

産業用ロボットの操作性と軌道制御 (第二報)

和田憲造*・香川浩之**・三好慎一郎**・早野延男*

Manipulation Ability and Trajectory Control of an Industrial Robot (2nd Report)

Kenzou WADA, Hiroyuki KAGAWA, Shinichiro MIYOSHI and Nobuo HAYANO

Abstract

Industrial robots have been applied in many fields. So far these robots have been controlled by the "Point to Point" or "Continuous Path" control methods.

At the present stage, robot manipulators with finer performances at high speed and accuracy have been required; therefore, we must consider the control method, which takes the dynamics of robots into account.

In this report, we used "Move Master II" (Mitsubishi Electric Works) as our sample.

Usually, though "Move Master II" has four links, as the first step, we performed the simulation experiments of trajectory control of manipulator with two links (link1 and link2) with the feedback of the positional information.

The industrial robots are non-linear, multi-variable, time-varying systems. When we control the system by using the former control law, interaction between both arms results. Then the system is decoupled by the state feedback to avoid the above effect, and accordingly this feedback law permits an arbitrary assignment of a specified number of poles. As for the experimental system, we composed a software servo-system for the decoupled system.

Through the simulation experiments, we could obtain a good response (trajectory) compared with the reference trajectory by regulating feedback gains. As a result, the availability of the proposed control method was confirmed.

1. 序 論

現在産業界の各分野で用いられている産業用ロボットの多くは、主に開ループ制御方式(PTPあるいはCP

制御方式)により駆動されている。これらを高速・高精度で動作させようとする場合、種々のパラメータ(慣性項・重力項・コリオリ力・求心力等)の変動および各関節の摩擦・バックラッシュ・負荷などの外乱の影響により現在の制御方式では満足な動作(性能)を得ることは難しい。したがってロボットを高速・高精度で制御する場合、ロボットの動特性を考慮した制御方

*生産機械工学科

**大学院生産機械工学専攻

式が必要となる。

本研究はロボットとしてムーブマスタII (三菱電機製) を用い、このロボットについてマルチCPU方式によるロボット駆動系を構成し、現代制御理論に基づいた多軸同時制御を行うことを目的としている。

前報¹⁾ではムーブマスタIIの特異点・可操作性の検討を行い、また前述した種々の影響を考慮してムーブマスタIIの動特性方程式を求め、これをもとに位置のフィードバックによるソフトウェアサーボ系を構成した。このシステムを用いて軌道制御を行った結果、良好な応答を得ることができた。しかし本制御方式を適用した場合、ロボットアームの自由度が増すにつれて制御系は複雑になり、各アームは互いに干渉し合い高速・高精度の制御は難しくなる。そこで非線形状態フィードバックによりシステムを非干渉化し、各関節間の干渉をなくした制御系を考える。

産業用ロボットは、多入力多出力の非線形多変数時変システムである。このシステムを1入力1出力のサブシステムに分割して制御することができれば、各アームが互いに干渉することなく、良好な制御性能が期待できる。そこで本報では、多変数制御の一手法である非干渉制御の適用について検討を行った。産業用ロボットの非干渉制御についてはFreund²⁾が冗長性のある工業用ロボットに、吉川³⁾が油圧駆動マニピュレータに適用した報告がある。この非干渉制御をムーブマスタIIに適用してシステムの非干渉化を行い、この非干渉化された各サブシステムについてサーボ系を構成し、シミュレーション実験により検討を行った。

2. 非干渉制御理論²⁾⁻⁷⁾

次式で示される m 入力 m 出力の非線形時変システムを考える。

$$\dot{x}(t) = \mathbf{A}(x, t) + \mathbf{B}(x, t) \mathbf{u}(t) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(x, t) + \mathbf{D}(x, t) \mathbf{u}(t) \quad (2)$$

ただし

$x(t)$: n 次元状態ベクトル

$y(t)$: m 次元出力ベクトル

$u(t)$: m 次元入力ベクトル

$\mathbf{A}(x, t)$: n 次元ベクトル

$\mathbf{B}(x, t)$: $n \times m$ 行列

$\mathbf{C}(x, t)$: m 次元ベクトル

$\mathbf{D}(x, t)$: $m \times m$ 行列

このシステムに関して線形非干渉制御系を構成する。非線形作用素 N_A^k が $k=1, 2, \dots$ に対して次のように

定義される。

$$N_A^k C_i(x, t) = \frac{\partial}{\partial t} N_A^{k-1} C_i(x, t) + \left[\frac{\partial}{\partial x} N_A^{k-1} C_i(x, t) \right] \mathbf{A}(x, t) \quad (3)$$

ここで $C_i(x, t)$ および $\mathbf{A}(x, t)$ が t と独立であれば、作用素は式(3)の右辺の第2項のみを含む形となる。また式(3)で $i=1, 2, \dots, m$ に対しては

$$N_A^0 C_i(x, t) = C_i(x, t) \quad (4)$$

である。 $C_i(x, t)$ は $\mathbf{C}(x, t)$ の第 i 番目の要素である。非線形システムの微分次数 d_i は、 $\mathbf{D}(x, t)$ の第 i 番目の行を $D_i(x, t)$ とすると次のように定義される。

$$D_i(x, t) \neq 0 \quad \text{のとき} \quad d_i = 0 \quad (5)$$

$$D_i(x, t) = 0 \quad \text{のとき}$$

$$d_i = \min \{ j : \left[\frac{\partial}{\partial x} N_A^{j-1} C_i(x, t) \right] \mathbf{B}(x, t) \neq 0, j=1, 2, \dots, n \} \quad (6)$$

ただし、 $d_i (i=1, 2, \dots, m)$ はすべての x と t に対して一定であると仮定する。

y は第 i 番目の要素を y_i とする m 次元ベクトルである。式(1)~(3)より

$$y_i(t) = N_A^{d_i} C_i(x, t) + \frac{\partial}{\partial x} N_A^{d_i-1} C_i(x, t) \mathbf{B}(x, t) \mathbf{u}(t) \quad (7)$$

さらに $\mathbf{C}^*(x, t)$ は m 次元ベクトルであり i 番目の要素は

$$C_i^*(x, t) = N_A^{d_i} C_i(x, t) \quad (8)$$

$\mathbf{D}^*(x, t)$ は $m \times m$ 行列であり、その i 番目の行は

$$D_i^*(x, t) = \left[\frac{\partial}{\partial x} N_A^{d_i-1} C_i(x, t) \right] \mathbf{B}(x, t) \quad (9)$$

ただし、 $d_i=0$ のとき

$$D_i^*(x, t) = D_i(x, t) \quad (10)$$

とおく。

ここで、式(1), (2)のシステムに適当な非線形時変状態フィードバック則

$$\mathbf{u}^*(t) = \mathbf{F}^*(x, t) + \mathbf{G}^*(x, t) \mathbf{w}(t) \quad (11)$$

を適用することによって、出力 y の各要素が互いに非干渉化され、かつ任意の極をもつことができる。ただし、 $\mathbf{w}(t)$ は m 次元の新しい入力ベクトルである。

また $\mathbf{F}^*(x, t)$ と $\mathbf{G}^*(x, t)$ は適当な次数からなり、 $\mathbf{D}^*(x, t)$ が正則であるとき次の形式のフィードバック則に従う。

$$\mathbf{F}^*(x, t) = \mathbf{F}_1^*(x, t) + \mathbf{F}_2^*(x, t) \quad (12)$$

ただし

$$\mathbf{F}_1^*(x, t) = -\mathbf{D}^{*-1}(x, t) \mathbf{C}^*(x, t) \quad (13)$$

$$\mathbf{F}_2^*(x, t) = -\mathbf{D}^{*-1}(x, t) \mathbf{M}^*(x, t) \quad (14)$$

また

$$G^*(x, t) = D^{*-1}(x, t) \Lambda \quad (15)$$

式(12)において $F_1^*(x, t)$ は非干渉化を行うフィードバック部分を表わす。非干渉化された部分の入力ゲインは $G^*(x, t)$ によって選択できる。また Λ および m 次元ベクトル $M^*(x, t)$ の第 i 番目の要素は次式のように定義される。

$$M_i^*(x, t) = \sum_{k=0}^{d_i-1} \alpha_{ki} N_A^k C_i(x, t) \quad (16)$$

$$\Lambda = \text{diag} [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m] \quad (17)$$

ただし

$$d_i = 0 \text{ のとき } M_i^*(x, t) = 0 \quad (18)$$

α_{ki}, λ_i : 任意定数

以上のように式(11)のフィードバック則を定めることにより、システムは出力 y に関して非干渉化される。

すなわち式(1), (2)および式(11), (12), (15)を用いると、すべての入出力の組 $w_i(t), y_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, m$) の全体の応答は

$$y_i(t)^{(d_i)} + \alpha_{d_i-1,i} y_i(t)^{(d_i-1)} + \dots + \alpha_{0,i} y_i(t) = \lambda_i w_i(t) \quad (19)$$

となる。ここで α_{ki} ($k=0, 1, \dots, d_i-1$), λ_i を適切に選ぶことにより、非干渉化後の各1入力1出力のシステムに任意の極配置およびゲインを与えることができる。

3. ムーブマスタ II への適用

3.1 ムーブマスタ II のシステム

本研究で使用するムーブマスタ II は、4リンクで自由度が5のマニピュレータであるが、ソフトウェアサーボ系の適用性を調べるため簡単のために、2つのリンクのみについて検討を行った。

通常、ロボットマニピュレータを高速で動作させる場合、コリオリ力・求心力の影響は無視できないとされているが、前報によりムーブマスタ II に対してはこれらの非線形項の影響は無視できるとした。

2つのリンクについてのシステムのブロック線図を Fig. 1 に示す。状態変数として、 x_1 : リンク i の位置、 x_2 : リンク i の速度、 x_3 : リンク j の位置、 x_4 : リンク j の速度 (ただし $i < j$) をとるとシステムの状態方程式は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu^*(t) + Dg(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

ただし

$$H = \det \{A(q) + J\}, \quad J = \text{diag} \{J_{ii}\}$$

$$J_{ii} = J_i / r_i^2, \quad b_{ii} = (b_{oi} + K_{ti} K_{ei} / R_{ai}) / r_i^2$$

$$k_{ii} = K_{ti} / (R_{ai} r_i)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 - b_{ii}(A_{jj} + J_{jj})/H & 0 & b_{jj}A_{ij}/H & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & b_{ii}A_{ji}/H & 0 & -b_{jj}(A_{ii} + J_{ii})/H \end{bmatrix}$$

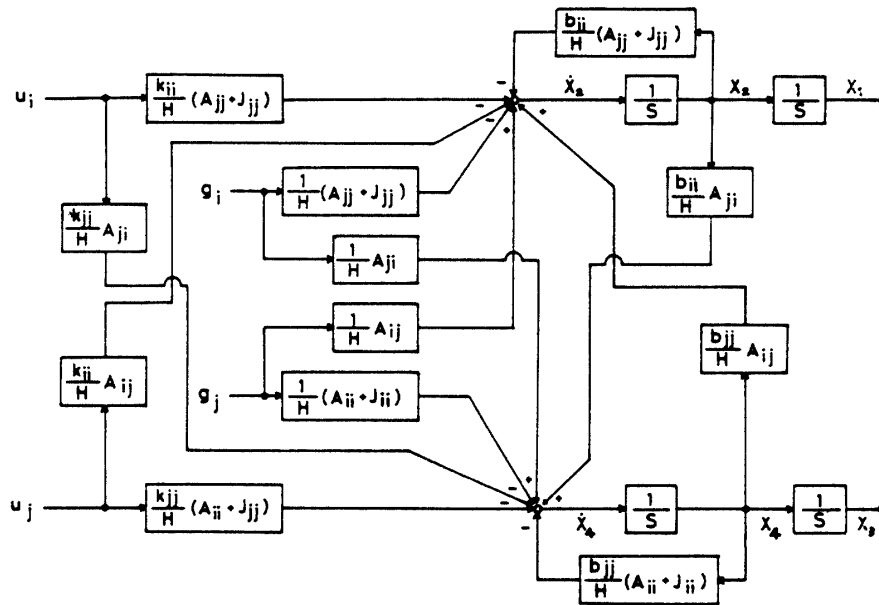


Fig. 1 Block diagram of two links manipulator

$$B = \frac{1}{H} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ k_{ii}(A_{jj}+J_{jj}) & -k_{jj}A_{ij} \\ 0 & 0 \\ -k_{ii}A_{ji} & k_{jj}(A_{ii}+J_{ii}) \end{bmatrix}$$

$$D = -\frac{1}{H} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ A_{jj}+J_{jj} & -A_{ij} \\ 0 & 0 \\ -A_{ji} & A_{ii}+J_{ii} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

添字 i, j はそれぞれリンク i , リンク j を表わす. 各々の係数を以下に示す.

$A(q)$: 慣性項

J_i : モータのシャフトと減速機からなる慣性モーメント

r_i : 減速比

b_{oi} : 減速機の粘性摩擦係数

K_{ti} : トルク定数

K_{ei} : 誘起電圧定数

R_{ai} : 電機子回路の抵抗

A_{ii} : 関節 i の有効慣性

A_{ij} : 関節 i と j の間の相互慣性

A_{ijj} : 関節 j における速度によって関節 i に生じる求心力係数

A_{iij} : 関節 i および j における速度によって関節 i に生じるコリオリ力係数

以下, 各行列の要素を $a_{ij}, b_{ij}, d_{ij} (i, j=1, \dots, 4)$ とする.

このシステムについて前述の非干渉制御を適用し, 非干渉化を行う. まず, 微分次数 $d_i (i=1, 2)$ を求める. 式(6)より

$$d_1=2, d_2=2 \tag{21}$$

となる. $C^*(x, t), D^*(x, t)$ は式(8), (9)より

$$C^*(x, t) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 + \dot{x}_2 + a_{22}x_2 + a_{24}x_4 \\ \dot{x}_3 + \dot{x}_4 + a_{42}x_2 + a_{44}x_4 \end{bmatrix} \tag{22}$$

$$D^*(x, t) = \begin{bmatrix} b_{21} & b_{22} \\ b_{41} & b_{42} \end{bmatrix} \tag{23}$$

となる. また $M^*(x, t)$ は式(16)より

$$M^*(x, t) = \begin{bmatrix} \alpha_{01}x_1 + \alpha_{11}(\dot{x}_1 + x_2) \\ \alpha_{02}x_3 + \alpha_{12}(\dot{x}_3 + x_4) \end{bmatrix} \tag{24}$$

となり, 入力ベクトル $u^*(t)$ は式(11)~(19)および式(21)~(24)より

$$u^*(t) = \frac{-1}{b_{21} b_{42} - b_{22} b_{41}} \begin{bmatrix} b_{42} & -b_{22} \\ -b_{41} & b_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} \tag{25}$$

ただし

$$\begin{cases} \beta_1 = \ddot{x}_1 + \dot{x}_2 + a_{22}x_2 + a_{24}x_4 + \alpha_{01}x_1 + \alpha_{11}(\dot{x}_1 + x_2) - \lambda_1 w_1 \\ \beta_2 = \ddot{x}_3 + \dot{x}_4 + a_{42}x_2 + a_{44}x_4 + \alpha_{02}x_3 + \alpha_{12}(\dot{x}_3 + x_4) - \lambda_2 w_2 \end{cases} \tag{26}$$

となる. 上式の入力 $u^*(t)$ を式(1)に代入して, x_1 と x_3 について解くと

$$3\ddot{x}_1 + 2\alpha_{11}\dot{x}_1 + \alpha_{01}x_1 = \lambda_1 w_1 \tag{27}$$

$$3\ddot{x}_3 + 2\alpha_{12}\dot{x}_3 + \alpha_{02}x_3 = \lambda_2 w_2 \tag{28}$$

となる. さらに式(27), (28)よりシステムの伝達関数行列は次式のように表わせ, システムは非干渉化されたことになる.

$$\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\lambda_1}{3s^2 + 2\alpha_{11}s + \alpha_{01}} & 0 \\ 0 & \frac{\lambda_2}{3s^2 + 2\alpha_{12}s + \alpha_{02}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} W_1(s) \\ W_2(s) \end{bmatrix} \tag{29}$$

Fig. 2に, サンプリング周期0.01s, $\alpha_{01} = \alpha_{11} = \alpha_{02} = \alpha_{12} = 3$ としたときのモデルおよびムーブマスタIIのステップ応答を示す. Fig. 2において非干渉化されたシステムの出力と非干渉化される前のシステムの出力が一致していることがわかる.

以上のことから実際の制御においては, 非干渉化されたモデルの入力 $w(t)$ を用いてムーブマスタIIの入力を式(25)のように合成することにより, 2リンクマニピュレータの各アームを独立に制御することができる.

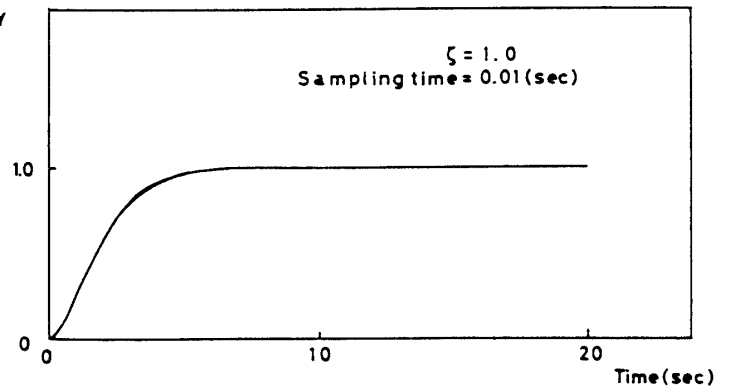


Fig. 2 Responses of time varying system

たがって以後の制御システムは、式(29)のモデルをもとに行いこのモデルに対する入力 $w(t)$ を式(25)に代入してロボットの入力を決定し、これにより各アームの制御を行う。

3.2 ソフトウェアサーボシステムの構成

3.2.1 入力 $u^*(t)$ の合成

式(29)のサブシステムについてサーボ系を構成する。式(29)を状態方程式で表わすと

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_M(t) &= E x_M(t) + F w(t) \\ y_M(t) &= C x_M(t) \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

となる。ただし

$$E = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\alpha_{01}/3 & -2\alpha_{11}/3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\alpha_{02}/3 & -2\alpha_{12}/3 \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \lambda_1/3 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2/3 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

また、上式よりサンプリング周期 τ としてシステムの離散値系状態推移方程式を求めると次式となる。

$$\left. \begin{aligned} x_M(k+1) &= P x_M(k) + Q w(k) \\ y_M(k) &= C x_M(k) \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

ただし

$$P = e^{E\tau}, \quad Q = \int_0^\tau e^{E\lambda} F d\lambda$$

離散化されたマニピュレータへの入力 $u^*(k)$ は次のように合成する。式(31)と非干渉化される前のシステム(式(20))が等しいことから、両者の離散値系状態推移方程式を求め、両者が等しいと置くことにより実システムへの入力 $u^*(k)$ の合成を行った。

式(20)より、サンプリング周期 τ として離散値系状態推移方程式を求めると次式となる。

$$\left. \begin{aligned} x(k+1) &= P_A x(k) + Q_B u^*(k) + R_D g(k) \\ y(k) &= C x(k) \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

ただし

$$P_A = e^{A\tau}, \quad Q_B = \int_0^\tau e^{A\lambda} B d\lambda$$

$$R_D = \int_0^\tau e^{A\lambda} D d\lambda$$

したがって式(31)、(32)より合成すべき入力 $u^*(t)$ は以下のように表わされる。

$$P x_M(k) + Q w(k) = P_A x(k) + Q_B u^*(k) + R_D g(k)$$

$$\therefore u^*(k) = Q_B^{-1} \{ P x_M(k) - P_A x(k) + Q_B w(k) - R_D g(k) \} \quad (33)$$

ここで Q_B^{-1} は、 Q_B の左側擬似逆行列である。この入力 $u^*(k)$ をマニピュレータに入力することにより、モデルの応答とマニピュレータの応答を一致させることができる。

3.2.2 ソフトウェアサーボ系の構成

式(31)で表わされるシステムに対してサーボ系を構成する。フィードバック係数行列を $f = [f_1, f_2]$ として、位置のフィードバックおよび定常偏差の補償を施したシステムを構成すると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} x_M(k+1) &= P x_M(k) + Q w(k) \\ y_M(k) &= C x_M(k) \\ W(k) &= -f x_M(k) + K \{ l R(k) - y_M(k) \} \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

ここで

K : フィードバックゲイン

l : 定常偏差補償ゲイン

$R(k)$: 設定軌道 (目標位置)

$y_M(k)$: モデルの出力

このシステムのブロック線図をFig. 3に示す。次にこのシステムを用い、軌道制御のシミュレーションを

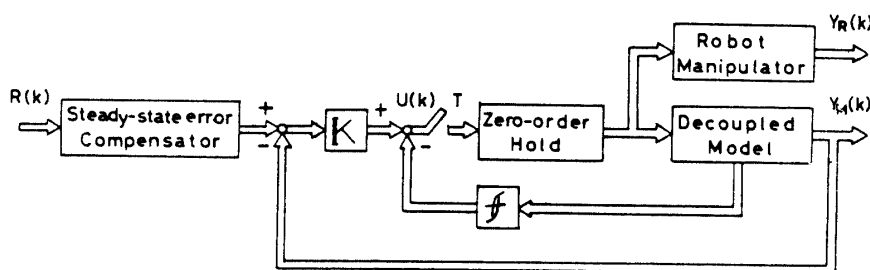


Fig. 3 Block diagram of the system

行う。

3.3 シミュレーション結果および考察

ムーブマスタIIの最大設定速度400mm/s, リンク1の設定回転角度150deg, リンク2の設定回転角度30deg, サンプル周期0.01s, レギュレータの極を0.2, 0.4に設定した場合の目標軌道と, モデルの出力およびムーブマスタIIの応答をFig. 4に示す, またその時の位置の偏差をFig. 5に示す。

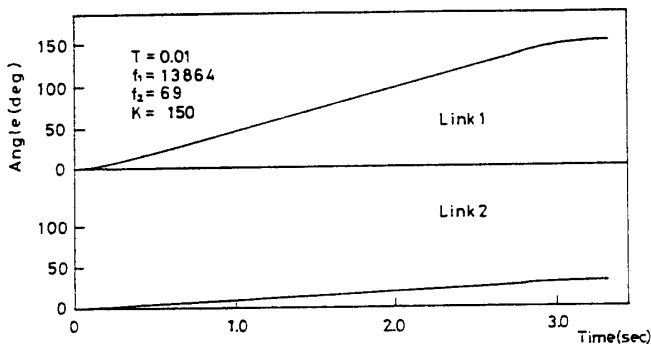


Fig. 4 Responses of the position of links

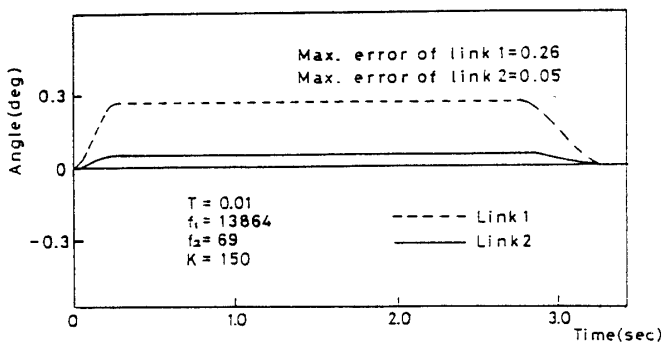


Fig. 5 Errors of the position of links

Fig. 4において, モデルの出力とムーブマスタIIの応答は目標軌道にほぼ一致しているため, 一本の実線で表わされている。またFig. 5においては, リンク2

よりリンク1のほうが偏差が大きいために, これはリンク1のほうが慣性が大きいためと考えられる。偏差がFig. 5のような形で表われたのは, 目標軌道の設定の仕方によるものと考えられる。また動作途中において偏差が減少しないのは, 構成したサーボ系の目標値が時変であるためと考えられる。

4. 結 論

非線形多変数システムである産業用ロボット(ムーブマスタII)に対して非干渉制御理論を適用し, 多入力多出力のシステムを1入力1出力のサブシステムに分割した。このサブシステムについてソフトウェアサーボ系を構成し2つのリンクについてシミュレーションを行った結果, 良好な応答が得られた。

参 考 文 献

- 1) 和田憲造, 香川浩之, 早野延男: 山口大学工学部研究報告, 37-2, 221, (1987)
- 2) E. Freund: "Fast nonlinear control with arbitrary pole-placement for industrial robots and manipulators", Int. J. Robotics Research 1, 1, 65-78, (1982)
- 3) 吉川恒夫: "マニピュレータの多変数制御", 日本ロボット学会誌, 1-2, 10-15, (1983)
- 4) E. Freund: "The structure of decoupled nonlinear system", Int. J. Control vol. 21, No. 3, 443-450, (1975)
- 5) 高野政晴, 古田勝久監訳: ロボット・モーションII, CBS出版, (1985)
- 6) 古田勝久他3名: メカニカルシステム制御, オーム社, (1984)
- 7) 内山勝, 吉川恒夫: ロボット基礎講習会テキスト, 主催: 計測自動制御学会, (1986)

(昭和62年4月15日受理)