

# ロボットマニピュレータのロバストな軌道制御

逢坂 一正・藤本 真作

岡山理科大学工学部機械工学科

(平成3年9月30日 受理)

## 1. はじめに

近年、ロボットマニピュレータの制御において、手先質量変化などのパラメータ変化に対応するため、リアプノフの安定定理に基づくロバストな軌道追従制御を実現する方法が多数提案されている<sup>1~5)</sup>。これらの方式では、リアプノフ関数としてマニピュレータの動特性に無関係なものを選ぶ方法<sup>1),2)</sup>とその動特性を考慮したものを選ぶ方法<sup>3)~5)</sup>に分類できる。

後者の方法を用いると、マニピュレータのパラメータのもつ不確実性を入力で直接的に補償できる。しかし、得られる情報は可能なかぎり用いて制御性能の向上をはかることを目指した参考文献5)の方法においても、サーボモータ系(マニピュレータ駆動系)のもつ正回転と逆回転で特性の変わることは考慮されていない。

そこで、本論文では、参考文献5)の方法を修正することにより、サーボモータ系の正回転、逆回転で異なる特性をもつマニピュレータ制御系について検討する。そして、パラメータに不確実要素が存在しても制御誤差が指定した誤差精度内に収束するロバスト制御系の一設計法を提案する。

さらに、ロバスト補償における制御誤差が正回転、逆回転を区別しない従来の方法より低減できることを、2自由度マニピュレータを用いた実験結果を用いて示す。

## 2. 制御対象の記述

図1に示すような回転関節をもつ $n$ 自由度マニピュレータの運動方程式は、一般に次式のように表わされる。

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + f(\theta, \dot{\theta}) = \tau \quad (1)$$

ここで、 $\theta \in \mathbb{R}^n$ 、 $M(\theta) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 、 $C(\theta, \dot{\theta}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 、 $f(\theta, \dot{\theta}) \in \mathbb{R}^n$ 、 $\tau \in \mathbb{R}^n$  はそれぞれ関節角ベクトル、正定対称な慣性行列、遠心力・コリオリ力に関する行列、粘性摩擦・重力による非線形ベクトル、入力トルクベクトルである。

サーボモータ系の特性(制御入力と生成トルクの関係)は、次式の線形関係で表されるものとする。

$$\tau = Ku \quad (2)$$

ここで、 $u \in \mathbb{R}^n$  はモータ系への制御入力であり、 $K \in \mathbb{R}^{n \times n}$  は対角行列で、正回転と逆回転で次式のように異なるものとする。

$$K = \begin{cases} \text{diag}(k_1, k_2, \dots, k_n) : & \text{正回転} \\ \text{diag}(k'_1, k'_2, \dots, k'_n) : & \text{負回転} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $k_i, k'_i (i=1, 2, \dots, n)$  はすべて正定数である。(1), (2)式より、次式を得る。

$$K^{-1}[M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + f(\theta, \dot{\theta})] = u \quad (4)$$

ここで、 $K^{-1}$  は  $K$  の逆行列である。

このようなマニピュレータに関して、以下のような仮定が満足されるものとする。

仮定1：状態量  $\theta, \dot{\theta}$  は観測可能である。

仮定2：(4)式の左辺は、観測可能な部分を含まない行列と観測可能な部分からなるベクトルの積で表わされ、次式のような構造をもつものとする<sup>6)</sup>。

$$\begin{aligned} & K^{-1}[M(\theta)\ddot{r} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{r} + f(\theta, \dot{\theta})] \\ & = K^{-1} \sum_{k=1}^v E_k(\phi_k) y_k(\theta, \dot{\theta}, \dot{r}, \ddot{r}) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $\phi_k \in \mathbb{R}^{q_k}$ ,  $r \in \mathbb{R}^n$ ,  $E_k(\phi_k) \in \mathbb{R}^{p_k \times n}$ ,  $y_k(\theta, \dot{\theta}, \dot{r}, \ddot{r}) \in \mathbb{R}^n$  はそれぞれ物理パラメータ

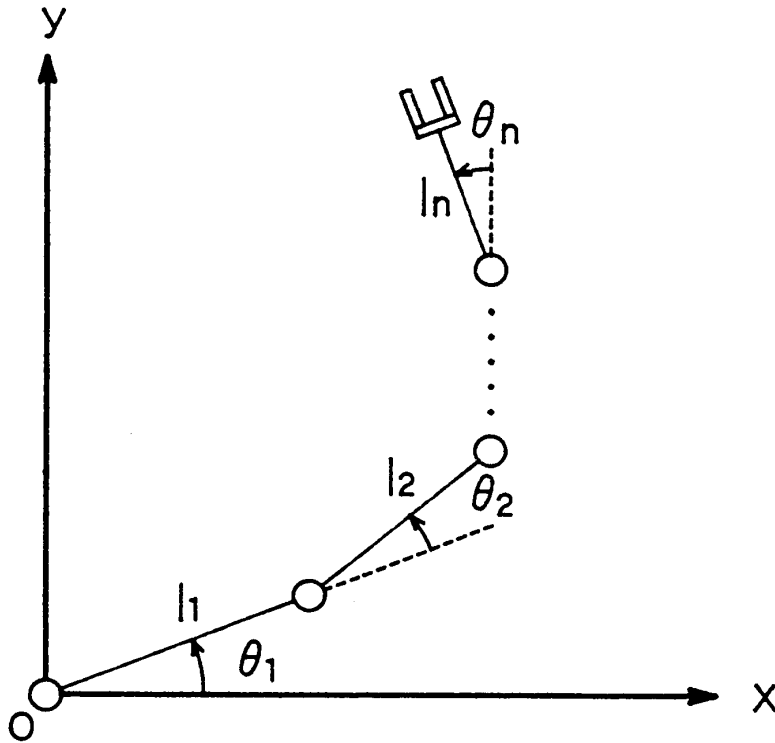


図1 n自由度マニピュレータの概略図

ベクトル, 観測可能な変数ベクトル, 物理パラメータのみからなる行列, 観測可能な変数部分からなるベクトルである。

仮定3:  $\phi_k$  は未知であってもよいが, 有界でその存在範囲は既知である。

### 3. 制御系の構成

関節角目標軌道ベクトルが  $\theta_d \in \mathbb{R}^n$  で与えられているとき, 関節角誤差  $e \in \mathbb{R}^n$  を次式で定義する。

$$e \triangleq \theta - \theta_d \tag{6}$$

このとき, (4)式で表わされるマニピュレータに対して, 関節角誤差  $e$  が任意に指定した誤差内に収束するような制御入力  $u$  の設計について考える。

#### 3.1 制御則の記述

制御入力  $u$  を, マニピュレータの物理パラメータの推定値を用いる線形化補償  $u_L$  と補償しきれなくて生じる誤差を補正するロバスト補償  $u_R$  の和として考え, 次式とする。

$$u = u_L + u_R \tag{7}$$

また, 拡張誤差ベクトル  $s \in \mathbb{R}^n$  を次式で定義する。

$$s \triangleq \dot{e} + \Lambda e \tag{8}$$

$$\Lambda \triangleq \text{diag}(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) \tag{9}$$

ただし,  $\mu_i$  は重み係数で正数である。このとき, 制御則は以下のようなになる。

線形化補償: 2. の仮定3より  $\phi_k$  は存在範囲が既知なので, その推定値を  $\hat{\phi}_k$  として  $u_L$  を次式のように決める。

$$u_L = \sum_{k=1}^v E_k(\hat{\phi}_k) y_k(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}_m, \dot{\theta}_m) \tag{10}$$

ここで,  $\theta_m$  は次式で表わされる修正目標軌道である。

$$\theta_m = \theta_d - \Lambda \int_{t_0}^t e dt \tag{11}$$

ここで,  $t_0$  は制御開始時刻,  $t$  は現在時刻である。

ロバスト補償:  $u_R$  として次式のもの考える。

$$u_R = -\frac{s}{\|s\| + \delta} \left(1 + \frac{\delta}{\gamma}\right) xh(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}_m, \dot{\theta}_m) \tag{12}$$

ここで,  $\gamma > 0$  は誤差精度を指定するパラメータであり,  $\delta > 0$  は制御入力の連続性を保証

するための設計パラメータであり、 $\alpha$  は次式を満たす正定数である。

$$\alpha \triangleq \sqrt{\beta/\alpha} \quad (13)$$

$$\alpha \triangleq \min_{\theta} \{\lambda_{\min}(M(\theta))\} \quad (14)$$

$$\beta \triangleq \max_{\theta} \{\lambda_{\max}(M(\theta))\} \quad (15)$$

ここで、 $\lambda_{\min}(M(\theta))$ 、 $\lambda_{\max}(M(\theta))$ はそれぞれ行列  $M(\theta)$  の最小固有値、最大固有値である。また、 $h(\theta, \dot{\theta}, \dot{\theta}_m, \ddot{\theta}_m)$ は次式を満たす可変スカラゲインである。

$$h(\theta, \dot{\theta}, \dot{\theta}_m, \ddot{\theta}_m) = \sum_{k=1}^v \bar{E}_k \|y_k(\theta, \dot{\theta}, \dot{\theta}_m, \ddot{\theta}_m)\| + \eta \quad (16)$$

ここで、 $\|y_k(\theta, \dot{\theta}, \dot{\theta}_m, \ddot{\theta}_m)\|$  はベクトル  $y_k(\theta, \dot{\theta}, \dot{\theta}_m, \ddot{\theta}_m)$  のユークリッドノルムを表わし、 $\eta$  は任意の正定数、 $\bar{E}_k$  は次式を満たす正定数である。

$$\bar{E}_k > \|E_k(\hat{\phi}_k - \phi_k)\| \quad (17)$$

ここで、 $\|E_k(\hat{\phi}_k - \phi_k)\|$  は行列  $E_k(\hat{\phi}_k - \phi_k)$  の最大特異値を表わす。なお、(12)式における  $\alpha h(\theta, \dot{\theta}, \dot{\theta}_m, \ddot{\theta}_m)$  を切り換えゲインと呼ぶことにする。

### 3.2 制御誤差の評価

本節では、(4)式で表されるマニピュレータに対して(7)、(10)、(12)式で表わされる制御入力を加えれば、誤差  $e$  は有界となり、かつある範囲内に収束することを示す。

[補題1]

次式の非負関数を考える。

$$V(t) = s^T M(\theta) s \quad (18)$$

ここで、 $s^T$  は  $s$  の転置を表わす。(4)式で表されるマニピュレータに対して(7)、(10)、(12)式で表わされる制御入力を加えると、次式が成立する。

$$\dot{V}(t) < 0 \quad \text{if} \quad \|s(t)\| \geq \gamma/\alpha \quad (19)$$

(証明) (8)式は(11)式を用いると、

$$s = \dot{\theta} - \dot{\theta}_m \quad (20)$$

と表わせることに注意して、(18)式を(4)式に沿って時間微分し、2. の仮定2を用いると、次式を得る。

$$\dot{V}(t) = 2s^T \dot{M}s + s^T \dot{M}s$$

$$\begin{aligned}
 &= s^T[(M+M^T)s + 1/2(\dot{M} + \dot{M}^T)s] \\
 &= 2s^T[Ms + Cs] \\
 &= 2s^T[u - \{M\dot{\theta}_m + C\dot{\theta}_m + f\}] \\
 &= 2s^T[u - \sum_{k=1}^v E_k(\phi_k)y_k(\theta, \dot{\theta}, \dot{\theta}_m, \ddot{\theta}_m)] \tag{21}
 \end{aligned}$$

ただし、ここで  $\dot{M} - 2C$  が交代行列であることを用いた。さらに、 $x \geq 1$  および  $\|s(t)\| \geq \gamma/x$  に注意して、(21) 式に (7), (10), (12) 式を代入すると、次式を得る。

$$\begin{aligned}
 \dot{V}(t) &= 2s^T[u_R - \sum_{k=1}^v E_k(\hat{\phi}_k - \phi_k)y_k(\theta, \dot{\theta}, \dot{\theta}_m, \ddot{\theta}_m)] \\
 &< - \frac{2\delta x \|s\|}{\gamma(\|s\| + \delta)} (\|s\| - \frac{\gamma}{x}) h(\theta, \dot{\theta}, \dot{\theta}_m, \ddot{\theta}_m) \tag{22}
 \end{aligned}$$

これより、(19) 式が成立する。

〔補題 2〕 (18) 式の正定値関数  $V(t)$  が任意の  $\gamma > 0$  に対して、次式を満たすとき

$$\dot{V}(t) < 0 \quad \text{if } \|s(t)\| \geq \gamma/x \tag{23}$$

ある有界な時刻  $t_M \geq t_0$  が存在し、次式が成立する。

$$\|s(t)\| \leq \begin{cases} \max\{\gamma, x \|s(t_0)\|\} & \text{for } \forall t \geq t_0 \\ \gamma & \text{if } t \geq t_M \end{cases} \tag{24}$$

(証明) (18), (14), (15) 式より次式が成立する。

$$\alpha \|s(t)\|^2 \leq V(t) \leq \beta \|s(t)\|^2 \tag{25}$$

(i)  $\|s(t_0)\| \leq \gamma/x$  の場合

(23), (25) 式より、次式が成立する。

$$\alpha \|s(t)\|^2 \leq V(t) \leq \beta \gamma^2/x^2 \tag{26}$$

よって、(24) 式が成立する。

(ii)  $\|s(t_0)\| > \gamma/x$  の場合

(23) 式より、

$$\dot{V}(t) < 0 \quad \text{if } t_0 \leq t \leq t_M \tag{27}$$

となる時刻  $t_M$  が存在し、(25) 式より、次式を得る。

$$\alpha \|s(t)\|^2 \leq V(t) \leq V(t_0) \leq \beta \|s(t_0)\|^2 \quad \text{if } t_0 \leq t \leq t_M \tag{28}$$

また、時刻  $t_M$  以後は (i) と同様なので (24) 式が成立する。

〔補題 3〕

(8) 式で表わされる拡張誤差システムに対して任意の  $\rho > 0$  が与えられるとき、

$$\|s(t)\| \leq \rho \quad \text{for } \forall t \geq t_0 \quad (29)$$

が満足されていれば、ある有界な時刻  $t_1 \geq t_0$  が存在し、次式が成立する。

$$|e_i(t)| \leq \begin{cases} \max\{\rho/\mu_i, |e_i(t_0)|\} & \text{for } \forall t \geq t_0 \\ \rho/\mu_i & \text{if } t \geq t_1 \end{cases} \quad (30)$$

(証明) 次式のような非負関数を考える。

$$v_i(t) = e_i(t)^2 \quad (31)$$

(29) 式より、

$$|s_i(t)| \leq \|s(t)\| \leq \rho \quad (32)$$

であることに注意して、(31) 式を時間微分し、(8) 式を代入すると、次式を得る。

$$\dot{v}_i \leq -2|e_i|(\mu_i|e_i| - \rho) \quad (33)$$

よって、

$$\dot{v}_i < 0, \quad \text{if } |e_i| > \rho/\mu_i \quad (34)$$

が成立するので、(30) 式が成立する。

以上の補題 1, 補題 2, 補題 3 より、次の命題を得る。証明は明らかなので略す。

〔命題〕

(4) 式で表わされるマニピュレータに制御入力 (7), (10), (12) 式を加えると、ある時刻  $T_1$  が存在し、次式が成立する。

$$|e(t)| \leq \begin{cases} \varepsilon_i^{\max} & \text{for } \forall t \geq t_0 \\ \varepsilon_i & \text{if } t \geq T_1 \end{cases} \quad (35)$$

ここで、 $\varepsilon_i, \varepsilon_i^{\max}$  は次式で表わされる。

$$\varepsilon_i = \gamma/\mu_i \quad (36)$$

$$\varepsilon_i^{\max} = \max\{\varepsilon_i, |e_i(t_0)|, (x/\mu_i) \|s(t_0)\|\} \quad (37)$$

また、 $\varepsilon_i^{\max}$  はマニピュレータの初期状態に起因する制御誤差である。

この命題より、逆に各関節の誤差精度  $\varepsilon_{di}$  が指定されたとき、これを達成するためには、

$\gamma$  を次式に選べばよい。

$$\gamma = \min_i \{ \mu_i \epsilon_{di} \} \tag{38}$$

なぜなら (36) 式より，次式となるからである。

$$\epsilon_i = \gamma / \mu_i = 1 / \mu_i \min_i \{ \mu_i \epsilon_{di} \} < \epsilon_{di} \tag{39}$$

以上の証明において，(21) 式の第 2 項は観測可能なものと可能でないものとに分離され，制御入力で直接補償できる形になっているので，制御系設計において見通しのよい表現となっている。また，線形化補償  $u_L$  は  $\dot{V}$  を負定化するのにマニピュレータのもつ構造をできるだけ利用するものとなっているので，ロバスト補償における切り換えゲインの低減が期待できる。

#### 4. 実 験

本制御則の有効性を示すために，図 2 に示す 2 自由度マニピュレータを用いて実験を行なう。本マニピュレータのリンク質量  $m_i$ ，重心まわりの慣性モーメント  $I_i$ ，関節間距離  $l_i$ ，関節から重心までの距離  $l_{gi}(i = 1, 2)$  とし，

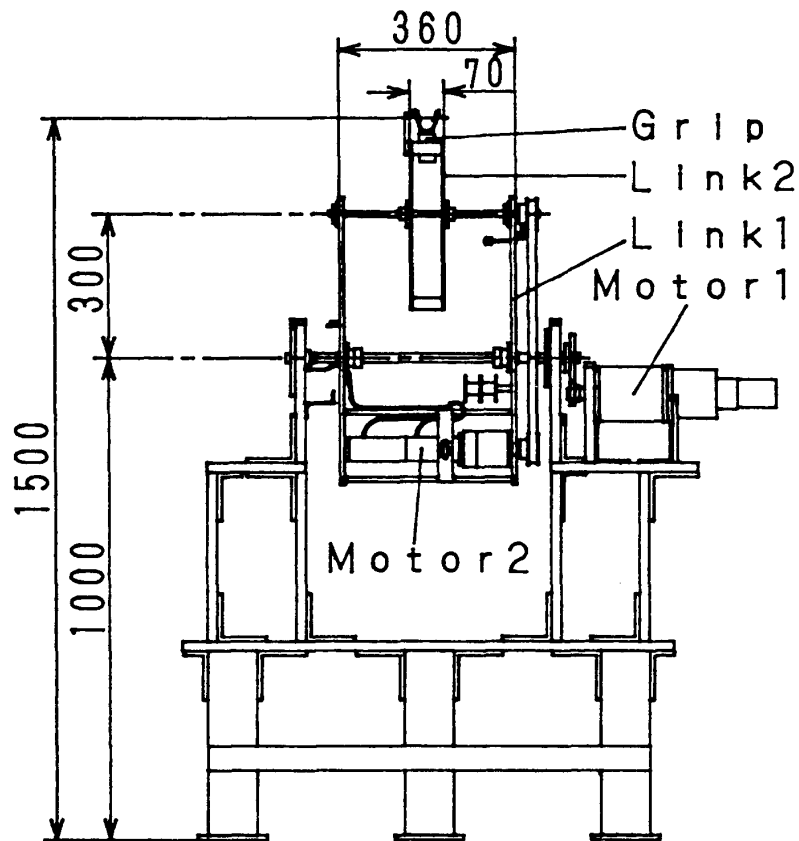


図 2 実験用 2 自由度マニピュレータの略図

$$\phi_1 = m_1 l_{g1}^2 + I_1 + m_2 l_1^2, \phi_2 = m_2 l_1 l_{g2}, \phi_3 = m_2 l_{g2}^2 + I_2$$

とおくと、マニピュレータの運動方程式は、(1), (2) 式より次式のように表わされる。

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + f(\theta, \dot{\theta}) = Ku \quad (40)$$

ただし、 $\theta = [\theta_1, \theta_2]^T$ ,  $u = [u_1, u_2]^T$

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} \phi_1 + \phi_3 + 2\phi_2 C_2 & \phi_3 + \phi_2 C_2 \\ \phi_3 + \phi_2 C_2 & \phi_3 \end{bmatrix}$$

$$C(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} -2\phi_2 S_2 \dot{\theta}_2 & -\phi_2 S_2 \dot{\theta}_2 \\ -\phi_2 S_2 \dot{\theta}_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$f(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} d_1 \dot{\theta}_1 + g((m_1 l_{g1} + m_2 l_1)C_1 + m_2 l_{g2} C_{12}) \\ d_2 \dot{\theta}_2 + g m_2 l_{g2} C_{12} \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} : \text{正回転} \quad K = \begin{bmatrix} k_1' & 0 \\ 0 & k_2' \end{bmatrix} : \text{負回転}$$

ここで、 $S_i \triangleq \sin \theta_i$ ,  $C_i \triangleq \cos \theta_i$ ,  $S_{ij} \triangleq \sin(\theta_i + \theta_j)$ ,  $C_{ij} \triangleq \cos(\theta_i + \theta_j)$  ( $i = 1, 2, j = 1, 2$ ),  $d_i$  は粘性摩擦係数、 $g$  は重力加速度である。

(40) 式の左辺を (5) 式の右辺の形に分解する  $E_k$ ,  $y_k$  は、次式のようになり、仮定 2 を満たしていることが確認できる。

$$E_1 = \begin{bmatrix} \phi_1 + \phi_3 & \phi_3 \\ \phi_3 & \phi_3 \end{bmatrix} \quad E_2 = \begin{bmatrix} 2\phi_2 & \phi_2 \\ \phi_2 & 0 \end{bmatrix} \quad E_3 = \begin{bmatrix} \phi_2 & 0 \\ 0 & \phi_2 \end{bmatrix}$$

$$E_4 = \begin{bmatrix} d_1 & 0 \\ 0 & d_2 \end{bmatrix} \quad E_5 = \begin{bmatrix} g(m_1 l_{g1} + m_2 l_1) & g m_2 l_{g2} \\ 0 & g m_2 l_{g2} \end{bmatrix}$$

$$y_1 = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad y_2 = \begin{bmatrix} C_2 \dot{\theta}_1 \\ C_2 \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad y_3 = \begin{bmatrix} -S_2(2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \\ -S_2 \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix}$$

$$y_4 = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad y_5 = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_{12} \end{bmatrix}$$

制御系の構成を図 3 に示す。パソコンからの制御入力、D/A コンバータ、電流増幅器を介してサーボモータに伝えられ、各リンクを駆動させる。また、パソコンからのタイミング信号は、パラレル I/O を経て、グリップの開閉指令となる。一方、サーボモータに取り付けられているエンコーダによって検出された回転角は、カウンタを介してパソコンにデータとして取り入れられ、各リンクごとのフィードバック信号を生成する。図中の矢印  $\rightarrow$  は電気信号、矢印  $\Rightarrow$  は力の伝達方向を表わしている。マニピュレータの主な力学的パラ



メータを表1にまとめておく。

目標軌道を図4に示すように与える。この軌道は、フーリエ級数を用いて、つぎのように表わせる<sup>7)</sup>。

$$\theta(t) = \begin{cases} \sum_{j=1}^w (a_{ij} \cos \frac{2\pi j}{T} t + b_{ij} \sin \frac{2\pi j}{T} t) & \text{for } 0 \leq t \leq 0.9 (\text{正回転}) \\ \sum_{j=1}^w (a_{ij} \cos \frac{2\pi j}{T} t + b_{ij} \sin \frac{2\pi j}{T} t) & \text{for } 0.9 \leq t \leq 1.8 (\text{負回転}) \end{cases} \quad (41)$$

$$\text{for } 0.9 \leq t \leq 1.8 (\text{負回転}) \quad (42)$$

ただし、iはリンク番号、jはフーリエ項番号、Tは制御時間を表わし、図4の具体例ではT=0.9[s]である。また図4の具体例では、w=10、(41)、(42)式のフーリエ係数は、すべてのa<sub>ij</sub>は0であり、b<sub>ij</sub>の値は表2に示す値である。

誤差精度をε<sub>d1</sub> = ε<sub>d2</sub> = 0.03 [rad]と指定し、実験に用いる参考文献4)の方法で、各制御パラメータを表3のように与える。回転方向を考慮しないときの行列Kの要素の値は、正回転、負回転の場合の平均値を用いることにする。

実験結果の一例を図5、図6に示す。図の左側の結果が回転方向を考慮しない場合のもの、右側の結果が回転方向を考慮した場合のものである。e、ėとも右側の結果のほうが小さな値になっている、とくに、link 2にその差が顕著に表れている。この実験結果のときの制御入力を図7に示す。右側の回転方向を考慮した場合のほうが微妙な調整を行なっている。

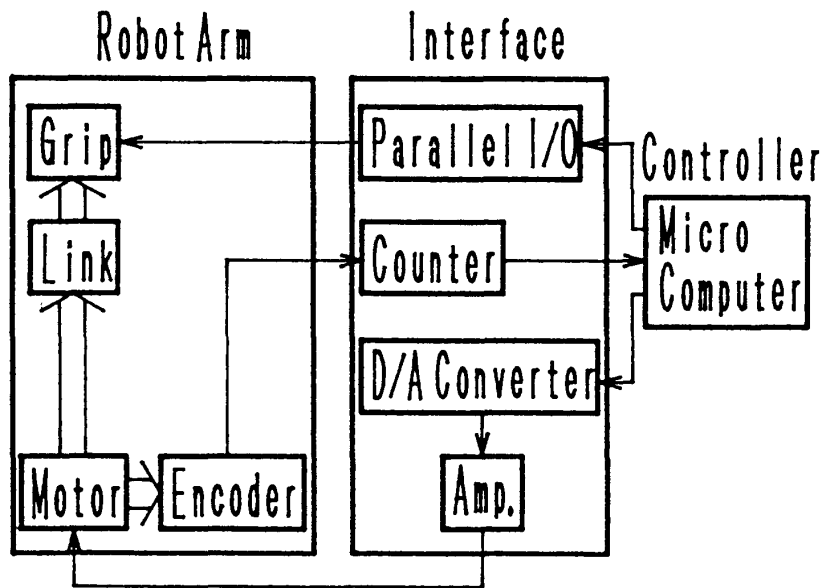


図3 制御系のブロック線図

表1 2リンクマニピュレータの力学的パラメータ

		Link 1	Link 2
Length between adjacent joints	[m]	0.300	0.200
Weight	[kg]	12.13	2.49
Reduction ratio of servomotor		1/20	1/5
Rated torque of servomotor	[Nm]	9.55E-1	3.19E-1
Moment of inertia	[kgm <sup>2</sup> ]	5.25E-1	2.30E-2
Coefficient of viscosity	[Nms/rad]	4.10E-1	2.39E-2

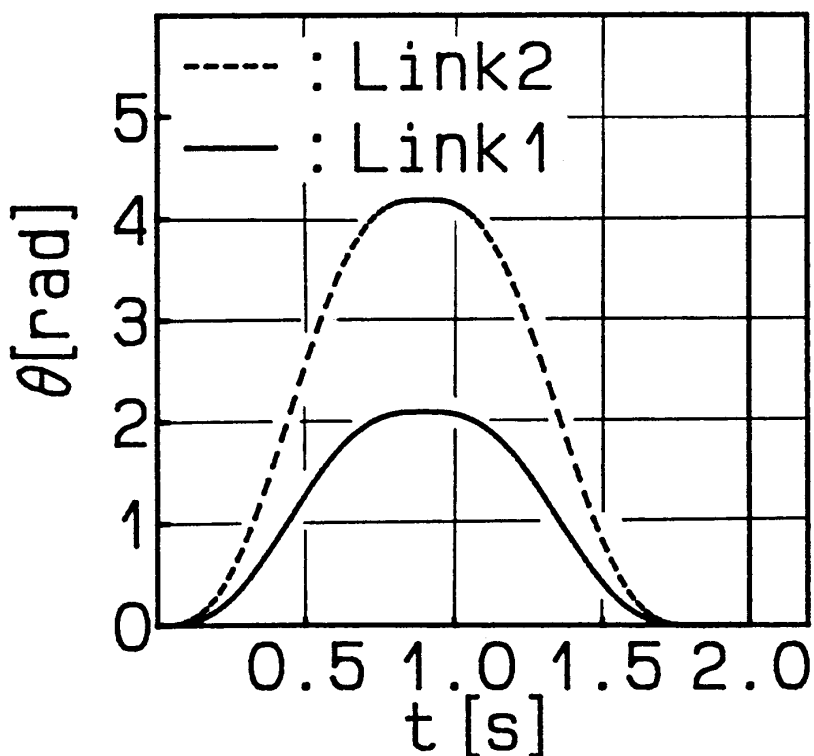


図4 実験用参照軌道

表2 参照軌道のフーリエ係数

j	a <sub>1j</sub>	b <sub>2j</sub>
1	1.597E+1	3.194E+1
2	4.990E-1	9.981E-1
3	6.572E-2	1.314E-1
4	1.560E-2	3.119E-2
5	5.110E-3	1.022E-2
6	2.054E-3	4.107E-3
7	9.502E-4	1.900E-3
8	4.874E-4	9.747E-4
9	2.704E-4	5.409E-4
10	1.597E-4	3.194E-4

表3 制御パラメータ

$\mu_1$	7.0	$e_1(t_0)$	[rad]	0.0
$\mu_2$	7.0	$e_2(t_0)$	[rad]	0.0
$\delta$	0.5	$\epsilon_1$	[rad]	0.03
$\gamma$	0.21	$\epsilon_2$	[rad]	0.03
$\kappa$	5.84	$\epsilon_1^{\max}$	[rad]	0.03
$\alpha$	0.772	$\epsilon_2^{\max}$	[rad]	0.03
$k_1$		[Nm/v]		1.000
$k_2$		[Nm/v]		0.985
$k'_1$		[Nm/v]		1.023
$k'_2$		[Nm/v]		0.896

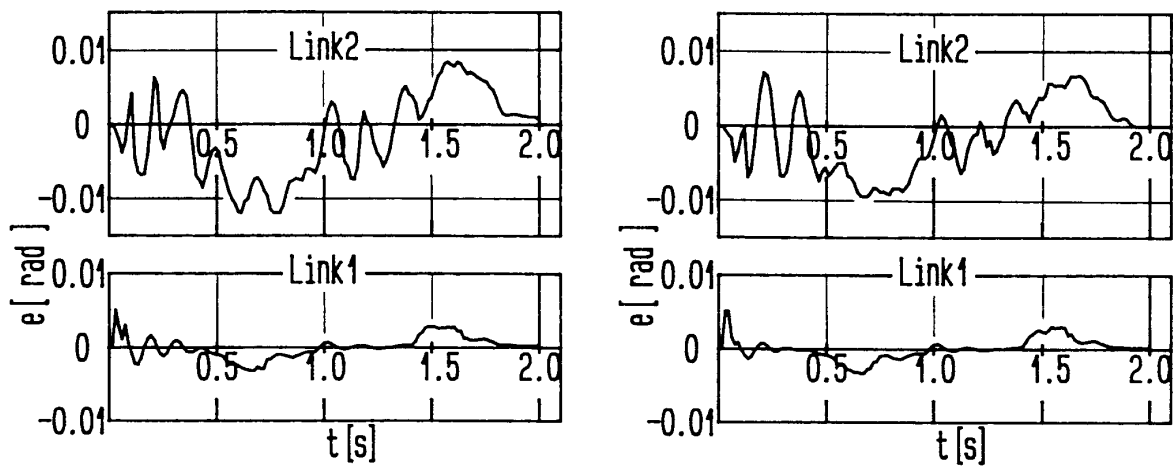


図5 軌道制御の位置誤差

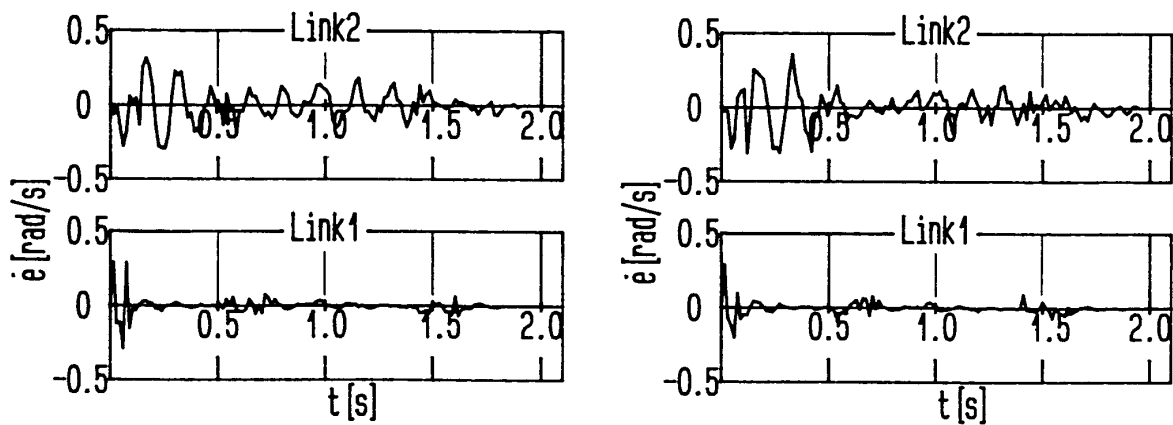


図6 軌道制御の速度誤差

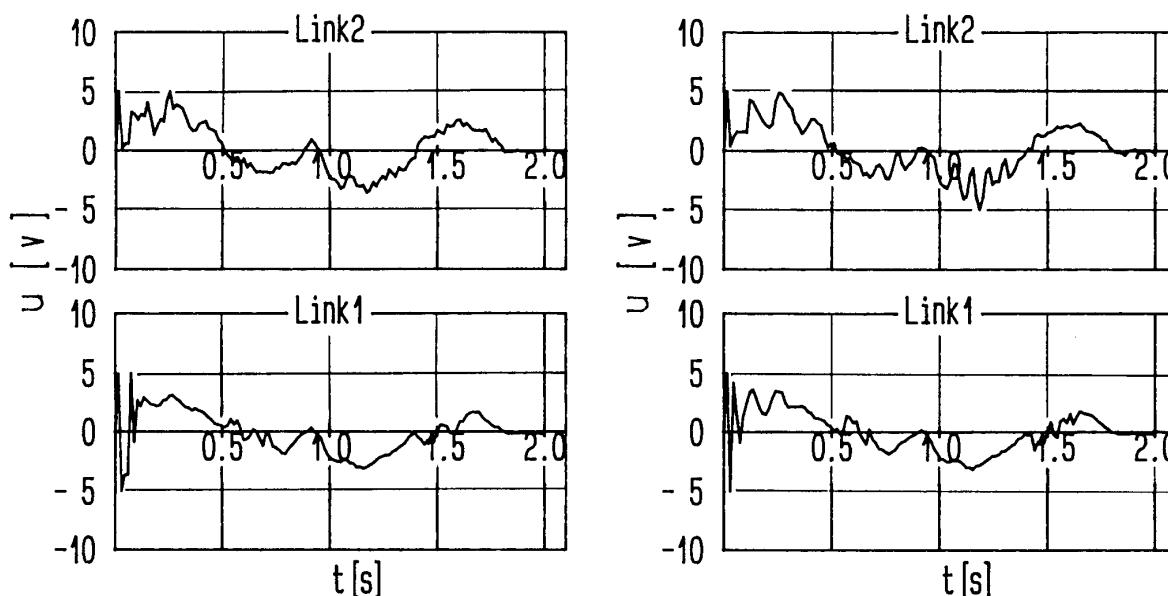


図7 制御入力

## 5. おわりに

本論文では、駆動系の回転方向を考慮したロボットマニピュレータのロバストな軌道制御の一設計法を提案し、2自由度マニピュレータに対し実験を行ない、その有効性を確認した。本設計法の特徴は以下の通りである。

- (1) マニピュレータ動特性を考慮したリアプノフ関数を用いて、見通しのよい制御系が構成できる。
- (2) 制御誤差が指定した誤差精度内に収まる。
- (3) マニピュレータの運動方程式を観測可能な部分とそうでない部分に分離して、観測可能な状態量をすべてオンラインで利用している。
- (4) 駆動系の回転方向を考慮した制御誤差は、考慮しないものより小さくなる。

## 参考文献

- 1) G. Ambrosino, G. Celentano & F. Garofalo : Robust Model Tracking Control for a Class of Nonlinear Plants ; IEEE Trans. Automatic Control, Vol. AC-30, No. 3, pp. 275~280 (1985)
- 2) 大須賀, 小野 : 非線形メカニカルシステムのロバストモデル追従制御 ; 計測自動制御学会論文集, Vol. 24, No. 2, pp. 126~133 (1988)
- 3) K. S. Yeung & Y. P. Chen : A New Controller Design for Manipulators Using the Theory of Variable Structure Systems ; IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 33, No. 2, pp.200~206 (1988)
- 4) 大須賀, 杉江, 小野 : マニピュレータのPD型二重構造ロバストモデル追従制御 ; 計測自動制御学会論文集, vol. 25, No. 1, pp. 46~53 (1989)
- 5) 吉川, 井村, 村井 : ロボットマニピュレータのロバストな軌道追従制御 ; システム制御情報学会論文誌, Vol. 3, No. 7, pp. 218~225 (1990)
- 6) 美多, 大須賀 : ロボット制御工学入門 ; コロナ社, pp. 81~85 (1989)
- 7) 逢坂, 小野 : ロボットマニピュレータの学習的最適軌道計画 ; システム制御情報学会論文誌, Vol. 2, No. 1, pp. 17~22 (1989)

# Robust Trajectory Control for Robot Manipulators

Kazumasa OHSAKA and Shinsaku FUJIMOTO

*Department of Mechanical Engineering,*

*Okayama University of Science,*

*1-1, Ridai-cho, Okayama 700, Japan*

(Received September 30, 1991)

In this paper, we propose a robust control scheme which achieves trajectory tracking with prescribed accuracy for robot manipulators with bounded unknown parameters and different characteristics of servo-motor for direction of the rotation. This scheme is based on Lyapunov stability theorem, and the Liapunov function is constructed using the inertia matrix. The control law takes a very simple form based on the assumption that the dynamic equation can be expressed as a sum of products of unobservable matrices which contain unknown parameters and observable state vectors.

The effectiveness of the proposed control scheme is shown by experimental results using a 2 degree-of-freedom manipulator.