手先拘束下にあるマニピュレータに対する Model-Based 適応制御

浪花 智英*・有本 卓*
Louis L. WHITCOMB*・劉 雲輝**

Model-Based Adaptive Control for Geometrically Constrained Manipulators

Tomohide NANIWA*, Suguru ARIMOTO*,
Louis L. WHITCOMB* and Yun-Hui LIU**

A new model-based adaptive control method for a class of robot manipulators whose end-point is moving in touch with a geometrically constraint surface is proposed. A contact force arises at the end-point of the manipulator. Therefore, the manipulator is controlled so as to track both the desired end-point trajectory given on the constraint surface and the desired contact force trajectory simultaneously.

The method is based on the model-based adaptive law that estimates unknown or uncertain physical parameters of the manipulator such as mass, inertia, etc., and constructs the control input by using the estimated values of these parameters. The position and force control of the manipulator is realized in the joint-angle space by orthogonalizing the position and velocity error vectors to the contact force error vectors through introduction of a projection matrix that projects vectors in the joint space to the tangent plane of the constraint surface.

The convergence of position and force trajectory errors is theoretically proved. In addition, computer simulation results are given to show the convergence of these trajectories and to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key Words : model-based adaptive control, position and force control, robot manipulator, control under geometrical constraint

1. はじめに

人手で行う作業の大半は作業環境中の物体を操作することであり、物体との間で力をやりとりしながらその運動の制御を行っている。この種の作業をロボットに代行させるには、このような外界との物理的相互作用を含んだ系に対する制御を考える必要がある。

このような状況の基本問題として、本論文ではマニピュレータの手先が作業環境中の曲面に幾何学的に拘束

されながら運動する場合を考える。このとき、手先は拘束面の法線方向に生じる抗力と拘束面上の摩擦力を受ける。また、拘束面上に与えられた理想の手先軌道を実現すると同時に、手先と拘束面の間に理想の抗力を生成させることがマニピュレータの制御の目的となる。

手先の位置と抗力を同時に制御する方法として、手先が拘束される方向に力制御を、それ以外の方向には位置制御を行う“位置と力のハイブリッド制御”が盛んに研究されてきた^{1)~3)}。これらの研究の多くは、マニピュレータのダイナミクスが既知でありリンク間の動的な干渉やコリオリ力や遠心力などの非線形な要素が完全に補償できると仮定しているが、そのダイナミクスを正確に知ることは実際には困難である。ダイナミクスの完全なモデルを用いず、学習によって位置と力の制御を実現する研究もあるが^{4),5)}、同じ運動を繰り返し行うことが不適当な

* 東京大学工学部 東京都文京区本郷 7-3-1

** 電子技術総合研究所 つくば市梅園 1-1-4

* Faculty of Engineering, University of Tokyo,
Bunkyo-ku, Tokyo

** Electrotechnical Laboratory, AIST-MITI, Tsukuba
(Received September 21, 1993)

(Revised May 9, 1994)

状況では別な枠組が必要になる。

手先が自由に運動できる場合には、各リンクの質量やモーメントなどの物理パラメータがダイナミクスに線形に入ることを利用して、これらの物理パラメータの推定と推定量に基づいた制御を同時に行う Model-Based 適応制御法が提案されており、その有効性が確かめられている^{6)~10)}。

本論文では、手先が幾何学的な拘束を受けるマニピュレータに対して拡張した Model-Based 適応制御法を提案する。提案した制御則では、マニピュレータのダイナミクスを関節角座標系で記述し、関節空間における拘束面の接平面への射影行列を用いて、位置・速度誤差信号と手先で生成される抗力の誤差信号を関節角空間で直交させることによって、位置と抗力を同時に制御している。

提案した制御則によって、位置軌道が理想の位置軌道に収束すると同時に、手先に生じる力が理想の力軌道に収束することを理論的に証明する。また、目標として与える理想軌道を適当に選ぶことによって、マニピュレータの真の物理パラメータを推定できることを示す。更に、位置と抗力の収束性を計算機シミュレーションによって検証し、提案した制御則の有効性を示す。

2. 幾何学的拘束を受けるマニピュレータの運動方程式

回転関節のみをもつマニピュレータの手先が、作業座標系 $x=(x^1, x^2, x^3)^T$ で式 $\varphi(x)=0$ によって与えられる曲面上に拘束されて運動するとする。また、手先は拘束面に対して点接触していると仮定する。このとき、手先は拘束面から、拘束面の法線方向の抗力と摩擦力を受ける。摩擦力は手先の速度と逆方向に生じ、その大きさは速度の大きさのみの関数 $\xi(\|\dot{x}\|)\|\dot{x}\|$ ($\xi(\alpha)$ は正値をとる連続関数) によって与えられるものとする。このとき、マニピュレータの運動方程式は関節角座標系 $q=(q^1, \dots, q^n)^T$ ($n \geq 3$) でつぎのように表わされる。

$$H(q)\ddot{q} + \left\{ B_0 + \frac{1}{2}\dot{H}(q) + S(q, \dot{q}) \right\} \dot{q} + g(q) = J_x^T(q)f - \xi(\|\dot{x}\|)J_x^T(q)\dot{x} + u \quad (1)$$

ここで、 $H(q)$ は正定対称なマニピュレータの慣性行列であり、その要素は q に関する三角関数か定数によって与えられる。 B_0 は各関節におけるダンピングを表わす正定対称行列である。 $S(q, \dot{q})\dot{q}$ はコリオリ力や遠心力などの非線形な力による項であり、 $S(q, \dot{q})$ が $\dot{q}$ に関して線形齊次であり歪対称行列となることが知られている。 $g(q)$ は重力によるトルクを表わしている。

(1)式の右辺第1項が手先と拘束面の間の抗力からくるトルク、第2項が摩擦によって生じるトルクである。

ここで $J_x^T(q)$ は $n \times 1$ のベクトルで、関節角座標系で表わした拘束面 $\varphi(x(q))=0$ の点 q における単位法線ベクトル、 $J_x(q)$ は作業座標系 x と関節角座標系 q の間の $3 \times n$ のヤコビ行列であり、次式によって定義される。

$$\dot{x} = \left(\frac{\partial x^i(q)}{\partial q^j} \right) \dot{q} = J_x(q) \dot{q} \quad (2)$$

$$J_x(q) = \frac{\partial \varphi}{\partial x} J_x(q) / \left\| \frac{\partial \varphi}{\partial x} J_x \right\| \quad (3)$$

f は手先と拘束面の間の抗力を関節座標系で表わしたときのトルクの大きさを表わしているが、手先に生成する抗力そのものの大きさ $\bar{f}$ との間でつぎの関係が成り立つ。

$$J_x^T(q)f = J_x^T(q) \frac{(\partial \varphi / \partial x)^T}{\|\partial \varphi / \partial x\|} \bar{f} = J_x^T(q) \frac{\|(\partial \varphi / \partial x) J_x\|}{\|\partial \varphi / \partial x\|} \bar{f} \quad (4)$$

マニピュレータを制御するときには手先と拘束面の間の理想の抗力の大きさ $\bar{f}_d$ が与えられるが、 f と $\bar{f}$ が(4)式を満たすことから $\bar{f}_d$ が与えられれば理想のトルクの大きさ f_d が定まることに注意しておく。またここで、拘束面は2回連続微分可能な曲面であり、マニピュレータの取り得る姿勢の範囲で拘束面の法線ベクトルが0ベクトルになることがないものとする。このとき拘束面を表わす式の微分から次式が成り立つ。

$$\frac{d}{dt} \varphi(x) = \frac{\partial \varphi}{\partial x} J_x(q) \dot{q} = 0 \rightarrow J_x(q) \dot{q} = 0 \quad (5)$$

u は各関節でアクチュエータによって発生されるトルクを表わしており、マニピュレータへの制御入力である。

さて、(1)式の左辺が各リンクの質量および慣性モーメントからなる物理パラメータによって線形齊次な形で書けることは良く知られているが、手先に生じる摩擦力もパラメータ表記できるとして、これらを含めて、つぎのように書くことができるとする。

$$Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\Theta = H(q)\ddot{q} + \left\{ B_0 + \frac{1}{2}\dot{H}(q) + S(q, \dot{q}) + \xi(\|J_x(q)\dot{q}\|)J_x^T(q)J_x(q) \right\} \dot{q} + g(q) \quad (6)$$

ここに Θ が各リンクの質量やモーメントおよび摩擦やダンピングの係数などの物理パラメータを表わすベクトルであり、 Y はそれらのパラメータにかかる行列である。 $Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ には $\ddot{q}$ が2カ所表記してあるが、二つめの $\ddot{q}$ は(6)式の右辺第2項の $\{ \}$ の外側の $\dot{q}$ を表わす。

3. 関節空間における直交化原理に基づく Model-Based 適応制御

手先が常に拘束面上を運動するような理想の軌道 $q_d(t)$ が関節角座標系の上で与えられ、手先と拘束面との間に生じる抗力からくる関節トルクの理想の大きさ

$f_d(t)$ もあらかじめ与えられるとする。問題は $q_d(t)$ と $f_d(t)$ を同時に実現する制御入力 $u(t)$ を構成することである。

3.1 従来の Model-Based 適応制御

手先が自由運動する場合、仮の理想速度として $\dot{q}_r = \dot{q}_d - \alpha \Delta q$ ($\Delta q = q - q_d$) を定義し、 $\dot{q}$ との誤差

$$s_r = \dot{q} - \dot{q}_r = \Delta \dot{q} + \alpha \Delta q \quad (7)$$

を 0 に収束させるように制御入力を構成する方法で、理想の q_d を実現することができる。この考え方は、 α を正に選べば微分方程式 $\Delta \dot{q} + \alpha \Delta q = 0$ が漸近安定な平衡点 $\Delta q = 0$ をもち、 $s_r = 0$ を実現することによって $\Delta q = 0$ が実現することにある。Model-Based 適応制御では、(6) 式の物理パラメータ Θ の推定値 $\hat{\Theta}$ を用いて制御入力を構成し、軌道追従制御を行いながら同時に $\hat{\Theta}$ を適応的に更新することで $s_r = 0$ (したがって $\Delta q = 0$) を実現する⁷⁻¹⁰⁾。制御入力 $u_a(t)$ と $\hat{\Theta}$ の適応則はつぎのように与えられる。

$$u_a(t) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r) \hat{\Theta} - K s_r \\ \frac{d}{dt} \hat{\Theta} = -\Gamma^{-1} Y^T(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r) s_r$$

ここに K, Γ は正定対称なゲイン行列である。

3.2 幾何学的な拘束を受ける系の Model-Based 適応制御

手先が幾何学的な拘束を受ける場合、手先と拘束面との間の抗力と摩擦による項が運動方程式に加わる((1) 式)。そこで、仮の理想速度軌道 $\dot{q}_r(t)$ を

$$\dot{q}_r = Q_\varphi(q) \{ \dot{q}_d - \alpha \Delta q \} + \beta J_\varphi^T(q) \Delta F \quad (8)$$

によって定義する。ここに

$$\Delta q(t) = q(t) - q_d(t), \quad \Delta F(t) = F(t) - F_d(t) \quad (9)$$

$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau, \quad F_d(t) = \int_0^t f_d(\tau) d\tau \quad (10)$$

とおいた。また $\alpha > 0, \beta > 0$ はそれぞれ位置誤差、抗力の積分(運動量)の誤差に対するゲインである。 $Q_\varphi(q)$ は $n \times n$ の対称行列であり

$$Q_\varphi(q) = E_n - J_\varphi^T(q) J_\varphi(q) \quad (11)$$

と定義する。ただし E_n は $n \times n$ の単位行列を表わす。定義から、 $Q_\varphi(q)$ は任意のベクトルを拘束面 $\varphi(x(q)) = 0$ の点 q における接平面に射影する行列である。また、(11) 式から、手先が拘束面上を運動するとき、

$$Q_\varphi(q) \dot{q} = \dot{q}, \quad Q_\varphi(q) J_\varphi^T(q) = (J_\varphi(q) Q_\varphi(q))^T = 0 \quad (12)$$

が成り立つことに注意しておく。

マニピュレータの関節角速度と仮の理想速度の誤差を $s(t) (= \dot{q}(t) - \dot{q}_r(t))$ とおく

$$s = Q_\varphi(q) \{ \Delta \dot{q} + \alpha \Delta q \} - \beta J_\varphi^T(q) \Delta F \quad (13)$$

となる。ここに $s(t)$ は互いに直交する二つの成分 $s_0(t)$,

$s_1(t)$ に分解でき、それぞれを

$$s_0 = Q_\varphi(q) \{ \Delta \dot{q} + \alpha \Delta q \}, \quad s_1 = -\beta J_\varphi^T(q) \Delta F \quad (14)$$

とおく。 $s(t)$ は状態空間 $\Delta \dot{q}(t), \Delta q(t), \Delta F(t)$ における sliding surface を構成するが、関節角座標系の上で互いに直交する位置・速度誤差空間と抗力の積分誤差の部分空間に分割して $s(t)$ を構成しているところに本研究の特徴があり、これを「関節空間における直交化原理 (Joint-Space Orthogonalization)」と呼ぶ。

制御入力 $u(t)$ は、手先に発生する抗力の積分誤差のフィードバックを加えた形

$$u = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r) \hat{\Theta} - J_\varphi^T(q) \{ f_d - \gamma \Delta F \} - K s \quad (15)$$

で構成する。ここに $\gamma > 0$ は定数、 K は正定対称のゲイン行列である。(15) 式では行列 $Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r)$ の 2 番目の速度 $\dot{q}$ と加速度 $\ddot{q}$ の項をそれぞれの仮の理想軌道で置き換えた $Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r)$ を用いているが、(6) 式から $Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r) \hat{\Theta}$ はつぎのように表わされる。

$$Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r) \hat{\Theta} = \hat{H}(q) \ddot{q}_r + \left\{ \hat{B}_0 + \frac{1}{2} \hat{\dot{H}}(q) \right. \\ \left. + \hat{S}(q, \dot{q}) + \hat{\xi}(\|J_x(q) \dot{q}\|) J_x^T(q) J_x(q) \right\} \dot{q}_r + \hat{g}(q) \quad (16)$$

ここで $\hat{H}, \hat{B}_0, \hat{S}, \hat{\xi}, \hat{g}$ はそれぞれ H, B_0, S, ξ, g の推定値を表わしている。また $Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r)$ と $\dot{q}_r(t)$ の定義から $u(t)$ が実時間で計算可能であることに注意しておく。(15) 式を(1) 式に代入すると次式を得る。

$$(Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r) - Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r)) \hat{\Theta} \\ - Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r) (\hat{\Theta} - \Theta) \\ = J_\varphi^T(q) \{ \Delta f + \gamma \Delta F \} - K s \quad (17)$$

$Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r)$ の $\dot{q}_r$ と $\ddot{q}_r$ に関する線形齊次性から、(17) 式は $s(t)$ を用いて

$$\bar{Y}(q, \dot{q}, s, \dot{s}) \Theta - Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r) \Delta \Theta \\ = J_\varphi^T(q) \{ \Delta f + \gamma \Delta F \} - K s \quad (18)$$

と表わせる。ここで $\Delta \Theta(t) = \hat{\Theta}(t) - \Theta$ と定義し、また

$$\bar{Y}(q, \dot{q}, s, \dot{s}) \Theta = H(q) \dot{s} + \left\{ B_0 + \frac{1}{2} \dot{H}(q) \right. \\ \left. + S(q, \dot{q}) + \xi(\|J_x(q) \dot{q}\|) J_x^T(q) J_x(q) \right\} s \quad (19)$$

と置いた。

また、 $\hat{\Theta}(t)$ の適応則を次式で与える。

$$\dot{\hat{\Theta}}(t) = \hat{\Theta}(0) - \int_0^t \Gamma^{-1} Y^T(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r) s(\tau) d\tau \quad (20)$$

ここに $\Gamma > 0$ はゲイン行列である。なお、 Θ は定数なので(20) 式の微分から次式が成り立つ。

$$\frac{d}{dt} \Delta \Theta = -\Gamma^{-1} Y^T(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r) s \quad (21)$$

ここで、つぎのリヤプノフ関数の候補 $V(t)$ を考える。

$$V(t) = \frac{1}{2} \{s^T(t)H(q(t))s(t) + \Delta\theta^T(t)\Gamma\Delta\theta + \beta\Delta F^2(t)\} \quad (22)$$

(22)式の時刻 t に関する微分を求めると

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}V(t) &= s^T H(q) \dot{s} + \frac{1}{2} s^T \dot{H}(q) s \\ &\quad + \Delta\theta^T \Gamma \frac{d}{dt}\Delta\theta + \beta \Delta f \Delta F \end{aligned} \quad (23)$$

となる。(23)式に(19), (21)式を代入すると

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}V(t) &= s^T \bar{Y}(q, \dot{q}, s, \dot{s}) \Theta \\ &\quad - s^T \{B_0 + \xi(\|J_x(q)\dot{q}\|)J_x^T(q)J_x(q)\}s \\ &\quad - \Delta\theta^T Y^T(q, \dot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r)s + \beta \Delta f \Delta F \\ &= -s^T \{B_0 + K + \xi(\|J_x(q)\dot{q}\|)J_x^T(q)J_x(q)\}s \\ &\quad + \{\Delta f + \gamma \Delta F\}J_\varphi \\ &\quad \times (Q_\varphi(q)(\Delta\dot{q} + \alpha\Delta q) - \beta J_\varphi^T(q)\Delta F) \\ &\quad + \beta \Delta f \Delta F \end{aligned} \quad (24)$$

となる。ここで $S(q, \dot{q})$ が歪対称であることを用いた。

(12)式に注意して(24)式を整理すると

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}V(t) &= -s^T \{B_0 + K + \xi(\|J_x(q)\dot{q}\|)J_x^T(q)J_x(q)\}s \\ &\quad - \beta \gamma \Delta F^2 \end{aligned} \quad (25)$$

となる。

(22), (25)式から $V(t)$ は有界であり, $H^{-1}(q)$ が有界であることから $s(t)$, $\Delta\theta(t)$, $\Delta F(t)$ も有界である。

つぎに, 拘束面 $\varphi(x(q))=0$ が十分滑らかであれば $\Delta q(t)$ が有界であることを示そう。

そのとき, $q(t)$ が $q_d(t)$ に近づくにつれ, $\Delta q(t)$ と $J_\varphi^T(q)$ は互いに直交する関係に近づく。もっと厳密に言えば, ある定数 $\eta_0 > 0$ が存在して, $\|\Delta q\| \leq \eta_0$ となるならば

$$|J_\varphi(q)\Delta q| \leq \frac{1}{2}\|\Delta q\| \quad (26)$$

が成り立つものと仮定できる。このとき同時にある定数 $c_0 > 0$ が存在して $\|\Delta q\| \leq \eta_0$ ならば

$$\|J_\varphi(q) - J_\varphi(q_d)\| \leq c_0 \|\Delta q\| \quad (27)$$

となることを仮定できる。ここで定数 c_0 は点 $q_d(t)$ における拘束面の曲率に依存し, 曲率が大きければ c_0 は大きな値をとる。

[補題1] (26), (27)式のもとで $\alpha \geq 2c_0 \sup_{t \geq 0} \|\dot{q}_d\|$ を満足するように α をとり, α と η_0 で定まる範囲内にマニピュレータの初期化誤差 $\|\Delta q(0)\|$, $\|\Delta \dot{q}(0)\|$ がおさまっているとすると(その範囲は証明中で与える), 関節角誤差 $\|\Delta q(t)\|$ は有界となる。

(証明) $\Delta q(t)$ と $s_0(t)$ の内積を取ると, 式

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \|\Delta q\|^2 &= \Delta q^T s_0 - \alpha \|\Delta q\|^2 - |J_\varphi(q)\Delta q|^2 \\ &\quad + \Delta q^T J_\varphi^T(q) \{J_\varphi(q) - J_\varphi(q_d)\} \dot{q}_d \end{aligned} \quad (28)$$

が成立する。ただし, ここに

$$J_\varphi(q)\Delta \dot{q} = -J_\varphi(q)\dot{q}_d = -\{J_\varphi(q) - J_\varphi(q_d)\}\dot{q}_d$$

となることを利用している。つぎに, 一般性を失わずに議論を簡単化するために, 制御を始めてからしばらくの間は $q(t)$ が $q_d(t)$ の近傍に留まっていると仮定しておく。すなわち, ある時刻 $T_0 > 0$ に対して, $t \in [0, T_0]$ の間で常に

$$\|\Delta q(t)\| \leq \eta_0 \quad (29)$$

が成り立つものと仮定する。このとき(28)式の両辺を $\|\Delta q\|$ で割ることによって

$$\frac{d}{dt}\|\Delta q(t)\| \leq -\left(\frac{3}{4}\alpha - \frac{c_0 c_1}{2}\right)\|\Delta q(t)\| + \|s_0(t)\| \quad (30)$$

を得る。ただし,

$$c_1 = \sup_{t \geq 0} \|\dot{q}_d(t)\| \quad (31)$$

と置いた。 $V(t)$ が時刻 t に関して単調非増加であり, かつ $s(t)$ が有界で, 互いに直交する成分 $s_0(t)$, $s_1(t)$ からなることから $s_0(t)$ もまた有界である。具体的には, 慣性行列 $H(q)$ の全ての q に関する最小, 最大固有値をそれぞれ λ_m , λ_M と置くと

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}\lambda_m \|s_0(t)\|^2 &\leq V(t) \leq V(0) \\ &\leq \frac{1}{2}\{\lambda_M \|s_0(0)\|^2 + \Delta\theta^T(0)\Gamma\Delta\theta(0)\} \end{aligned} \quad (32)$$

が成り立つ。これより

$$\begin{aligned} \|s_0(t)\| &\leq c_0 \|s_0(0)\| + \lambda_m^{-1/2} \|\Delta\theta(0)\|_r \\ &\leq c(\|\Delta \dot{q}(0)\| + \alpha \|\Delta q(0)\|) + \lambda_m^{-1/2} \|\Delta\theta(0)\|_r \\ &\stackrel{def}{=} M \end{aligned} \quad (33)$$

となる。ただし,

$$c = \{\lambda_M/\lambda_m\}^{1/2}, \quad \|\Delta\theta(0)\|_r^2 = \Delta\theta^T(0)\Gamma\Delta\theta(0) \quad (34)$$

とおいた。ここで $\alpha \geq 2c_0 c_1$ となるように α を選べば,

(33)式を(30)式に代入することで

$$\begin{aligned} \|\Delta q(t)\| &\leq e^{-\alpha t/2} \left[\|\Delta q(0)\| + \int_0^t e^{\alpha \tau/2} M d\tau \right] \\ &= \frac{2M}{\alpha} - e^{-\alpha t/2} \left[\frac{2M}{\alpha} - \|\Delta q(0)\| \right] \end{aligned} \quad (35)$$

を得る。(33)式の M の定義と, $c \geq 1$ となることから $\|\Delta q(0)\| \leq 2M/\alpha$ であり, このとき

$$\begin{aligned} \|\Delta q(t)\| &\leq \frac{2M}{\alpha} = 2c \|\Delta q(0)\| \\ &\quad + \frac{2}{\alpha} \{c \|\Delta \dot{q}(0)\| + \lambda_m^{-1/2} \|\Delta\theta(0)\|_r\} \end{aligned} \quad (36)$$

が成り立つ。ここで α を十分大きく

$$\frac{2}{\alpha} \{c \|\Delta \dot{q}(0)\| + \lambda_m^{-1/2} \|\Delta\theta(0)\|_r\} < \frac{1}{2}\eta_0 \quad (37)$$

となるように選ぶと,

$$\|\Delta q(0)\| \leq \frac{1}{4c}\eta_0 \quad (38)$$

が成り立つ限り, (36)式から結局 $t \in [0, T_0]$ に限らず $t \geq T_0$ となる任意の時刻も含めて

$$\|\Delta q(t)\| \leq \gamma_0 \quad (39)$$

が成り立つことがわかり, 補題は証明された.

補題 1 から $\Delta q(0), \Delta \dot{q}(0), \Delta \theta(0)$ が (37) 式と (38) 式を満足する限り, Δq が有界であることが示されたが, つぎに s の定義から

$$s = \dot{q} - Q(q)(\dot{q}_a - \alpha \Delta q) - \beta J_\varphi^T \Delta F \quad (40)$$

となり, $\dot{q}$ もまた有界となる.

さて, マニピュレータのダイナミクスを書き直すと

$$\begin{aligned} \bar{Y}(q, \dot{q}, s, \dot{s})\theta - Y(q, \dot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r)\Delta\theta + Ks \\ = J_\varphi^T(\Delta f + \gamma \Delta F) \end{aligned} \quad (41)$$

となる. (41) 式は更に

$$\begin{aligned} H(q)\dot{s} + \tilde{H}(q)\ddot{q}_r + N(q, \dot{q}, \dot{q}_r, s, \theta, \Delta\theta) \\ = J_\varphi^T(q)(\Delta f + \gamma \Delta F) \end{aligned} \quad (42)$$

と書くことができる. ここで $\tilde{H}(q) = H(q) - \hat{H}(q)$ と置いた. また

$$\begin{aligned} N(q, \dot{q}, \dot{q}_r, s, \theta, \Delta\theta) \\ = \bar{Y}(q, \dot{q}, s, 0)\theta - Y(q, \dot{q}, \dot{q}_r, 0)\Delta\theta + Ks \\ = \left(B_0 + K + \frac{1}{2}\dot{H}(q) + S(q, \dot{q})\right. \\ \left.+ \xi(\|J_x(q)\dot{q}\|)J_x^T J_x\right)s \\ + \left(\tilde{B}_0 + \frac{1}{2}\dot{\tilde{H}}(q) + \tilde{S}(q, \dot{q})\right. \\ \left.+ \tilde{\xi}(\|J_x(q)\dot{q}\|)J_x^T J_x\right)\dot{q}_r + \tilde{g}(q) \end{aligned} \quad (43)$$

と置いた. ここで $\tilde{B}_0 = B_0 - \hat{B}_0$, $\tilde{S} = S - \hat{S}$, $\tilde{\xi} = \xi - \hat{\xi}$, $\tilde{g} = g - \hat{g}$ と置いている. (43) 式から N は s と $\dot{q}_r$ に関して線形であり, $s, \dot{q}_r, q, \dot{q}, \Delta\theta$ が有界であることから有界となる.

さて, $\dot{q}_r$ の定義から $\dot{q}_{r0} = Q(\dot{q}_a - \alpha \Delta q)$ と置けば

$$\dot{q}_r = \dot{q}_{r0} + \beta J_\varphi^T \Delta F + \beta J_\varphi^T \Delta f \quad (44)$$

$$\ddot{q}_{r0} = \dot{Q}(\dot{q}_a - \alpha \Delta q) + Q(\ddot{q}_a - \alpha \Delta \dot{q}) \quad (45)$$

となる.

ここでつぎの二つの仮定を置く.

- 1) マニピュレータの理想軌道 $\ddot{q}_a, \dot{q}_a, q_a$ が与えられ, $\dot{q}_a$ が一様連続である.
- 2) 拘束面 $\varphi(x(q)) = 0$ はその 2 回微分が連続かつ有界であり, $Q, \partial Q/\partial q, J_\varphi, \partial J_\varphi/\partial q$ がすべての q に関して一様連続である.

このとき, $\ddot{q}_{r0}$ もまた有界となる. そこで (44) 式を (42) 式に代入すれば

$$\begin{aligned} H(q)\dot{s} + \tilde{H}(q)\ddot{q}_{r0} + \tilde{H}(q)\{\beta J_\varphi^T \Delta F + \beta J_\varphi^T \Delta f\} + N \\ = J_\varphi^T(\Delta f + \gamma \Delta F) \end{aligned} \quad (46)$$

となり, さらに左から $J_\varphi(s)H^{-1}(q)$ をかけ, 式 $J_\varphi(q)s = -J_\varphi(q)s - \beta \Delta f$ を代入して整理すると

$$\begin{aligned} (J_\varphi H^{-1} J_\varphi^T - \beta J_\varphi H^{-1} \tilde{H} J_\varphi^T + \beta) \Delta f \\ = J_\varphi s + J_\varphi H^{-1} (\tilde{H} \ddot{q}_{r0} + N) \\ + (\beta J_\varphi H^{-1} \tilde{H}(q) J_\varphi^T - \gamma J_\varphi H^{-1} J_\varphi^T) \Delta F \end{aligned} \quad (47)$$

となる. (47) 式の左辺の係数は更に

$$\begin{aligned} J_\varphi H^{-1} J_\varphi^T - \beta J_\varphi H^{-1} \tilde{H} J_\varphi^T + \beta \\ = J_\varphi \{H^{-1} - \beta H^{-1} [\tilde{H} - H]\} J_\varphi^T \\ = J_\varphi H^{-1} J_\varphi^T + \frac{\beta}{2} J_\varphi [H^{-1} \tilde{H} + \tilde{H} H^{-1}] J_\varphi^T \end{aligned} \quad (48)$$

と書き改めることができ, β を十分小さくとれば (48) 式は H^{-1} に主に依存し, ある正の値を下まわることがない. また (47) 式の右辺が有界であることから結局 Δf も有界である. 更に (45) 式から $\ddot{q}_r$ も有界となる.

また (42) 式に左から $H^{-1}(q)$ をかけて整理すると

$$\dot{s} = -H^{-1}[\{\tilde{H}\ddot{q}_r + N\} - J_\varphi^T(\Delta f + \gamma \Delta F)] \quad (49)$$

となり, (49) 式の右辺が有界となることから $\dot{s}$ も有界であることがいえる.

$\dot{s}$ が有界であることから s は一様連続となる. また Δf が有界であることから ΔF も一様連続となり, しかも s と ΔF の L^2 -ノルムが有限であることから,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} s(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta F(t) = 0$$

が成り立つ. 更に $s(t)$ が直交する成分 $s_0(t)$ と $s_1(t)$ から構成されることから

$$\lim_{t \rightarrow \infty} s_0(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} Q_\varphi(q(t))(\Delta \dot{q}(t) + \alpha \Delta q(t)) = 0 \quad (50)$$

が成り立つ.

これらの結果から補題 1 の条件の下でマニピュレータの関節角位置軌道の収束性に関してつぎの定理を導くことができる.

《定理 1》 拘束面 $\varphi(x(q)) = 0$ が滑らかであり, ある定数 γ_0, c_0 が存在して $\|q(t) - q_d(t)\| \leq \gamma_0$ ならば

$$\|J_\varphi(q(t))(q(t) - q_d(t))\| \leq \frac{1}{2} \|q(t) - q_d(t)\|,$$

$$\|J_\varphi(q(t)) - J_\varphi(q_d(t))\| \leq c_0 \|q(t) - q_d(t)\|$$

が成り立つと仮定する. このとき $\alpha \geq 2c_0 c_1$ を満足するように十分大きな α と, (48) 式が正值となるように十分小さな β を取れば, 初期化の際の位置誤差 $\Delta q(0)$, 速度誤差 $\Delta \dot{q}(0)$ およびパラメータ推定誤差が (37) 式と (38) 式を満足するような範囲にある場合には, (15) 式の適応制御則によって位置軌道 $q(t)$ が理想の位置軌道 $q_d(t)$ に収束する. すなわち

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta q(t) = 0 \quad (51)$$

が成り立つ.

(証明) $\alpha > 0, \Delta q(0), \Delta \dot{q}(0), \Delta \theta(0)$ が (37), (38) 式を満足することから, 任意の時刻 $t \geq 0$ に対して (39) 式が成立する. したがって $t \geq 0$ で (30) 式が成り立つ. また $\alpha \geq 2c_0 c_1$ より, (30) 式を積分することによって

$$\| \Delta q(t) \| \leq e^{-at/2} \| \Delta q(0) \| + e^{-at/2} \int_0^t e^{a\tau/2} \| s_0(\tau) \| d\tau \quad (52)$$

が任意の $t \geq 0$ に対して成り立つ。 $s(t)$ が $t \rightarrow \infty$ で 0 に収束することから $\| s_0(t) \|$ が $t \rightarrow \infty$ で同じく 0 に収束することがいえており、(52)式の右辺第2項が

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t e^{-a(t-\tau)/2} \| s_0(\tau) \| d\tau = 0 \quad (53)$$

となることから(51)式が証明される。

4. 力軌道の収束性

手先に発生する力 $f(t)$ が理想の力軌道 $f_d(t)$ に $t \rightarrow \infty$ で収束することを証明する。

先の定理1から関節角速度 $\dot{q}(t)$ が有界であり、かつ $t \rightarrow \infty$ で $\Delta \dot{q}(t) \rightarrow 0$ となることがいえる。実際 $s_0(t)$ と $\Delta q(t)$ が $t \rightarrow \infty$ で 0 に収束することから

$$\begin{aligned} \Delta \dot{q}(t) &= \dot{q} - \dot{q}_d = Q_p(q) \dot{q} - Q_p(q_d) \dot{q}_d \\ &= Q_p(q)(\dot{q} - \dot{q}_d) + (Q_p(q) - Q_p(q_d)) \dot{q}_d \\ &= s_0(t) - a Q_p(q) \Delta q + (Q_p(q) - Q_p(q_d)) \dot{q}_d \\ &\rightarrow 0 \quad \text{as } t \rightarrow \infty \end{aligned} \quad (54)$$

が成り立つからである。

すでに $s, \Delta F$ が一様連続であり、 $\dot{s}, \Delta f, q, \dot{q}, \Delta \theta$ が有界であることが確かめられているが、このことから(8)式の $\dot{q}_r$ が有界であることがいえる。また(44)式から $\ddot{q}_r$ も有界となるので、 $\dot{s} = \dot{q} - \dot{q}_r$ より $\ddot{q}$ も有界である。

$\ddot{q}$ が有界なので、 $\dot{q}, q$ は一様連続となる。また $\dot{q}_r$ も一様連続である。

$\dot{q}_r, \ddot{q}_r, s$ の有界性のおかげで、(21)式から $d\Delta \theta/dt$ が有界となり、 $\Delta \theta$ も一様連続である。また(43)式の $N(q, \dot{q}, \ddot{q}, s, \theta, \Delta \theta)$ が一様連続となる。更に $\bar{H} = H - \hat{H}$ より $\hat{H}$ も一様連続である。

$\ddot{q}_d$ を一様連続になるように選んだことで $\ddot{q}_{r0}$ も一様連続となり、(47)式の右辺と、左辺の Δf の係数((48)式)も一様連続となる。ここで β を十分小さく選べば(48)式はある正值を下回ることがないので Δf もまた一様連続であることがいえる。

$t \rightarrow \infty$ で $\Delta F \rightarrow 0$ となり、 Δf が一様連続であることから $t \rightarrow \infty$ で $\Delta f \rightarrow 0$ となることが参考文献⁹⁾の Appendix B の Lemma から証明される。すなわち、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta f(t) = 0 \quad (55)$$

が成り立つ。このことは、定理1の仮定が満足され、手先が拘束面から離れることなく運動するならば、手先に発生する力の軌道が $t \rightarrow \infty$ で理想の手先力の軌道 $f_d(t)$ に収束することを意味している。

一方 Δf が一様連続となることから、(44)式から $\ddot{q}_r$

も一様連続となり、更に(49)式から $\dot{s}$ が一様連続になる。 $t \rightarrow \infty$ で $s \rightarrow 0$ となり、 $\dot{s}$ が一様連続であることからやはり $t \rightarrow \infty$ で $\dot{s} \rightarrow 0$ が成り立つ。更に

$$\begin{aligned} Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \ddot{q}_r) \Delta \theta &= -\bar{Y}(q, \dot{q}, s, \dot{s}) \theta \\ &+ J_p^T(q) \{ \Delta f + \gamma \Delta F \} - K s \end{aligned} \quad (56)$$

の右辺がすべて $t \rightarrow \infty$ で 0 に収束することから

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \ddot{q}_r) \Delta \theta = 0 \quad (57)$$

が成り立つことに注意しておく。

最後に、理想軌道の選び方によってマニピュレータの未知物理パラメータの推定値 $\hat{\theta}(t)$ を $t \rightarrow \infty$ でその真の値 θ に収束させ得ることを示す。明らかに式

$$\begin{aligned} &|Y(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d, \ddot{q}_d) \Delta \theta| \\ &\leq |Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \ddot{q}_r) - Y(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d, \ddot{q}_d)| \Delta \theta| \\ &+ |Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \ddot{q}_r) \Delta \theta| \end{aligned} \quad (58)$$

が成り立つ。 Y の定義から $Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \ddot{q}_r) - Y(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d, \ddot{q}_d)$ は $\dot{q}_r - \dot{q}_d$ と $\ddot{q}_r - \ddot{q}_d$ に関して線形斉次であり、またそのほかの要素は $\Delta \dot{q} (= \dot{q} - \dot{q}_d)$ または $\Delta q (= q - q_d)$ を引数に取る三角関数または定数である。ここで $t \rightarrow \infty$ で $\Delta q \rightarrow 0, \Delta \dot{q} \rightarrow 0, \Delta F \rightarrow 0, \Delta f \rightarrow 0$ となることから、 $\dot{q}_r$ を定義した(8)式について確かめられるように、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{q}_r(t) = \dot{q}_d(t), \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \ddot{q}_r(t) = \ddot{q}_d(t)$$

が成り立ち、(58)式の右辺は $t \rightarrow \infty$ で 0 に収束する。したがって、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Y(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d, \ddot{q}_d) \Delta \theta = 0 \quad (59)$$

を得る。さて、ここで

$$\begin{aligned} P(s, t) &= \int_s^t Y^T(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d, \ddot{q}_d) \\ &\quad \times Y(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d, \ddot{q}_d) d\tau \end{aligned}$$

と定義する。 $Y(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d, \ddot{q}_d)$ が persistently exciting⁹⁾ となるように理想軌道 $q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$ を与えると、任意の s に対してある $\delta > 0$ が存在し

$$P(s, s+\delta) \geq aI > 0 \quad (60)$$

が成り立つ。さて、 $\hat{\theta}$ の更新則と部分積分から

$$\begin{aligned} &\Delta \theta^T(t) P(s, t) \Delta \theta(t) \\ &= 2 \int_s^t \Delta \theta^T P(s, \tau) G Y^T(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \ddot{q}_r) s d\tau \\ &\quad + \int_s^t \Delta \theta^T Y^T(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d, \ddot{q}_d) \\ &\quad \times Y(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d, \ddot{q}_d) \Delta \theta d\tau \end{aligned}$$

が成り立つが、 $t = s + \delta$ とおくとこの式の右辺は 0 に収束する。この結果と(60)式から、 $\Delta \theta$ の L^2 ノルムは有界であることが示され、このことと一様連続性から $\hat{\theta}(t)$ は漸近的に真のパラメータ θ に収束することが証明される。

5. 計算機シミュレーション

Fig. 1 に示した 3 自由度マニピュレータのダイナミクスモデルを用いて提案した適応制御則の計算機シミュレーションを行い、関節角軌道と抗力の収束性を検証した。

マニピュレータは(1)式に従って運動するものとし、拘束条件式 $\varphi(x(q))=0$ と組み合わせた微分代数方程式を 4 次の Runge-Kutta 法にもとづく方法で数値積分した。ただし、ここではマニピュレータと拘束面の間に摩擦は生じないものとし、手先には拘束面の法線方向の抗力だけが発生するものとした。数値積分の刻み幅は 0.001 秒とする。対象とするマニピュレータの各リンクの形状を Table 1 に示す。

マニピュレータの手先は第 1 リンクから 20 cm 離れた位置に置かれた鉛直な平面に拘束されて運動するものとした。またこの平面上に与えた半径 10 cm の円を 5 秒で一周するように理想軌道を定め、1 回のシミュレーションでも 5 秒間の制御を行った (Fig. 2)。このとき手先に発生する抗力の目標は常に 10 N とした。また物理パラメータの推定値 $\hat{\theta}$ は時刻 0 で 0 に初期化した。

マニピュレータの初期化に誤差が存在しない場合の各

Fig. 1 DOF manipulator

Table 1 Physical parameters of 3-DOF manipulator

link 1		link 2		link 3	
column		box		box	
L_1	390.0 mm	L_2	205.0 mm	L_3	205.0 mm
l_1	440.0 mm	l_2	409.5 mm	l_3	391.0 mm
r	40.5 mm	d_2	35.0 mm	d_3	21.5 mm
		w_2	86.0 mm	w_3	70.0 mm
m_1	3.0 kg	m_2	1.0 kg	m_3	1.0 kg

関節の位置誤差と、手先に発生した抗力の誤差を Fig. 3, Fig. 4 に示した。このとき、仮の理想速度軌道 $\dot{q}_r$ の定義に現れるゲインを $\alpha=8, \beta=0.5$, 制御入力 u を構成する際の力の積分誤差のフィードバックゲインを $\gamma=6, s$ のフィードバックゲインを $K=8$, 物理パラメータの推定ゲイン Γ を単位行列としてシミュレーションを行った。また $\beta=5$ とした場合の抗力の誤差を Fig. 5 に示した。抗力の誤差の収束性を証明する上で β が十分小さいこ

Fig. 2 Desired Motion of 3 DOF Manipulator

Fig. 3 Joint angular position errors

Fig. 4 Force error

Fig. 5 Force error at $\beta=5$

Fig. 7 Force error with initialization error

Fig. 6 Joint angular position errors with initialization error

とを仮定していたが、 β はある程度大きく取ることによって抗力の誤差をより小さく押えられることがわかる。またこれらの図から、提案した Model-Based 適応制御則により目標とする位置軌道と手先力を実現できることが確かめられる。

更に、手先の初期位置が円の外周方向に 3 cm ずれた場合のシミュレーションを行い、そのときの関節の位置誤差を Fig. 6 に、手先力の誤差を Fig. 7 に示した。制御則のゲインは $\alpha=8$, $\beta=0.5$, $\gamma=6$, $K=2$, I は単位行列とした。手先の位置の初期化に誤差がある場合でも提案した制御則によって目標とする位置軌道と手先力を実現できることが確かめられる。

6. ま と め

関節角空間での直交化原理を用いて sliding surface を構成し、手先の位置・速度と抗力を同時に制御することができる Model-Based 適応制御則を提案し、その収束性を理論と計算機シミュレーションの両方で確かめた。

ここでは拘束面 $\varphi(x(q))=0$ の情報が完全に与えられ

ているとして、その法線方向ベクトル $J_p^T(q)$ を用いて制御則を構成しているが、実際には拘束面に関する知識が不完全で、前もって $J_p^T(q)$ を計算することができない場合も考えられる。このような場合には、マニピュレータの手先に取り付けた力センサの信号から、逐次 $J_p^T(q)$ の推定を行いながら提案した適応制御を行う方法が考えられる。しかしながら、このような場合には $J_p^T(q)$ の推定誤差が制御則に影響を与えることになり、マニピュレータのダイナミクスのモデル化されていない要素による影響や、外乱などの影響も含めてロバストな制御則を導き出すことが今後の課題であろう。

また、本論文では議論を簡単にするためにマニピュレータの手先が拘束面との間で点接触していることを仮定しているが、手先が一般的な拘束を受ける場合に対しても「関節角空間における直交化原理」を適用することができ、本論文で提案した Model-Based 適応制御則をそのまま用いることができる。

参 考 文 献

- 1) M. H. Raibert and J. J. Craig: Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators, Trans. ASME, J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, **102**, 126/133 (1981)
- 2) O. Khatib: A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators: The Operational Space Formulation, IEEE J. Robotics and Automation, **RA-3-1**, 43/53 (1987)
- 3) T. Yoshikawa: Dynamic Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators—Description of Hand Constraints and Calculation of Joint Driving Force, IEEE J. Robotics and Automation, **RA-3-5**, 386/392 (1987)
- 4) M. Aicardi, G. Cannata and G. Casalino: A Learning Procedure for Position and Force Control of Constrained Manipulators, Proc. ICAR, 423/430 (1991)
- 5) 浪花, 有本: 幾何学的拘束のあるロボットマニピュレータの学習制御, 計測自動制御学会論文集, **29-4**, 411/418 (1993)
- 6) 大須賀公一: 非線形メカニカルシステムの適応制御, 計測

自動制御学会論文集, 22-7, 756/763(1986)

- 7) J. J. Craig, P. Hsu and S. S. Sastry: Adaptive Control of Mechanical Manipulators, Int. J. Robotics Research, 6-2, 16/28(1987)
- 8) J. -J. E. Slotine and W. Li: On the Adaptive Control of Robot Manipulators, Int. J. Robotics Research, 6-3, 49/59(1987)
- 9) N. Sadegh and R. Horowitz: Stability and Robustness Analysis of a Class of Adaptive Controllers for Robotic Manipulators, Int. J. Robotics Research, 9-3, 74/92(1990)
- 10) L. L. Whitcomb, A. A. Rizzi and D. E. Koditschek: Comparative Experiments with a New Adaptive Controller for Robot Arms, Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, (1991)
- 11) C. -Y. Su, T. -P. Leung and Q. -J. Zhou: Force/Motion Control of Constrained Robots Using Sliding Mode, IEEE Trans., AC-37-5, 668/672(1992)
- 12) S. Arimoto, Y. H. Liu and T. Naniwa: Model-Based Adaptive Hybrid Control for Geometrically Constrained Robots, Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation, 618/623(1993)
- 13) S. Arimoto, Y. H. Liu and T. Naniwa: Principle of Orthogonalization for Hybrid Control of Robot Arms, Proc. 12th IFAC World Congress, 507/512 (1993)

[著者紹介]

浪花智英

1990年, 大阪大学大学院基礎工学研究科前期課程修了。同年東京大学大学院工学系研究科博士課程入学。同年中退。同年同大学工学部計数工学科助手, 現在に至る。マニピュレータの学習制御・適応制御の研究に従事。IEEE, ロボット学会などの会員。

有本卓 (正会員)

1959年, 京大大学理学部卒業, 同年沖電気工業(株)入社。62年東京大学工学部助手, 67年同講師。68年大阪大学基礎工学部助教授, 73年同教授。88年東京大学工学部計数工学科教授, 現在に至る。情報理論, 制御理論, ロボティクスの研究に従事。IEEE フェロー(工学博士)。

Louis L. WHITCOMB

Louis L. Whitcomb received a B. S. in Mechanical Engineering from Yale University in 1984. From 1984 to 1986 he was a research and development engineer at the GM-Fanuc Robotics Corporation. In 1992 he completed a Ph. D. in Electrical Engineering from Yale University on the topic of adaptive robot control. He is presently completing a post-doctoral fellowships at the University of Tokyo, Japan and the Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Massachusetts, USA. He is a member of the RSJ, IEEE, ACM, and Sigma XI.

劉雲輝 (正会員)

1985年, 北京理工大学精密工学科卒業。89年大阪大学基礎工学研究科修士課程, 92年東京大学工学研究科博士課程修了(工学博士)。同年電子技術総合研究所に入所。IEEE, 日本ロボット学会などの会員。ロボットの運動計画, 非線形制御および人工知能の研究に従事。