

# 5自由度スカラ型ロボットマニピュレータの 位置と力のハイブリット制御

逢坂一正・尾田光成

岡山理科大学工学部機械工学科

(平成5年9月30日 受理)

## 1. はじめに

ロボットマニピュレータ(以後、マニピュレータという)の高精度な位置と力の制御は、生産工場における省力化につながるため産業界において大いに要望されている。高精度な位置と力の制御を要求される作業の一つとして、マニピュレータに筆を持たせて文字を書くこと(以後、書道ロボットという)が挙げられる。

知能ロボットとしての書道ロボットを実現することを目的とし、書道ロボットに要求されるメカニズム、動作特性を考慮してハードウェアとしての5リンクスカラ型マニピュレータを試作した。

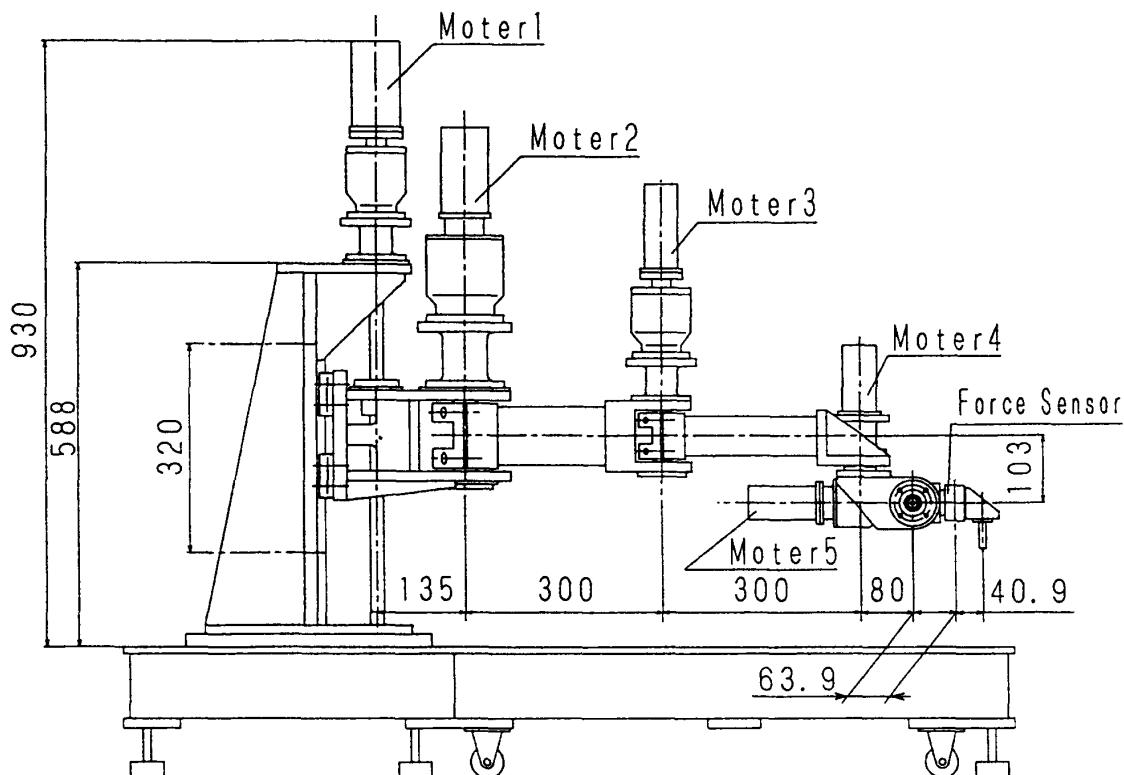


Fig. 1 5-Link robot manipulator

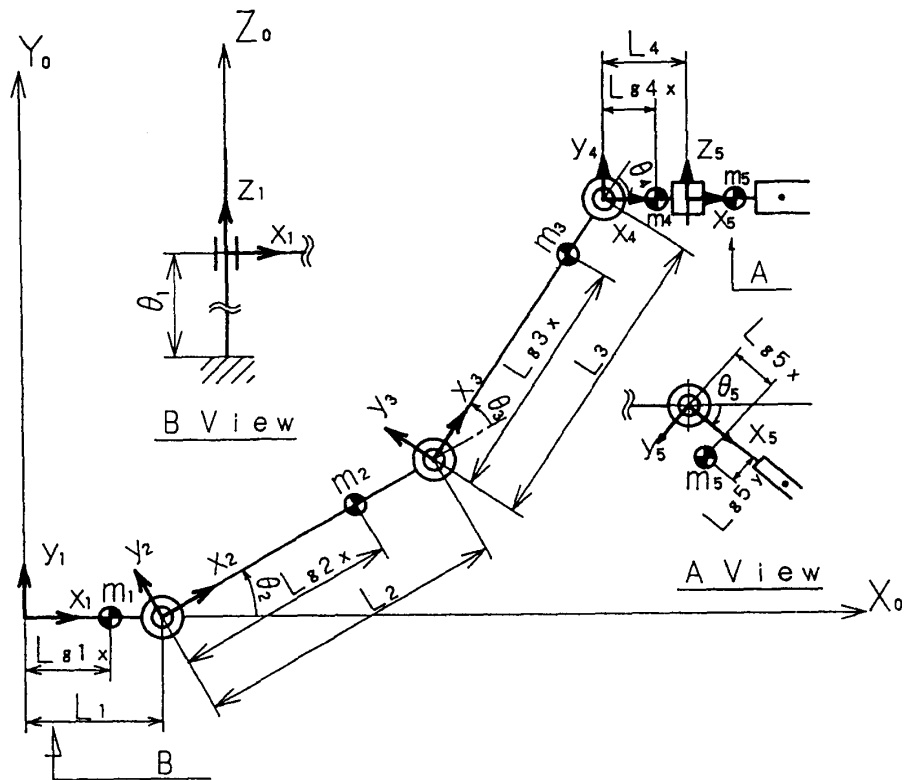


Fig. 2 Schematic manipulator with 5 degrees of freedom

ソフトウェアとしてのマニピュレータの位置と力の制御を実現する方法の一つにハイブリッド制御法があり、これまでに幾つかの研究<sup>1)~3)</sup>が報告されている。これらの制御法に共通する基本的考えは、ある方向に位置、別の方向には力を制御することである。

そこで本報告では、試作した書道ロボットの力学的パラメータを同定し、ハイブリッド制御法<sup>2)</sup>における制御性能をシミュレーションにより明らかにし、書道ロボットとしての可能性を検討する。

## 2. 試作マニピュレータ

### 2.1 マニピュレータの構造

試作したマニピュレータの側面図を Fig. 1 に示す。また、このマニピュレータの関節に注目した構造図を Fig. 2 に示す。マニピュレータの駆動には直流サーボモータが用いられていて、モータならびに動力伝達軸を除く可動部はほとんどアルミ合金製である。

マニピュレータの主たる作業は平面に筆で文字を書くことであるので、1リンクは直動関節とし、他のリンクは回転関節として5自由度の運動を可能としている。また、筆に加わる力を検出するため5リンクと手先効果器の間に3軸の力・モーメントが計測可能な力覚センサーを取り付けている。

Table 1 Base parameters for 5-Link robot manipulator

Base Parameter	Identified Value				
$m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5$	$2.89 \times 10$	[kg]	$m_5 L_4 L_{g5X}$	$3.22 \times 10^{-3}$	[kgm <sup>2</sup> ]
$l_{2ZZ} + (m_3 + m_4 + m_5) L_2^2$	1.54	[kgm <sup>2</sup> ]	$H_{5XY}$	$-1.79 \times 10^{-4}$	[kgm <sup>2</sup> ]
$l_{3ZZ} + (m_4 + m_5) L_3^2$	$6.48 \times 10^{-1}$	[kgm <sup>2</sup> ]	$I_{5XX} - I_{5YY}$	$5.64 \times 10^{-4}$	[kgm <sup>2</sup> ]
$l_{4ZZ} + I_{5YY} + m_5 L_4^2$	$2.92 \times 10^{-2}$	[kgm <sup>2</sup> ]	$D_1$	$2.73 \times 10^4$	[Nm <sup>-1</sup> s]
$l_{5ZZ}$	$2.96 \times 10^{-2}$	[kgm <sup>2</sup> ]	$D_2$	3.51	[Nms]
$m_3 L_2 L_{g3X} + (m_4 + m_5) L_2 L_3$	$6.08 \times 10^{-1}$	[kgm <sup>2</sup> ]	$D_3$	1.28	[Nms]
$m_4 L_3 L_{g4X} + m_5 L_3 L_4$	$5.87 \times 10^{-3}$	[kgm <sup>2</sup> ]	$D_4$	$2.82 \times 10^{-2}$	[Nms]
$m_4 L_2 L_{g4X} + m_5 L_2 L_4$	$5.87 \times 10^{-3}$	[kgm <sup>2</sup> ]	$D_5$	$3.89 \times 10^{-1}$	[Nms]
$m_5 L_3 L_{g5Y}$	$4.9 \times 10^{-3}$	[kgm <sup>2</sup> ]	$F_1$	$5.80 \times 10^2$	[N]
$m_5 L_3 L_{g5X}$	$7.67 \times 10^{-3}$	[kgm <sup>2</sup> ]	$F_2$	$9.57 \times 10^{-1}$	[Nm]
$m_5 L_2 L_{g5Y}$	$4.94 \times 10^{-3}$	[kgm <sup>2</sup> ]	$F_3$	$4.89 \times 10^{-1}$	[Nm]
$m_5 L_2 L_{g5X}$	$7.67 \times 10^{-3}$	[kgm <sup>2</sup> ]	$F_4$	$2.39 \times 10^{-2}$	[Nm]
$m_5 L_{g5Y}$	$1.65 \times 10^{-2}$	[kgm]	$F_5$	$6.53 \times 10^{-1}$	[Nm]
$m_5 L_4 L_{g5Y}$	$1.08 \times 10^{-3}$	[kgm <sup>2</sup> ]	$f_1$	$3.50 \times 10^2$	[N]
$m_5 L_{g5X}$	$2.56 \times 10^{-2}$	[kgm]			

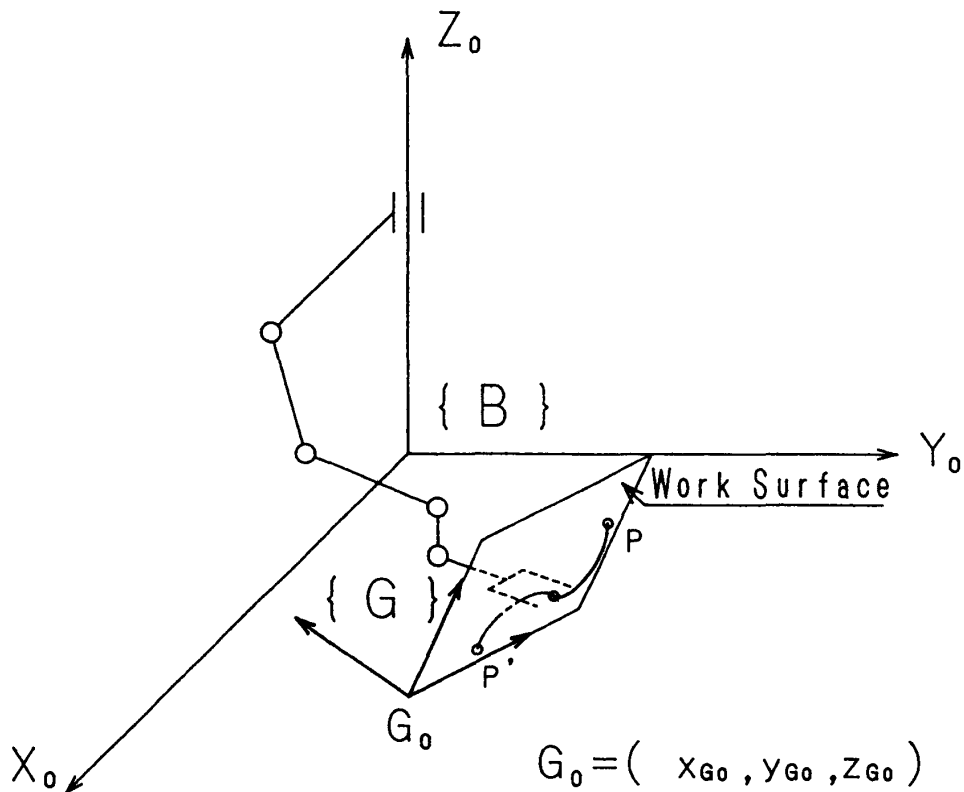


Fig. 3 Task for 5-Link robot manipulator

## 2.2 パラメータ同定

精度の良い制御を行うのにマニピュレータの動学的パラメータの同定は、不可欠である。そこで試作したマニピュレータのパラメータの同定を大須賀らの混合同定法<sup>4)</sup>を用いて行った。

本マニピュレータの動特性は、次の運動方程式で表わされるものとする。

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

ここで、 $\tau \in R^5, q \in R^5, M(q) \in R^{5 \times 5}, C(q, \dot{q}) \in R^5$ は、それぞれ関節駆動力ベクトル、関節変数ベクトル ( $q = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5]^T$ )、慣性行列、非線形力ベクトル (遠心力, コリオリ力など) である。同定結果を Table 1 に示す。Table 1 の  $m_i, L_i, L_{gij}, I_{ijj}, D_i, F_i, f_i$  は、それぞれ  $i$  番目リンクの質量, リンク長, 関節座標系での関節中心からリンク質量中心までの距離の  $j$  成分, 関節座標系での  $j$  軸まわりの慣性モーメント, 粘性摩擦係数, 最大静止摩擦力, 動摩擦力 (リンク 1 のみ同定可能) である。また,  $H_{5xy}$  は 5 リンクの  $x, y$  軸に関する慣性乗積であり, 他のリンクは 0 である。

## 3. 制御系の構成

### 3.1 作業超平面の記述<sup>2)</sup>

本マニピュレータに行わせる作業の基本パターンを Fig. 3 に示す。マニピュレータの手先効果器が、特定の姿勢にある作業平面上の点 P から P' までの軌跡を平面に垂直な方向に指定された力を加えながら行う作業を示している。ここで、 $\{G\}$  は作業平面に固定された座標系 (原点:  $G_0$ )、 $\{B\}$  は基準座標系である。作業平面の姿勢は、Fig. 4 に示す  $\{B\}$  に対

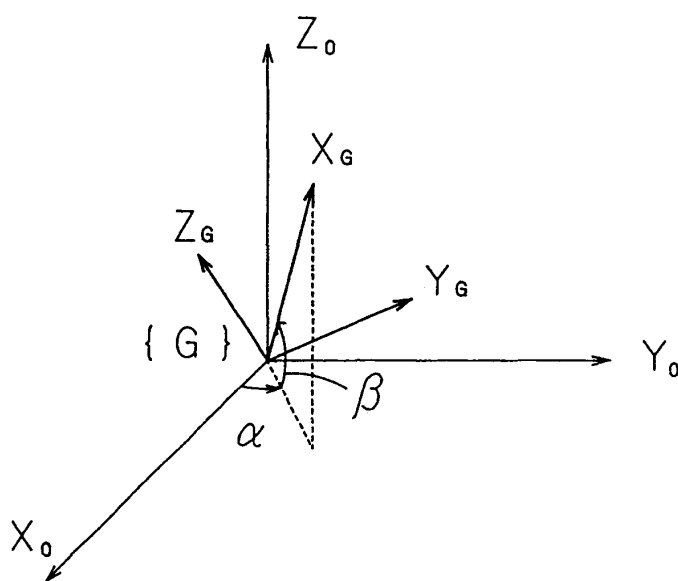


Fig. 4 Orientation for a G\_frame

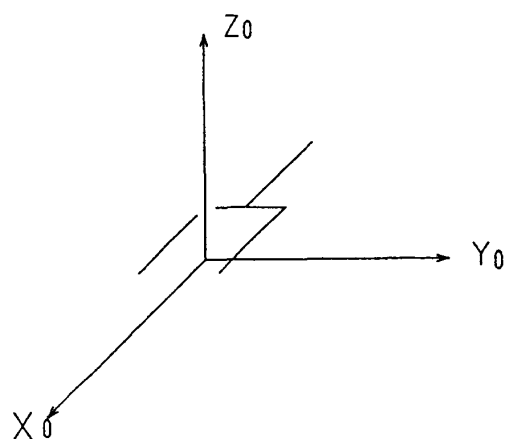


Fig. 5 Base orientation for end effector

する{G}のオイラー角で示される。

{G}から{B}への同次変換行列 ${}^G T_B$ は次式となる。

$${}^G T_B = \begin{pmatrix} C_\alpha C_\beta & S_\alpha C_\beta & -S_\beta & -C_\alpha C_\beta x_{G0} - S_\alpha C_\beta y_{G0} + S_\beta z_{G0} \\ -S_\alpha & C_\alpha & 0 & S_\alpha x_{G0} - C_\alpha y_{G0} \\ C_\alpha S_\beta & S_\alpha S_\beta & C_\beta & -C_\alpha S_\beta x_{G0} - S_\alpha S_\beta y_{G0} - C_\beta z_{G0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $C_\alpha, S_\alpha$ は、 $\cos(\alpha), \sin(\alpha)$ の簡略表記である。

手先効果器が常に作業平面に垂直に向かっていると仮定すると、作業超平面を表わす拘束式  $P_i(r) = 0$  ( $i$ : 拘束条件数,  $r = [x, y, z, \phi, \theta]^T$ : 手先効果器の位置を表わすベクトル) より、作業超平面は(2)式を用いると次の3式となる。

$$P_1(r) = -C_\alpha S_\beta(x - x_{G0}) - S_\alpha S_\beta(y - y_{G0}) - C_\beta(z - z_{G0}) = 0 \quad (3)$$

$$P_2(r) = \phi - \alpha = 0 \quad (4)$$

$$P_3(r) = \theta - \beta = 0 \quad (5)$$

ただし、手先効果器の基準姿勢を Fig. 5 のようにとった。

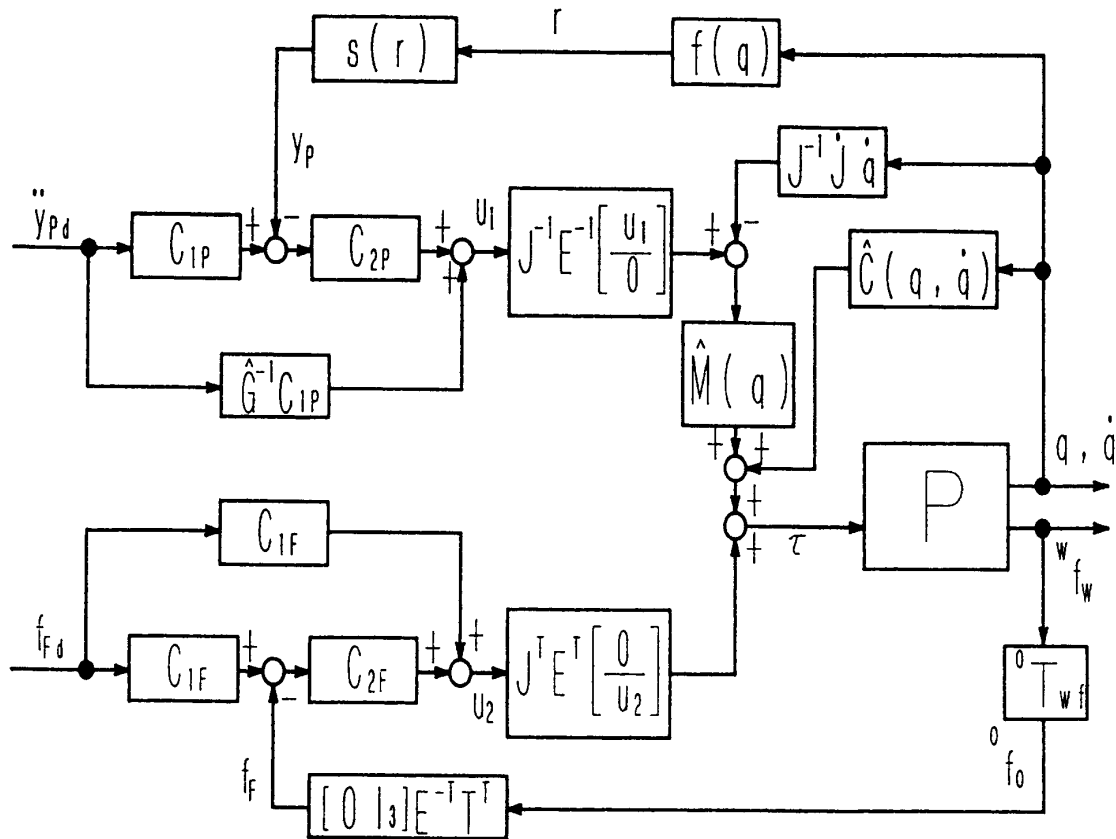


Fig. 6 Block-diagram for a dynamic hybrid control system

次に、手先効果器がこの作業超平面上に拘束されて運動できる軌道  $y_p = S(r)$  は  $\{G\}$  の  $X_G - Y_G$  平面上にあり ( $y_p = [x_G, y_G]^T, S(r) = [S_1(r), S_2(r)]^T$ ), (2) を用いると次の 2 式となる。

$$x_G = S_1(r) = C_\alpha C_\beta (x - x_{G0}) + S_\alpha C_\beta (y - y_{G0}) - S_\beta (z - z_{G0}) \quad (6)$$

$$y_G = S_2(r) = -S_\alpha (x - x_{G0}) + C_\alpha (y - y_{G0}) \quad (7)$$

また、(3)式～(7)式を用いると、次の制御則に必要な位置と力の制御方向を定める行列  $E \in R^{5 \times 5}$  は次式となる。

$$E = [\partial S_1 / \partial r, \partial S_2 / \partial r, \partial P_1 / \partial r, \partial P_2 / \partial r, \partial P_3 / \partial r]^T$$

$$= \begin{pmatrix} C_\alpha C_\beta & S_\alpha C_\beta & -S_\beta & 0 & 0 \\ -S_\alpha & C_\alpha & 0 & 0 & 0 \\ -C_\alpha S_\beta & -S_\alpha S_\beta & -C_\beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

### 3.2 制御系の構造と制御則

制御系の構造は、動的ハイブリッドに 2 自由度サーボコントローラを採用した設計法<sup>3)</sup>によるものとする。制御系のブロック線図を Fig. 6 に示す。ここで、図中の P は (1) 式で表わされる制御対象であり、“ $\hat{\cdot}$ ” は公称モデルを示す。また、 $f(q) \in R^5$ ,  $J(q) \in R^{5 \times 5}$ ,  $T \in R^{6 \times 5}$ ,  ${}^0 T_{wf} \in R^{6 \times 6}$ ,  $\dot{y}_{pd} \in R^2$ ,  $y_p \in R^2$ ,  $f_{Fd} \in R^3$ ,  $f_F \in R^3$ ,  ${}^0 f_0 \in R^6$ ,  $w_{fw} \in R^6$  は、それぞれ  $r$  を表わす  $q$  の関数、ヤコビ行列、 $\dot{r}$  から  $v$  ( $v: \{B\}$  の各座標軸方向の手先の並進速度、各軸回りの手先の回転速度) への変換行列、 $w_{fw}$  から  ${}^0 f_0$  への変換行列、 $\{G\}$  での手先加速度の目標値、 $\{G\}$  での手先実現値、 $\{G\}$  での手先力 (手先が作業面に加える力) の目標値、 $\{G\}$  での手先実現値、 $\{B\}$  での手先力、センサ座標系での手先力である。

コントローラ的设计すべき特性は、 $C_{1p}$ ,  $C_{1F}$ ,  $C_{2p}$ ,  $C_{2F}$  である。位置に関する 2 自由度サーボコントローラは、次式を採用する。

$$C_{1p} = (1/s^2) \cdot I_2, \quad C_{2p} = (as + b) \cdot I_2 \quad (9)$$

ここで、 $I_2$  は  $2 \times 2$  の単位行列である。次に、力に関する 2 自由度サーボコントローラは、次式を採用する。

$$C_{1F} = (1/(1 + cs)) \cdot I_3, \quad C_{2F} = (d + e/s) \cdot I_3 \quad (10)$$

ここで、 $I_3$  は  $3 \times 3$  の単位行列である。なお、パラメータ  $a, b, c, d, e$  の値は、シミュレーションにおいて試行錯誤的に決められる。

Table 2 Parameters with control simulation

$\alpha$	0.00	[deg]	a	2.0
$\beta$	$-3.00 \times 10$	[deg]	b	$2.0 \times 10$
$M_H$	$3.50 \times 10^{-1}$	[kg]	c	$1.3 \times 10^{-1}$
$D_w$	$5.70 \times 10^4$	[Ns/m]	d	$5.5 \times 10^{-2}$
$K_w$	$7.85 \times 10^3$	[N/m]	e	7.5

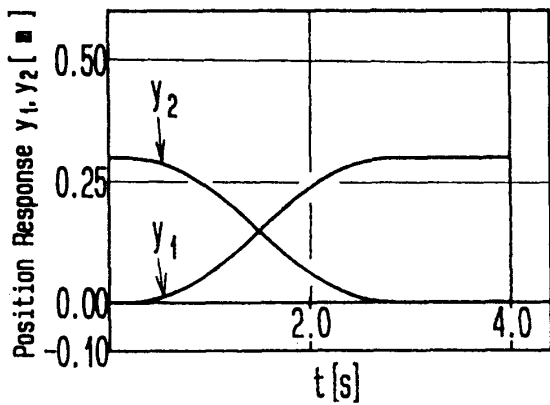


Fig. 7 A simulation result for position response

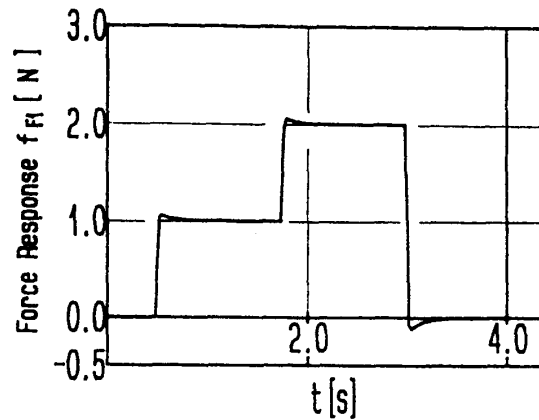


Fig. 8 A simulation result for force response

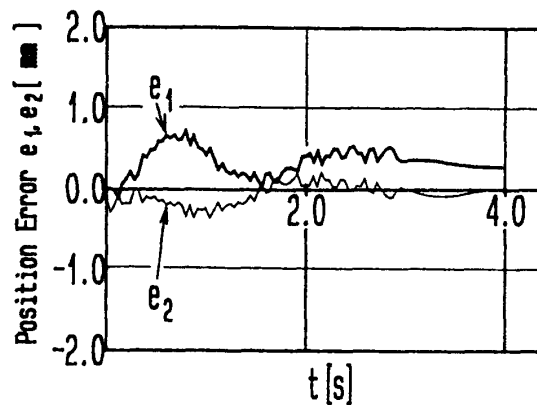


Fig. 9 A simulation result for position error

### 3.3 制御性能の検討

まず、Table 1の基底パラメータを用いて、シミュレーションによる制御誤差について検討する。実際に書道ロボットを動かすとき、手先効果器に持たせる筆は何種類かを用いることを想定して、5リンクの質量  $m_5$  が公称値から5%増加した場合に軌道追従制御をシミュレートする。また、力センサのモデルとしては、作業平面に垂直な一方向のみの力  $f$

とその力によって発生するモーメント ${}^w n$ のみとし、それぞれ次式で表わせるとする。

$${}^w f = M_H \ddot{\xi} + D_w \dot{\xi} + K_w \xi, \quad {}^w n = L_{wH} {}^w f \quad (11)$$

ここで、 $M_H$ ,  $D_w$ ,  $K_w$ ,  $L_{wH}$ ,  $\xi$  はそれぞれ手先効果器の質量、力センサの減衰係数、力センサのばね定数、手先からセンサ座標系原点までの距離、手先の $\{G\}$ での $Z_c$ 方向変位である。実際にシミュレーションで用いられた $\{G\}$ 、コントローラ、力センサの各パラメータを Table 2 に示す。

シミュレーション結果の例を Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 に示す。Fig. 7 の  $y_1$ ,  $y_2$  は、 $\{G\}$  の  $X_c$ ,  $Y_c$  方向の位置の目標軌道とシミュレーションでの実現軌道を示しているが、重なってそれらの違いは読み取れない。そこで、縦軸のスケールを変えて誤差の形で示したのが Fig. 9 である。太線： $e_1 = y_{1d} - y_1$  (添字  $d$  は目標値を表わす)、細線： $e_2 = y_{2d} - y_2$  である。位置については、 $y_1$ ,  $y_2$  とも誤差が 0.7 [mm] 以内に収まっている。

Fig. 8 は、力の目標軌道 (細線) とシミュレーションでの実現軌道 (太線) を示している。目標軌道は、次式で表わされるステップ状軌道である。

$$\begin{aligned} f_{F1d} &= 0.0[N] & (0.0 [s] \leq t < 0.5 [s]) \\ f_{F1d} &= 1.0[N] & (0.5 [s] \leq t < 1.75[s]) \\ f_{F1d} &= 2.0[N] & (1.75[s] \leq t < 3.0 [s]) \\ f_{F1d} &= 0.0[N] & (3.0 [s] \leq t \leq 4.0 [s]) \end{aligned}$$

力については、変化点での最大オーバーシュートが 0.1 [N] 程度である。実際に文字を書く場合は力の変化は滑らかであると思われるので、この誤差はもっと小さくなり書かれる文字への影響度は少ないと推定される。

#### 4. おわりに

書道ロボットを作ることを目的に 5 リンクスカラ型マニピュレータを試作して、その制御性能をシミュレーションにより検討した結果、以下のことが分かった。

文字の線の太さが 1 [mm] 程度の誤差、筆圧の誤差は 0.1 [N] 以下になることが推測され、かなり小さな文字も書ける可能性が示された。実機での制御結果については、次報で報告したい。

#### 参考文献

- 1) W. H. Raibert, J. J. Craig: Hybrid position/force control of manipulators, ASME J. of Dynamic System, Measurement and Control, Vol. 103, No. 2, pp. 126—133, (1981)
- 2) 吉川：ロボットアームの位置と力のハイブリッド制御, 日本ロボット学会誌, Vol.3, No. 6, pp. 532—536, (1985)
- 3) T. Yosikawa, T. Sugie and N. Tanaka: Dynamic hybrid position/force control of robot



manipulators-Control design and experiment-, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 4, No. 6, pp. 699–705, (1988)

- 4) 大須賀, 遠藤, 富塚, 小野, 前田: ダイレクトドライブ (UCB-Arm) の基底パラメータ同定, 第35回自動制御連合講演会前刷, pp. 283–286, (1992)

## Hybrid Position/Force Control for 5-link Robot Manipulator

Kazumasa OHSAKA and Mitunari ODA

*Department of Mechanical Engineering,*

*Okayama University of Science,*

*Ridai-cho, Okayama 700, Japan*

(Received September 30, 1993)

In this paper we discuss some control performances of a robot manipulator which is manufactured in our laboratory in order to write letters of calligraphy. The dynamic base parameters of the manipulator are first identified and the manipulator is then controlled by a dynamic hybrid position/force control method. The control errors for trajectory tracking are discussed by a simulation method and the probability to realize the calligraphy by robot manipulator is clarified.