dot{q})$ を無視したモデル式を用いて制御入力を計算する。(a)はロバスト制御を用いない場合の制御応答を示す。 $\dot{q}_f$ の目標値が $1(\text{kgm/s})$ であるため、Fig. 8(a)に比して応答の乱れは小さい。(b)はロバスト制御を用いた場合の応答を示している。設計パラメータはFig. 8(b)と同様である。力応答、位置制御ループの応答共に顕著な改善が見られる。

以上のシミュレーションから、提案したハイブリッド制御系の有効性を示すことができた。特に、モデル化誤差がない場合、きわめて良好な制御特性を得ることができた。一方、非線形力ベクトルを無視した場合やこれと等価な外乱が加わる場合にも、ロバスト制御則を用いることによって制御応答を改善することができた。しかし、慣性行列 $M(q)$ や拘束条件 $\phi(q)$ に構造的なパラメータ変動が生じた場合、すなわち、 $M(q) \rightarrow M(q) + \Delta M(q)$, $\phi(q) \rightarrow \phi(q) + \Delta \phi(q)$ となった場合、提案した制御系では、力応答が著しく変動することがある。これは、新座標系の設定が、ベクトル場 $M^{-1}(q)(\partial \phi / \partial q)$ の情報に依存

(a) Simulation result without robust control under existence of uncertain dynamics for the case of $V_0=1(\text{kgm/s})$

(b) Simulation result with robust control under existence of uncertain dynamics for the case of $V_0=1(\text{kgm/s})$

Fig. 9

しているために起こると考えられる。さらに極端な場合、計算時間の大幅な短縮のため、モデル式を

$$h_L(\dot{q}) = \tau + (\partial \phi / \partial q)^T \lambda \quad (17)$$

で与えることも考えられる。このような場合のロバスト制御については、新たな制御手法を提案する必要がある。

5. おわりに

本論文ではロボットによる力と位置のハイブリッド制御を実現する制御系を提案した。提案したハイブリッド制御系の特徴はつぎのとおりである。

(1) 提案する制御系は、任意の拘束面上のハイブリッド動作に必要な座標系を与え、力制御空間と位置制御空間を非干渉化できる。

(2) モデル化誤差が存在しない場合、提案する制御系は、力フィードバックなしで、指定どおりの力軌道を実現する。また、拘束面上の軌道に沿って、位置制御変数の微分値を希望の値に設定することが可能である。

(3) 遠心力やコリオリ力などの非線形力ベクトルを完全に無視するモデル化誤差に対して、提案する制御系は、線形ロバスト制御則を用いることによって、それらの影響を除くことができる。

(4) 慣性行列 $M(q)$ や拘束条件 $\phi(q)$ に構造的なモデル化誤差(パラメータ変動)が存在する場合、特に、その誤差のノルムが大きい場合、力応答が振動的になるなどの影響がでる。この問題の解決は今後の課題として残る。

(5) 位置制御変数 η_f の微分値は運動量の次元をもち、軌道速度と一致する物理量ではない。このため、実システムへの適用の際には、希望の軌道速度から $\dot{\eta}_f$ の目標値への変換プロセスが必要となる。具体的には、希望の軌道速度から $\dot{\eta}_f$ の目標値への変換と $G(s)=(sI_{n-m}+K)^{-1}$ の逆システムを用いて、 v_f を与えるプロセスを付加することになる。これについての詳細な議論は別の機会に報告する。

参 考 文 献

- 1) N. Hogan: Impedance Control: An Approach to Manipulation, Part I~III: Trans. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, **107**, 1/24 (1985)
- 2) H. Kazerooni, et al.: Robust Compliant Motion for Manipulations, Part I, II: IEEE Journal of Robotics and Automation, **RA-2**, 83/105 (1986)
- 3) C. Y. Kuo, S. T. Wang: Nonlinear Robust Hybrid Control of Robot Manipulators, Trans. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, **112**, 48/54 (1990)
- 4) M. H. Raibert and J. J. Craig: Hybrid Position/Force Control of Manipulations, Trans. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, **102**, 126/133 (1981)
- 5) 吉川恒夫: ロボットアームの位置と力の動的ハイブリッド制御, ロボット学会誌, **3-6**, 25/31 (1985)
- 6) J. Duffy: The Fallacy of Modern Hybrid Control Theory that is Based on "Orthogonal Complements" of Twist and Wrench Spaces, *Journal of Robotic Systems*, **7-2**, 139/144 (1990)
- 7) 成清, 泉: ハイブリッド制御系の一構成法, 電気学会論文集, **110-11**, 1119/1125 (1990)
- 8) T. Narikiyo, M. Ito: Control of Biped Locomotion System in a Double Support Phase, *Robotica*, **3-2**, 73/77 (1985)
- 9) T. Narikiyo, T. Izumi: On Model Feedback Control for Robot Manipulators, Trans. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, **113-3**, 371/378 (1991)

[著 者 紹 介]

成 清 辰 生 (正会員)

1983年,名古屋大学大学院情報工学専攻博士課程単位取得退学。同年工業技術院九州工業技術試験所入所。90年豊田工業大学助教授。制御工学, ロボット工学の研究と教育に従事。電気学会, 日本ロボット学会などの会員(工学博士)。

Günther SCHMIDT

Günther Schmidt received the Dipl.-Ing. and Dr.-Ing. degree in Electrical Engineering from the Technische Universität Darmstadt, Germany, in 1960 and 1966, respectively. He was awarded a postdoc fellowship by the Max Kade Foundation, New York, USA in 1967. During one year, he conducted research in the Division of Engineering Mechanics at Stanford University, CA, USA. In 1968 he became head of the flight control and electronics group of the Dornier Aerospace Company, Friedrichshafen, Germany. Since 1972 he is Professor of Electrical Engineering and Director of the Automatic Control Laboratory of the Technische Universität München, Germany. He is author of numerous papers and two books. His current research interests include issues of supervision and control of complex systems and advanced robotics.

芥 田 友 彦 (正会員)

1948年,東京大学第一工学部機械工学科卒業。同年日本国有鉄道鉄道技術研究所入所。62年八幡製鉄(現新日本製鉄(株))計装技術室長。本社設備技術センター電気計装開発室長。専門部長。80年トヨタ自動車(株)生産技術開発部。81年豊田工業大学制御情報工学科教授。91年同大学付属図書館長。オンライン計測制御の研究に従事。精密工学会, 日本機械学会などの会員(工学博士)。