ロボットマニピュレータのロバストコントローラの一構成法

蔡 大 維*・山 浦 弘 夫*・師 玉 康 成*

A Design of Robust Controller for Robot Manipulator

Dawei Cai*, Hiroo YAMAURA* and Yasunari SHIDAMA*

In this paper, we propose a robust nonlinear control scheme for the tracking problem of rigid robot manipulator. In the design of this control scheme, Lyapunov stability theory and some important properties of rigid manipulator are used. The closed-loop system with the presented control scheme is globally exponentially stable, and the output tracking error that is shaped by a formula asymptotically converges to zero. Based on this formula, a desired transient error performance may be achieved by choosing appropriate control parameters. Some simulation results are provided for illustrating the performance of this control scheme.

Key Words: robust control, robot control, Lyapunov stability

1. はじめに

この十年来、ロボットマニピュレータの軌道制御または運動制御の研究は多くの研究者の注意を引きつけている。この問題について、いろいろな制御法^{1)~7)}が提案された。Slotine らが PD フィードバックとフルダイナミクスフィードフォワード補償を使って、ロボットマニピュレータダイナミクスの未知パラメータとロードパラメータをオンラインで同定し、適応制御アルゴリズム^{2)~4)}を提案した。マニピュレータのダイナミクスのパラメータの線形特性を利用することによって、これらのアルゴリズムの計算がかなり簡単になる。Spong と Ortega はマニピュレータのあるロバスト制御法と適応制御法^{1),6)}を提案した。これらの制御法の大部分は、閉ループシステムの安定なロバスト性が保証されるが、システムの入力誤差の過渡応答の特性についてはほとんど定式化されていない。もちろん、システムの安定性はコントローラ設計の基本的な要求であるが、よりよい制御性能が要求されるときに、システムの過渡応答の特性の解析が必要である。そこで、ロボットマニピュレータの制御問題として、良好なロバスト特性と要求される追従誤差の過渡応

答をもつロバスト制御法の研究は重要な研究課題になる。

著者らはロボットマニピュレータの軌道制御のために新しいロバスト制御法を提案する。ここで、ロボットマニピュレータ系に、ロボットマニピュレータの部分パラメータが未知であると仮定するが、これらのパラメータの推定値または同定値の獲得が可能である。ほかに提案されているロバスト制御法と違って、本法の特徴は、未知のパラメータをもつロボットマニピュレータにとって、閉ループシステムが大域的な漸近安定が保証されると同時に、定式化される追従誤差も指数的にゼロに収束する。有界の外乱が存在する場合にも、修正した制御法を使って、同様の良好なロバスト性と大域的な指数漸近安定が達成される。さらに、この追従誤差の定式化により、適当な制御パラメータを選択して、要求される追従誤差の過渡応答をもつコントローラを設計することが可能になる。

本論文では、まず、ロボットマニピュレータのダイナミクスの微分方程式とその特性などにより、ロバスト制御法を提案し、さらに、リアプノフ安定理論を使って、この制御法の安定性と収束性について解析し、出力誤差の定式を導出する。外乱のある場合について、提案した制御法を修正し、外乱のある場合のロバスト制御法も提案する。最後に、シミュレーションにより、本法の有効性を示す。

* 信州大学工学部 長野市若里 500

* Faculty of Engineering, Shinshu University, Nagano
(Received September 26, 1994)
(Revised May 29, 1995)

2. 問題の設定

摩擦とその他の外乱がないと仮定すると、一般に n -リンク構造のロボットマニピュレータのダイナミクスはつぎの n 次の2階非線形ベクトル微分方程式 (Euler-Lagrange 方程式) で表現される⁸⁾。

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

ここで、 $q \in R^n$ はジョイント変数ベクトル $\dot{q}(t)$ と $\ddot{q}(t)$ はそれぞれジョイント速度と加速度、 $M(q) \in R^{n \times n}$ は慣性行列とよばれる正定対称行列である。 $V_m(q, \dot{q}) \in R^n$ は遠心力・コリオリ力を含むベクトル関数、 $G(q) \in R^n$ は重力の影響を表わすベクトル、 $\tau(t) \in R^n$ はこのジョイント座標空間に対応した一般化力ベクトルである。

文献8)によって、(1)のように表わすロボットマニピュレータのダイナミクスはつぎの特性がある。

- 1) 慣性行列 $M(q)$ は正定対称で、さらに、 $M(q)$ は一様に上と下に有界である。すなわち

$$\mu_1 I \leq M(q) \leq \mu_2 I \quad (2)$$

である。また、この慣性行列の有界性はつぎのように表示できる。

$$\mu_1 \leq \|M(q)\| \leq \mu_2 \quad (3)$$

- 2) 行列 $\dot{M}(q) - 2V_m$ は歪対称である。すなわち、
 $\forall x \in R^n$

$$x^T(\dot{M}(q) - 2V_m)x = 0 \quad (4)$$

- 3) (1)の左辺はつぎの式で表示できる。

$$M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = W(q, \dot{q}, \ddot{q})\varphi \quad (5)$$

ここで、 $\varphi \in R^m$ はロボットマニピュレータのパラメータベクトル、 $W(q, \dot{q}, \ddot{q})$ はジョイント空間におけるジョイント変数、ジョイント速度とジョイント加速度に関する既知関数行列である。

本論文では、このパラメータベクトル φ は未知であると仮定されるが、この未知パラメータベクトルは同定が可能である。その同定値または推定値は $\hat{\varphi} \in R^m$ で表わす。さらに、 φ と $\hat{\varphi}$ について、(6)の関係がある。

$$\|\hat{\varphi} - \varphi\| \leq \rho \quad (6)$$

ここで、 $\rho \in R^+$ は既知であるから、これは未知パラメータの有界な不確定性を示すことになる。

また、 φ の推定値 $\hat{\varphi}$ について、

$$\hat{M}(q)\ddot{q} + \hat{V}_m(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}(q) = W(q, \dot{q}, \ddot{q})\hat{\varphi} \quad (7)$$

が成立する。そこで、問題はこのようなシステムについて、ロバスト制御 $\tau(t)$ を設計し、ロボットマニピュレータダイナミクスにパラメータの不確定性 $\hat{\varphi}$ のあるシステムを安定させることである。

3. ロバスト追従制御

$q^d \in R^n$ は2次連続微分可能な目標軌道を表わすとす。ロボットマニピュレータはこの目標軌道に沿って、動かなければならない。出力誤差(追従誤差)は

$$\tilde{q} = q - q^d \quad (8)$$

で定義される。 φ の推定値 $\hat{\varphi}$ に対する $\hat{M}$ 、 $\hat{V}_m$ と $\hat{G}$ を使って、目標軌道 q^d に対して、つぎのようなフィードフォワード制御則を構成する。

$$\tau = \hat{M}\dot{s} + \hat{V}_m s + \hat{G} - a\hat{M}r + u \quad (9)$$

ここで、

$$s = \dot{q} - r$$

$$r = \dot{\tilde{q}} + \Lambda \tilde{q}$$

$\Lambda \in R^{n \times n}$ は正定対称なゲイン行列、 a は正定数である。 $\hat{M}$ と $\hat{V}_m$ は特性2)と3)を満足するから、正定数 k_1 と k_2 が存在し、つぎの不等式

$$2k_1 \|r\|^2 \leq \|r^T \hat{M} r\| \leq 2k_2 \|r\|^2 \quad (10)$$

が成り立つ。以上の議論によって、ロボットマニピュレータ制御系について、つぎの結果が導かれる。

《定理1》 正定数 β と ε に対して、つぎのような制御入力 u が選ばれるならば、

$$u = \begin{cases} -\frac{W W^T r \rho^2}{\|r^T W\| \rho + \varepsilon \|r\| e^{-\beta(t-t_0)}} & \|r\| \neq 0 \\ 0 & \|r\| = 0 \end{cases} \quad (11)$$

ロボットマニピュレータダイナミクス(1)と制御則(9)で構成した閉ループシステムは大域的に指数漸近安定性が保証される。

出力誤差 r について、 r のノルムは(12)で決められる。

$$\|r\| \leq \frac{\sqrt{k_2}}{\sqrt{k_1}} \|r_0\| e^{-\alpha(t-t_0)} + \frac{\varepsilon(e^{-\beta(t-t_0)} e^{-\alpha(t-t_0)})}{2k_1(\alpha-\beta)} \quad (12)$$

ここで、 $r_0 = r(t_0)$ 。

特に、初期の時刻 $t=0$ に、 $\tilde{q}(0)=0$ と $\dot{\tilde{q}}(0)=0$ という条件が満たされると、出力誤差 r はつぎのように決められる。

$$\|r\| \leq \frac{\varepsilon(e^{-\beta(t-t_0)} - e^{-\alpha(t-t_0)})}{2k_1(\alpha-\beta)} \quad (13)$$

(証明)

リャプノフ安定理論を利用するために、リャプノフ関数の候補として、つぎのリャプノフ関数

$$V = \frac{1}{2} r^T \hat{M} r \quad (14)$$

を考える。(9)を(1)の τ に代入すると、

$$\begin{aligned} M\ddot{q} + V_m\dot{q} + G &= \hat{M}\dot{s} + \hat{V}_m s + \hat{G} - a\hat{M}r + u \\ &= \hat{M}(\ddot{q} - \dot{r}) + \hat{V}_m(\dot{q} - r) \\ &\quad + \hat{G} - a\hat{M}r + u \end{aligned} \quad (15)$$

となる。(15)と(5)から、

$$\begin{aligned}
\bar{M}\dot{r} + \bar{V}_m r &= (\bar{M} - M)\ddot{q} + (\bar{V}_m - V_m)\dot{q} + (\bar{G} - G) \\
&\quad - a\bar{M}r + u \\
&= W(\bar{\varphi} - \varphi) - a\bar{M}r + u \\
&= W\bar{\varphi} - a\bar{M}r + u
\end{aligned} \quad (16)$$

が導かれる。

時間変数 t に対して、 V の微分を求め、(16) を利用して、

$$\begin{aligned}
\frac{dV}{dt} &= r^T \bar{M}\dot{r} + \frac{1}{2} r^T \dot{\bar{M}}r \\
&= r^T W\bar{\varphi} - ar^T \bar{M}r + r^T u + \frac{1}{2} r^T (\dot{\bar{M}} - 2\bar{V}_m)r \\
&= -2\alpha V + r^T W\bar{\varphi} + r^T u
\end{aligned} \quad (17)$$

$\|r\|=0$ の場合について、(14) と (17) から、

$$V(t)=0$$

$$\frac{dV}{dt}=0$$

となるから、

$$\bar{V}(t) \equiv 0 \quad (18)$$

が成り立つ。ゆえに閉ループシステムは安定である。

$\|r\| \neq 0$ の場合について、(17) と (11) より、

$$\begin{aligned}
\frac{dV}{dt} &= -2\alpha V + r^T W\bar{\varphi} + r^T u \\
&\leq -2\alpha V + \|r^T W\| \rho + r^T u \\
&= -2\alpha V + \|r^T W\| \rho - \frac{r^T W W^T r \rho^2}{\|r^T W\| \rho + \varepsilon \|r\| e^{-\beta(t-t_0)}} \\
&= -2\alpha V + \frac{\|r^T W\| \rho \cdot \varepsilon \|r\| e^{-\beta(t-t_0)}}{\|r^T W\| \rho + \varepsilon \|r\| e^{-\beta(t-t_0)}}
\end{aligned} \quad (19)$$

(19) とつぎの不等式

$$0 \leq \frac{xy}{x+y} \leq y, \quad \forall x, y \geq 0$$

から、

$$\frac{dV}{dt} \leq -2\alpha V + \varepsilon \|r\| e^{-\beta(t-t_0)} \quad (20)$$

が導出される。

(20) と (10) から、

$$\begin{aligned}
V(t) &\leq V(t_0) e^{-2\alpha(t-t_0)} \\
&\quad + \int_{t_0}^t \varepsilon \|r\| e^{-2\alpha(t-\nu)-\beta(\nu-t_0)} d\nu \\
&\leq k_2 \|r_0\|^2 e^{-2\alpha(t-t_0)} \\
&\quad + \int_{t_0}^t \varepsilon \|r\| e^{-2\alpha(t-\nu)-\beta(\nu-t_0)} d\nu
\end{aligned} \quad (21)$$

さらに、補助関数 $V_a(t)$ を

$$\begin{aligned}
V_a(t) &= \left[k_2 \|r_0\|^2 e^{-2\alpha(t-t_0)} + \int_{t_0}^t \varepsilon \|r\| e^{-2\alpha(t-\nu)-\beta(\nu-t_0)} d\nu \right]^{\frac{1}{2}}
\end{aligned} \quad (22)$$

のように定義し、その補助関数の微分を求めると

$$\frac{dV_a}{dt} \leq -\alpha V_a + \frac{\varepsilon}{2} \frac{\|r\|}{V_a} e^{-\beta(t-t_0)} \quad (23)$$

を得る。

(21)、(22) と (10) から、不等式

$$V_a(t) \geq \sqrt{V(t)} \geq \sqrt{k_1} \|r\| \quad (24)$$

が成り立つ。

(24) をつぎのように書き直す。

$$\frac{\|r\|}{V_a} \leq \frac{1}{\sqrt{k_1}} \quad (25)$$

(23) と (25) を使って、

$$\frac{dV_a}{dt} \leq -\alpha V_a + \frac{\varepsilon}{2\sqrt{k_1}} e^{-\beta(t-t_0)} \quad (26)$$

が導かれ、

$$\begin{aligned}
V_a(t) &\leq V_a(t_0) e^{-\alpha(t-t_0)} \\
&\quad + \frac{\varepsilon}{2\sqrt{k_1}} \int_{t_0}^t e^{-\beta(\nu-t_0)+\alpha(\nu-t_0)} d\nu \\
&\leq \sqrt{k_2} \|r_0\| e^{-\alpha(t-t_0)} + \frac{\varepsilon(e^{-\beta(t-t_0)} - e^{-\alpha(t-t_0)})}{2\sqrt{k_1}(\alpha-\beta)}
\end{aligned} \quad (27)$$

となる。さらに、(27) と (24) より (12) が得られる。

$t=0$ のときに、 $\bar{q}(0)=0$ と $\dot{\bar{q}}(0)=0$ が満たされると、

$$r(0) = \dot{\bar{q}}(0) + A\bar{q}(0) = 0$$

であるから、

$$\|r_0\| = \|r(0)\| = 0$$

となる。(12) より、(13) が簡単に導かれる。

そこで、これは有界な不確定性のある未知パラメータ φ をもつロボットマニピュレータダイナミクス(1)、ロバスト制御則(9)と制御入力(11)で構成する閉ループシステムの大域的に指数漸近安定性を示す。 ■

この定理において、出力誤差は指数漸近的にゼロに収束し、そのノルムの大きさは(12)で決められる。適当なパラメータを選択することによって、要求されるシステム過渡応答も得られる。

4. 外乱存在の場合のロバスト制御

この章では、有界の外乱が存在する場合に対して、ロバスト制御法を提案する。

外乱のあるロボットマニピュレータのダイナミクスを

$$M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau + \tau_d \quad (28)$$

ように表わし、この外乱 τ_d の有界性について、

$$\|\tau_d\| \leq K_d < \infty \quad (29)$$

である。前の章で提案した制御則を修正し、新しい制御則は(30)となる。

$$\tau = \bar{M}\dot{s} + \bar{V}_m s + \bar{G} - a\bar{M}r - K_a \text{sgn}(r) + u \quad (30)$$

ここで、 u は(11)と同じように定義する。

この修正した制御則を使って、つぎの結果を得る。

《定理2》 ロボットマニピュレータダイナミクス(28)と制御則(30)および制御入力(11)で構成する閉ループは大域的に指数漸近安定であり、追従誤差は(12)で決められ

る。

(証明)

定理1の証明と同じように、(31)のような関数をリャプノフ関数の候補として定義する。

$$V = \frac{1}{2} \dot{r}^T \bar{M} \dot{r} \quad (31)$$

(28), (30)と(5)より、

$$\bar{M} \dot{r} + \bar{V}_m r = W \bar{\varphi} - \alpha \bar{M} r + \tau_d - K_d \text{sgn}(r) + u \quad (32)$$

となる。時間に対して V の微分を行い、(32)を使って、

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= -\alpha r^T \bar{M} r + r^T W \bar{\varphi} + r^T \tau_d \\ &\quad - r^T K_d \text{sgn}(r) + r^T u \\ &\leq -2\alpha V + r^T W \bar{\varphi} + r^T u \end{aligned} \quad (33)$$

となる。そこで、前の章の定理の証明と同じように、閉ループシステムは大域的指数安定であるということが証明できる。

そこで、制御則(30)を使って、有界の不確定なパラメータと有界の外乱が存在しても、閉ループは大域的な指数安定性が保証される。

5. 数 値 例

前章で提案したロバスト制御法の有効性を確認するために、Fig. 1 に示す2リンクロボットマニピュレータに対して軌道制御のシミュレーション実験を行った。この2リンクロボットマニピュレータダイナミクスはつぎの微分方程式で表わされる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{m11} & V_{m12} \\ V_{m21} & V_{m22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_{1d} \\ \tau_{2d} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ここで、

$$M_{11} = (a_1^2 m_1 + m_2) l_1^2 + m_2 a_2^2 l_2^2 + 2m_2 a_2 l_1 l_2 \cos \theta_2$$

$$M_{12} = m_2 a_2^2 l_2^2 + m_2 a_2 l_1 l_2 \cos \theta_2$$

$$M_{21} = m_2 a_2^2 l_2^2 + m_2 a_2 l_1 l_2 \cos \theta_2$$

$$M_{22} = m_2 a_2^2 l_2^2$$

Fig. 1 A2-DOF revolute joint manipulator

$$V_{m11} = -\dot{\theta}_2 m_2 a_2 l_1 l_2 \sin \theta_2$$

$$V_{m12} = -(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) m_2 \theta_2 l_1 l_2 \sin \theta_2$$

$$V_{m21} = m_2 \dot{\theta}_1 a_2 l_1 l_2 \sin \theta_2$$

$$V_{m22} = 0$$

$$G_1 = (a_1 m_1 + m_2) g l_1 \sin \theta_1 + m_2 g a_2 l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2)$$

$$G_2 = m_2 g a_2 l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2)$$

m_1, m_2 と l_1, l_2 はそれぞれこの2リンクロボットマニピュレータの各リンクの質量と長さで、 τ_1 と τ_2 は制御トルクで、 τ_{1d} と τ_{2d} は外乱のトルクである。また、 a_1 と a_2 はそれぞれリンク1とリンク2の重心位置とそのリンクの長さの比を表わす。

ロボットマニピュレータの物理パラメータの真値と推定値はTable 1のように設定する。

$$l_1 = 0.380, \quad l_2 = 0.290$$

とする。さらに、つぎのようなパラメータベクトルを選ぶ。

$$\varphi = [\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4]$$

ここで、

$$\varphi_1 = a_1^2 m_1 + m_2$$

$$\varphi_2 = m_2 a_2^2$$

$$\varphi_3 = m_2 a_2$$

$$\varphi_4 = a_1 m_1 + m_2$$

制御パラメータはつぎのように決められる。

$$\rho = 0.08$$

$$\varepsilon = 0.5$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 200 & 0 \\ 0 & 300 \end{bmatrix}$$

$$\alpha = 120.0$$

$$\beta = 0.01$$

case I) 外乱のない場合のロバスト制御の結果をFig.

2に示す。ここで、目標軌道は

$$q_1^d = \frac{7\pi}{12} (1 - (1+5t)e^{-5t}) - \frac{\pi}{4},$$

$$q_2^d = \frac{11\pi}{15} (1 - (1+6t)e^{-6t}) + \frac{\pi}{3}$$

のように選ばれ、手先の初期状態は目標軌道の初期状態と同じように設定される。すなわち

$$q_1(0) = q_1^d(0) = -\frac{\pi}{4}, \quad q_2(0) = q_2^d(0) = \frac{\pi}{3},$$

$$\dot{q}_1(0) = \dot{q}_1^d(0) = 0, \quad \dot{q}_2(0) = \dot{q}_2^d(0) = 0.$$

であるから、 $\|r_0\| = 0$ が満たされる。

case II) 外乱のない場合には、目標軌道は

Table 1 Physical parameters of robot

	m_1	m_2	a_1	a_2
True Values	1.4	0.8	0.50	0.50
Estimated Values	1.5	0.9	0.52	0.48

(a) Joint trajectories for case I

(b) Tracking error for case I

Fig. 2

(a) Joint trajectories for case II

(b) Tracking error for case II

Fig. 3

$$q_1^d = \frac{\pi}{6} \sin \frac{\pi}{3} t,$$

$$q_2^d = \frac{\pi}{5} \sin \frac{\pi}{2} t$$

のように選ばれ、手先の初期状態が

$$q_1(0)=0, \quad q_2(0)=0.,$$

$$\dot{q}_1(0)=0., \quad \dot{q}_2(0)=0.$$

であるときのロバスト制御の結果を Fig. 3 に示す。

ここで、 $\|r_0\|=0$ が満たされないことに注意すべきである。

(a) Joint trajectories for case III

(b) Tracking error for case III

Fig. 4

case III) case IIと同じ目標軌道と手先の初期状態を使うが⁵、外乱として、

$$\tau_{1d}=0.5, \tau_{2d}=0.5$$

を設定すると、ロバスト制御の結果は Fig. 4 のようになる。

シミュレーションの結果により、外乱と初期追従誤差が存在しないときに、出力追従誤差が非常に短い時間で収束し、外乱と初期追従誤差が同時に存在しても、良好な安定性と収束性を示した。以上のシミュレーションの結果により、提案したロバストコントローラは良好なロバスト性と速い収束性を表わし、本法の有効性が確認された。

6. 終わりに

未知のパラメータと外乱をもつロボットマニピュレータの軌道追従制御のために、ロボットマニピュレータのリンクパラメータと負荷パラメータの線形化特性などを活用し、新しいロバスト制御法を提案した。さらに、リアプノフ関数とその補助関数を定義し、ロバスト制御を使う閉ループシステムの安定性について考察した。この考察とシミュレーションの結果によって、閉ループシステムは良好な大域的な指数安定性をもつことがわかり、システムの出力誤差についても定式化され、この定式化によって適当な制御パラメータを選択して、要求される過渡応答で制御することが可能である。

今後の課題として、よりよい制御性能をもつ新しい適応制御法を研究する予定である。

なお、本研究は一部、平成6年度文部省科学研究費補

助金(特別研究員奨励費 4991)の補助を受けて行った。記して感謝する。

参 考 文 献

- 1) M. W. Spong: On the Robust Control of Robot Manipulators, IEEE Trans., AC-37-11, 1782/1786 (1992)
- 2) J. J. E. Slotine: Putting Physics in Control: the Example of Robotics, IEEE Contr. Syst. Mag., 6-3, 12/17, Fall (1987)
- 3) J. J. E. Slotine and W. Li: On the Adaptive Control of Robot Manipulators, Int'l. J. Robot Res., 6-3, 49/59, Fall (1987)
- 4) J. J. E. Slotine and W. Li: Adaptive Manipulator Control: A Case Study, IEEE Trans., AC-33-11, 995/1003 (1988)
- 5) M. W. Spong and R. Ortega: On Adaptive Inverse Dynamics Control of Rigid Robots, IEEE Trans., AC-35-1, 92/95 (1992)
- 6) R. Ortega and M. W. Spong: Adaptive Motion Control of Rigid Robots: A Tutorial, Automatica, 25-6, 877/888 (1989)
- 7) R. Shoureshi, M. E. Momot and M. D. Roesler: Robust Control for Manipulators with Uncertainties, Automatica, 26-2, 353/359 (1990)
- 8) F. L. Lewis, C. T. Abdallah and D. M. Dawson: Control of Robot Manipulators, Macmillan Publishing Company (1993)
- 9) M. W. Spong and M. Vidyasagar: Robot Dynamics and Control, New York, John Wiley (1989)

[著 者 紹 介]

蔡 大 維 (正会員)

1987年, 西安交通大学大学院修士課程修了。同年同大学助手, 講師。91年華南理工大学講師。95年信州大学工学系研究科博士後期課程修了。日本学術振興会特別研究員。現在信州大学工学部助手。最適制御, ロボット制御などに関する研究に従事(工学博士)。

山 浦 弘 夫 (正会員)

1956年, 信州大学工学部通信工学科卒業。57年防衛大学校勤務。88年信州大学工学部情報工学科教授(工学博士)。主として最適制御理論に関する研究に従事。電気学会, 情報処理学会などの会員。

師 玉 康 成 (正会員)

1978年, 法政大学工学部建築工学科卒業。85年防衛大学校理工学研究科電子工学電子計算修了。90年信州大学工学部勤務, 情報工学科教授(工学博士)。主として, 最適化理論の研究に従事。電気学会の会員。