

## 非駆動関節を有するマニピュレータの動的制御\*

### (2自由度マニピュレータの位置制御系)

荒井 裕彦<sup>\*1</sup>, 館 暲<sup>\*1</sup>

## Dynamic Control of a Manipulator with Passive Joints

### (Position Control System of a Two-Degree-of-Freedom Manipulator)

Hirohiko ARAI and Susumu TACHI

The authors propose a method of controlling the position of a manipulator with passive joints which have holding brakes instead of actuators. In this method, the coupling characteristics of manipulator dynamics are used, and no additional mechanisms are required. In this paper, the effectiveness of the method is verified by experiments using a prototype manipulator. The prototype is a two-degree-of-freedom, horizontally articulated manipulator. The first axis is an active joint and the second axis is a passive joint. While the brake of the passive joint is released, the passive joint is indirectly controlled by the motion of the active joint through the use of dynamic coupling. While the brake is engaged, the active joint is controlled. By combining these two control modes, the total position of the manipulator is controlled. The experiments show that the precise positioning of the passive joint is feasible by use of the proposed method.

**Key Words:** Robotics, Manipulator, Dynamic Coupling, Passive Joint, Point-to-Point Control

## 1. 結 言

マニピュレータの最も基本的なハードウェア上の構成は、各関節に対しその関節を駆動するアクチュエータと関節変位を検出するセンサが1個ずつ対応するもので、その場合マニピュレータの自由度とアクチュエータの個数とは一致する。マニピュレータの軽量化、省エネルギー化、コストダウン等を目的として、アクチュエータ数よりも多くの自由度を制御する種々の手法が提案されてきたが、特殊な付加的機構に依存するものが中心である。

一方マニピュレータの力学系は通常、強い非線形性・干渉性をもつ<sup>(1)</sup>。それらは一般の制御においては外乱として扱われることが多いが、逆にそれらを積極的に利用した制御手法も提案されている<sup>(2)(3)</sup>。関節間の動力学的干渉によって外乱が発生するということは、力の発生能力をもたない関節の運動をほかの関節の運動によって引き起こせることも意味する。著者らは、アクチュエータ数よりも多くの自由度をもつマニピュ

レータを特殊な機構を用いずに制御する方法として、アクチュエータの代わりに保持ブレーキをもつ非駆動関節を、動力学的干渉性を利用して制御する手法を提案している。前報<sup>(4)</sup>では制御法の原理と制御が可能になる条件について述べるとともに、シミュレーションにより本手法の実現可能性を示した。本報では、非駆動関節を有する2自由度の水平多関節マニピュレータを試作し、三つのレベルからなる位置制御系を構成して、本手法の有効性を実験的に検証したのでその結果を報告する。

## 2. 試作マニピュレータの構成

### 2.1 マニピュレータの構造

試作した2自由度マニピュレータの概観を図1に示す。第1軸はアクチュエータをもつ能動関節、第2軸はアクチュエータの代わりに保持ブレーキをもつ非駆動関節である。各リンク長は、第1リンク・第2リンクともに300mmで、第2リンクの質量分布は均一とした。能動関節のアクチュエータは定格35WのDCサーボモータと減速比50のハーモニックドライブ減速機を組合せたものである。増幅部は出力 $\pm 75$ V、 $\pm 4$ AのPWMアンプを用い、電流制御によりモータトルクを制御する。非駆動関節の保持ブレーキは静摩擦トルク12N・mの励

\* 平成2年4月11日 第2回ロボティクス・自動化システムシンポジウムにおいて講演、原稿受付 平成2年5月9日。

<sup>\*1</sup> 正員、機械技術研究所ロボット工学部(☎305 つくば市並木1-2)。

磁作動型、乾式単板電磁ブレーキを用いた。動作の高速化のために4倍過励磁方式の制御器によって駆動している。各関節の角度はロータリエンコーダを用いて検出する。能動関節のエンコーダ(モータ軸直結)は減速機出力軸で200 000 P/R, 非駆動関節のエンコーダは24 000 P/Rである。

2.2 数式モデル 制御対象であるマニピュレータを図2のモデルで表す。ここで、

- $\phi$  : 能動関節の関節角
- $\psi$  : 非駆動関節の関節角
- $m_1$  : 第1リンク質量
- $m_2$  : 第2リンク質量
- $L$  : 第1アーム長
- $l_1$  : 第1関節-第1アーム重心位置間の距離
- $l_2$  : 第2関節-第2アーム重心位置間の距離
- $J_1$  : 第1リンクの重心まわり慣性モーメント
- $J_2$  : 第2リンクの重心まわり慣性モーメント

このマニピュレータの運動方程式をLagrange方程式を用いて求めると、

$$M_{11}\ddot{\phi} + M_{12}\ddot{\psi} + D_{112}\dot{\phi}\dot{\psi} + D_{122}\dot{\psi}^2 + c_\phi\dot{\phi} + C_{\phi s} = \tau_\phi \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$M_{21}\ddot{\phi} + M_{22}\ddot{\psi} + D_{211}\dot{\phi}^2 = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$M_{11} = J_1 + m_1 l_1^2 + J_2 + m_2 l_2^2 + m_2 L^2 + 2m_2 L l_2 \cos\psi + J_M$$

$$M_{12} = M_{21} = J_2 + m_2 l_2^2 + m_2 L l_2 \cos\psi$$

$$M_{22} = J_2 + m_2 l_2^2, \quad D_{112} = -2m_2 L l_2 \sin\psi$$

$$D_{122} = -m_2 L l_2 \sin\psi, \quad D_{211} = m_2 L l_2 \sin\psi$$

$J_M$ : アクチュエータの等価慣性モーメント

$c_\phi$ : 能動関節の粘性摩擦係数

$C_{\phi s}$ : 能動関節のクーロン摩擦トルク

$\tau_\phi$ : 能動関節のアクチュエータトルク

ただし、各リンクは剛体で、非駆動関節の摩擦トルクは無視でき、アクチュエータトルクはアンプ入力電圧に比例して制御できるとする。

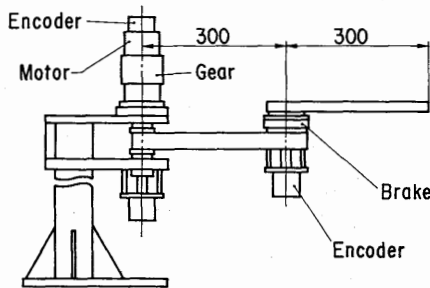


図1 2自由度マニピュレータ

### 3. 制御系の構成

非駆動関節の保持ブレーキ ON の状態では非駆動関節は動かないため、非駆動関節の角度に影響を与えずに能動関節が制御できる。また保持ブレーキ OFF の状態では非駆動関節は自由に回転し、能動関節の運動によって発生する干渉トルクで間接的に非駆動関節が制御できる。これら二つの制御モードの組合せによりマニピュレータの位置・姿勢を制御する。

したがって制御系の構成は、次の三つのレベルに整理できる。

- (1) ブレーキ OFF の状態で非駆動関節の角度・角速度を目標値に追従させるフィードバック制御。
- (2) ブレーキ OFF の状態における非駆動関節の目標軌道設計および軌道制御。
- (3) ブレーキ ON/OFF および能動関節の制御を含むマニピュレータ全体の PTP 制御。

本章ではまずブレーキ OFF の状態における非駆動関節の制御の基本原理についてふれ、ついで上記三つの各レベルにおける制御の構成について述べる。

#### 3.1 原理

運動方程式(1)、(2)の $\phi, \dot{\phi}, \psi, \dot{\psi}$ に各関節で計測された角度および角速度の現在値を代入すると、慣性項の係数 $M_{11}, M_{12}, M_{21}, M_{22}$ , コリオリ・遠心力項 $D_{112}\dot{\phi}\dot{\psi}, D_{122}\dot{\psi}^2, D_{211}\dot{\phi}^2$ および摩擦トルク $c_\phi\dot{\phi}, C_{\phi s}$ が求められる。さらに加速度 $\ddot{\psi}$ に目標値( $=\ddot{\psi}_d$ )を与えると、式(2)は $\ddot{\phi}$ を未知数とする一次方程式とみなせる。 $M_{21} \neq 0$ ならば式(2)は一意に解くことができ、

$$\ddot{\phi} = -\frac{M_{22}\ddot{\psi}_d + D_{211}\dot{\phi}^2}{M_{21}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

式(3)を式(1)に代入すると、

$$\tau_\phi = \left( M_{12} - \frac{M_{11}M_{22}}{M_{21}} \right) \ddot{\psi}_d + D_{112}\dot{\phi}\dot{\psi} + D_{122}\dot{\psi}^2 - \frac{M_{11}D_{211}\dot{\phi}^2}{M_{21}} + c_\phi\dot{\phi} + C_{\phi s} \quad \dots\dots\dots(4)$$

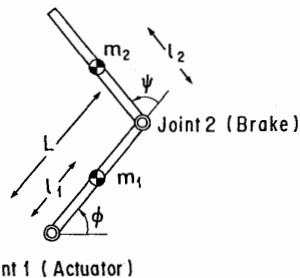


図2 マニピュレータのモデル

式(4)で求められたトルク  $\tau_\phi$  を与えれば、角加速度  $\ddot{\phi}, \ddot{\phi}_a$  が得られる。すなわちブレーキ OFF の状態では、能動関節トルクによって、非駆動関節の角加速度  $\ddot{\phi}$  が任意に決定できる。

**3・2 フィードバック制御** ブレーキ OFF の状態で非駆動関節の角度・角速度を目標値に追従させるために、式(4)の  $\tau_\phi$  をフィードフォワード項とし、それにフィードバック項を付け加えた次のような PID 制御則を考える。

$$\tau_\phi' = \tau_\phi + K_{v\phi}(\dot{\phi}_a - \dot{\phi}) + K_{p\phi}(\phi_a - \phi) + K_{i\phi} \int (\phi_a - \phi) dt \quad (5)$$

ここで  $\phi_a, \dot{\phi}_a, \ddot{\phi}_a$  は非駆動関節の角度、角速度、角加速度の目標値、 $\phi, \dot{\phi}$  は角度、角速度の実測値である。式(5)で得られたトルク  $\tau_\phi'$  を与えれば、

$$\left( M_{12} - \frac{M_{11}M_{22}}{M_{21}} \right) (\ddot{\phi}_a - \ddot{\phi}) + K_{v\phi}(\dot{\phi}_a - \dot{\phi}) + K_{p\phi}(\phi_a - \phi) + K_{i\phi} \int (\phi_a - \phi) dt = 0 \quad (6)$$

という関係が式(1), (2), (4), (5)より得られ、 $K_{p\phi}, K_{v\phi}, K_{i\phi}$  を適当に選べば  $\phi_a - \phi \rightarrow 0$  が保証される。

制御則(5)には非駆動関節の角速度  $\dot{\phi}$  のフィードバックが含まれる。ところが  $\phi$  の計測には  $\phi$  と比してパルス数の少ないエンコーダを用いているため、 $\dot{\phi}$  を  $\phi$  の数値微分により求めると、量子化誤差の影響が生ずる。またセンサとモータとの間に減速機によるコンプライアンス要素が入るため、フィードバックゲインを高くすると発振が起こりやすい。そこで安定なまま位置剛性を高めるため、 $\phi$  の比例・積分フィードバックと、モータ軸において計測された  $\phi$  の速度フィードバックを組合せた制御則を試みた。

式(2)において遠心力項が無視でき、 $M_{21}$  の時間変化が十分小さいとすれば、両辺を積分して、

$$(\dot{\phi} - \dot{\phi}_0) \approx -\frac{M_{21}}{M_{22}}(\dot{\phi} - \dot{\phi}_0) \quad (7)$$

そこでフィードバック則としては、 $\dot{\phi}_a$  を能動関節の角速度の目標値として、

$$\tau_\phi' = \tau_\phi - \frac{M_{21}}{M_{22}} K_{v\phi}(\dot{\phi}_a - \dot{\phi}) + K_{p\phi}(\phi_a - \phi) + K_{i\phi} \int (\phi_a - \phi) dt \quad (8)$$

とすれば、式(5)のフィードバックとほぼ等価の効果が得られる。ただし  $\dot{\phi}_a$  は任意の目標値ではなく、式(3)における  $\dot{\phi}$  を積分して求めた値である。

上の方法はオブザーバにより  $\dot{\phi}$  の推定値  $\hat{\dot{\phi}}$  を求める方法の拡張としても解釈できる。式(1), (2)を線形近似し、システムの状態方程式を求めると、

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}\tau \quad (9)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \phi \\ \dot{\phi} \\ \int \dot{\phi} \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -N_{11}C_\phi & 0 \\ 0 & 0 & -N_{21}C_\phi & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ N_{11} \\ N_{21} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}^{-1}$$

状態変数のうち  $\mathbf{y} = [\phi, \dot{\phi}, \int \dot{\phi}]^T$  は出力として検出できるとし、 $\dot{\phi}$  を推定する一次の最小次元オブザーバを構成する ( $\dot{\phi}$  は  $\phi$  の数値微分により求める)。

$$\dot{\mathbf{z}} = \hat{\mathbf{a}}\mathbf{z} + \hat{\mathbf{b}}\mathbf{y} + \hat{\mathbf{j}}\tau \quad (10)$$

$$\hat{\dot{\phi}} = \mathbf{z} + \mathbf{h}\mathbf{y}$$

$\mathbf{h} = [h_1, h_2, h_3]$  を設計パラメータとして Gopinath の方法により各係数を決定すると、

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{a}} &= -h_2 \\ \hat{\mathbf{b}} &= [-h_1, h_2, -h_2^2, -h_1 - (N_{21} - N_{11}h_3)C_\phi - h_2h_3] \\ \hat{\mathbf{j}} &= N_{21} - h_3N_{11} \end{aligned} \quad (11)$$

オブザーバの極は  $-h_2$  になるから  $h_2 > 0$  において安定である。 $h_1 = 0, h_3 = N_{21}/N_{11} (= -M_{21}/M_{22})$  とおけば、

$$\dot{\mathbf{z}} = -h_2\mathbf{z} - h_2^2\phi + \frac{M_{21}}{M_{22}}h_2\dot{\phi} \quad (12)$$

$$\hat{\dot{\phi}} = \mathbf{z} + h_2\phi - \frac{M_{21}}{M_{22}}\dot{\phi}$$

となり、 $\phi, \dot{\phi}$  のみから  $\dot{\phi}$  が推定できる。

ところでオブザーバ(12)を伝達関数で表すと、

$$\hat{\dot{\phi}} = \frac{h_2}{s + h_2} s\psi + \frac{s}{s + h_2} \left( -\frac{M_{21}}{M_{22}}\dot{\phi} \right) \quad (13)$$

したがって  $\hat{\dot{\phi}}$  は、 $\phi$  の微分値をカットオフ周波数  $h_2/2\pi$  の一次 LPF に通した値に、 $-(M_{21}/M_{22})\dot{\phi}$  を同一周波数の一次 HPF に通した値を加えたものである。 $h_2 = 0$  とすれば  $\hat{\dot{\phi}} = -(M_{21}/M_{22})\dot{\phi}$  であり、式(8)と同じく  $\dot{\phi}$  がフィードバックされる。ただし  $h_2 = 0$  の場合  $\hat{\dot{\phi}}$  の  $\dot{\phi}$  に対する誤差は零に収束せず、遠心力項や  $M_{21}$  の時間変化に起因する誤差が残る。そこでそれらを考慮した式(3)を積分して  $\dot{\phi}_a$  を求め、誤差を補償したのが制御則(8)であると解釈できる。

**3・3 非駆動関節の軌道制御** 非駆動関節のブレーキが OFF の状態において、ある目標軌道に沿って非駆動関節の位置決めを行う。その際非駆動関節の目標軌道の設計および軌道制御の方法について述べる。非駆動関節の角度の初期値を  $\phi_0$ 、目標値を  $\phi_{\text{end}}$  とすると目標軌道  $\phi_d(t) (T_1 \leq t \leq T_2)$  が満たすべき条件は、

- (a)  $\phi_d(T_1) = \phi_0, \phi_d(T_2) = \phi_{\text{end}}$
- (b)  $\dot{\phi}_d(T_1) = \dot{\phi}_d(T_2) = 0$
- (c)  $\ddot{\phi}_d(t), (T_1 \leq t \leq T_2)$  が有限の値をとる。

の三つである。(a)は軌道に沿って位置決めを実行す

るための条件, (b)は非駆動関節の停止中にブレーキ ON/OFF を行うための条件, (c)は目標軌道が物理的に実現可能であるための条件である。

さらに, ブレーキ作動時間の遅れ(ON → OFF 時 10~20 ms, OFF → ON 時 20~50 ms)も考慮して,

$$(d) \quad \dot{\phi}_d(t)=0 \quad (T_1 \leq t \leq T_1', T_2' \leq t \leq T_2)$$

を付け加え, 時刻  $T_1$  でブレーキ OFF,  $T_2'$  でブレーキ ON とする。ただし  $T_1' - T_1 = 20$  ms,  $T_2 - T_2' = 60$  ms とした。

以上の条件をすべて満たす軌道として,

$$\begin{aligned} \phi_d(t) &= \phi_0 \quad (T_1 \leq t \leq T_1') \\ \phi_d(t) &= (\phi_{\text{end}} - \phi_0) \\ &\times \left\{ \frac{t - T_1'}{T_2' - T_1'} - \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi(t - T_1')}{T_2' - T_1'} \right\} + \phi_0 \\ &\quad (T_1' \leq t \leq T_2') \\ \phi_d(t) &= \phi_{\text{end}} \quad (T_2' \leq t \leq T_2) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(14)$$

を採用した。また能動関節トルクにある制限値  $\tau_{\phi \text{max}}$  を設け, 能動関節トルクのうち慣性成分の絶対値がその値を越えないように  $T_2' - T_1'$  を決定した。式(4)より,

$$\ddot{\phi}_{d \text{max}} = \left( \frac{M_{21}}{M_{12}M_{21} - M_{11}M_{22}} \right) \tau_{\phi \text{max}} \quad \dots\dots\dots(15)$$

とおき,

$$T_2' - T_1' = |2\pi(\phi_{\text{end}} - \phi_0) / \ddot{\phi}_{d \text{max}}|^{1/2} \quad \dots\dots\dots(16)$$

図3に設計された目標軌道の例を示す。

非駆動関節を目標軌道に追従させるには, 目標値  $\phi_d, \dot{\phi}_d, \ddot{\phi}_d$  および実測値  $\phi, \dot{\phi}, \ddot{\phi}$  をもとに式(4)のフィードフォワード計算および式(8)のフィードバック計算を行い,  $\tau_{\phi}$  を求める。 $\dot{\phi}_d(t)$  および  $\tau_{\phi}(t)$  ( $T_1 \leq t \leq T_2$ ) の値を以下の手順であらかじめ計算しておけば, 実時間制御においては式(8)の計算のみ行えばよく, サンプル時間が短縮できる。

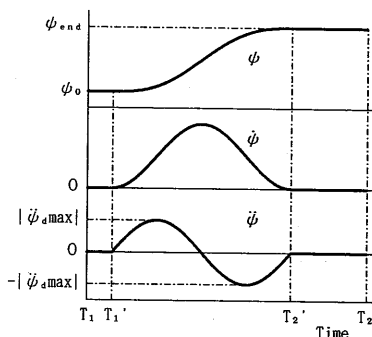


図3 非駆動関節の目標軌道

① 非駆動関節の目標軌道  $\phi_d(t)$  ( $T_1 \leq t \leq T_2$ ) を与え,  $\dot{\phi}_d, \ddot{\phi}_d$  を求める。

② 能動関節の初期状態  $\phi_d(T_1), \dot{\phi}_d(T_1)$  を与える。

③ 式(3), (4)より,  $\ddot{\phi}_d$  および  $\tau_{\phi}(t)$  の値を求める。

④  $\dot{\phi}_d, \phi_d$  を数値積分し, サンプル間隔  $\Delta T$  後の  $\phi_d, \dot{\phi}_d$  の値を求める。

⑤ ③, ④を反复し,  $T_1 \leq t \leq T_2$  の範囲で  $\phi_d(t)$  および  $\dot{\phi}_d(t)$  を求める。

**3.4 PTP 制御** 任意の2点間の位置決めを行うためにブレーキ ON/OFF の二つの状態における制御を組合せて運動パターンを構成する。ブレーキ OFF において非駆動関節を制御し, ブレーキ ON において能動関節を制御するから, マニピュレータ全体の姿勢を制御するには最低1回のモード切替が必要である。ここではモード切替を2回とし, 軌道を

(i) :  $T_0 \leq t \leq T_1$ , ブレーキ ON

(ii) :  $T_1 \leq t \leq T_2$ , ブレーキ OFF

(iii) :  $T_2 \leq t \leq T_3$ , ブレーキ ON

の三つに区分する。(i)では能動関節による初期加速を行い, (ii)では非駆動関節の位置決め, (iii)では能動関節の位置決めを行う。

能動関節, 非駆動関節の角度の初期値をそれぞれ  $(\phi_0, \dot{\phi}_0)$ , 目標値を  $(\phi_{\text{end}}, \dot{\phi}_{\text{end}})$  とする。(ii)における  $\phi_0$  から  $\phi_{\text{end}}$  への非駆動関節の位置決めについては3.3節に述べた。(i)では  $\phi = \phi_0, \dot{\phi} = 0$  の状態から,  $\phi = \phi_d(T_1), \dot{\phi} = \dot{\phi}_d(T_1)$  を目標値とする制御を行う。(iii)では  $\phi = \phi_d(T_2), \dot{\phi} = \dot{\phi}_d(T_2)$  の状態から,  $\phi = \phi_{\text{end}}, \dot{\phi} = 0$  を目標値とする制御を行う。(i), (iii)でも(ii)と同様に, 能動関節トルクの制限値をもとに  $|\dot{\phi}|$  の上限を決定し, 正弦波状の加減速を行う軌道を設計した。

(ii)における能動関節の初期状態  $\phi_d(T_1), \dot{\phi}_d(T_1)$  は任意に選ぶことができるから, 試行錯誤によって位置決め時間  $T_3 - T_0$  が最小となるように選んだ。また(i), (iii)における能動関節のフィードバック制御は, 通常のマニピュレータ関節の制御と同様である。

図4に以上三つのレベルからなる制御系全体の構成を示す。

#### 4. 実験

試作マニピュレータにおける, 運動方程式(1), (2)に含まれる各パラメータの値を表1に示す。これらのうち,  $M_{12}, M_{21}, M_{22}, D_{112}, D_{122}, D_{211}$  については  $m_2 = 1.1$  kg,  $L = 0.3$  m,  $l_2 = 0.15$  m, 第2リンクの質量分布均一という条件から計算により求めた。また  $C_{\phi s}$  はトルク測定から,  $c_{\phi}$  はステップ応答から,  $M_{11}$  は正弦波入力

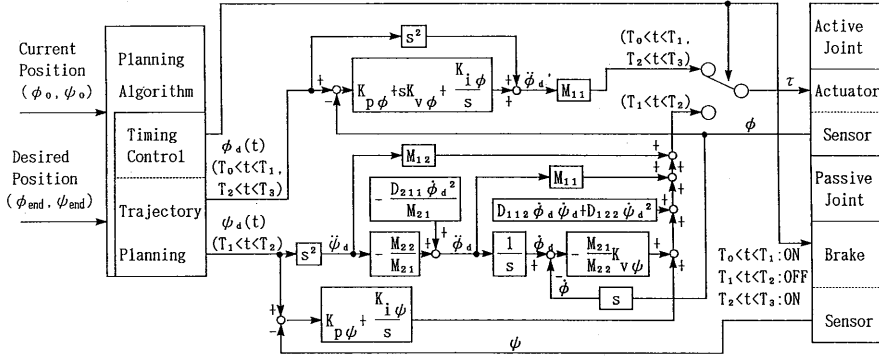
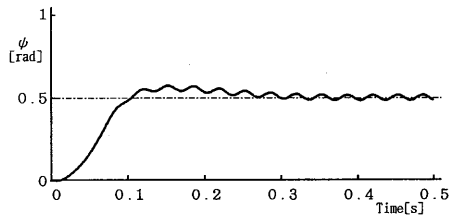


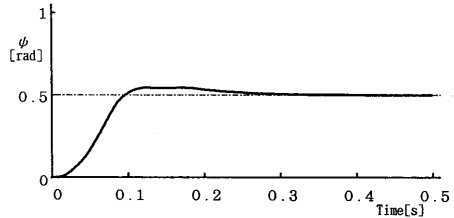
図4 制御系の構成

表1 試作マニピュレータの動特性

$M_{11}$	$0.61 + 0.090 \sin \psi$	[kgm <sup>2</sup> ]
$M_{12}$	$0.030 + 0.045 \cos \psi$	[kgm <sup>2</sup> ]
$M_{21}$	$0.030 + 0.045 \cos \psi$	[kgm <sup>2</sup> ]
$M_{22}$	0.030	[kgm <sup>2</sup> ]
$D_{112}$	$-0.090 \sin \psi$	[kgm <sup>2</sup> ]
$D_{122}$	$-0.045 \sin \psi$	[kgm <sup>2</sup> ]
$D_{211}$	$0.045 \sin \psi$	[kgm <sup>2</sup> ]
$c_{\phi}$	2.2	[kgm <sup>2</sup> /s]
$C_{\phi s}$	4.3	[Nm]



(a) 制御則(5)による応答



(b) 制御則(8)による応答

図6 非駆動関節のステップ応答

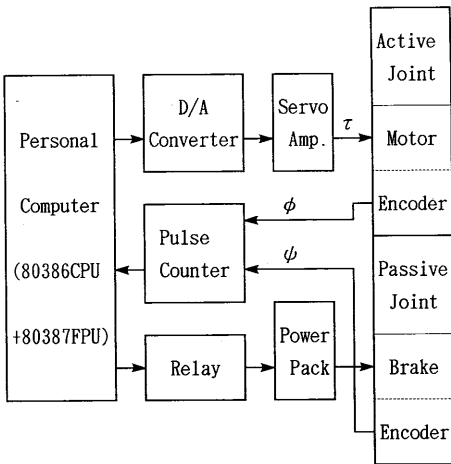


図5 制御装置の構成

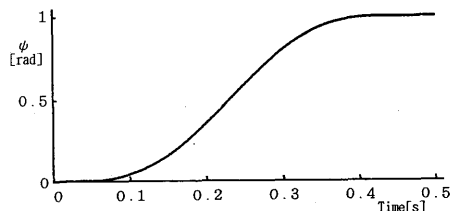
トルクに対する角度振幅から実測した。アクチュエータトルクとアンプ入力電圧の関係についても実験的に校正した。

パーソナルコンピュータ(16MHz 80386 CPU+80387 数値演算プロセッサ)を用いて、3章に述べた制御系を実現した。プログラムはC言語を用い、サン

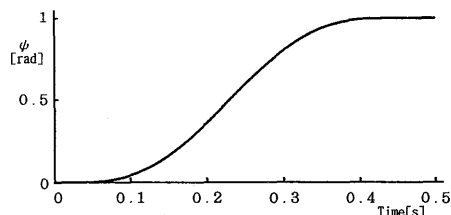
リング間隔は1msとした。装置の構成を図5に示す。

図6は制御則(5)または(8)によるステップ応答の結果である。能動関節、非駆動関節ともに静止した状態から、非駆動関節の目標値にステップ状(0→0.5rad)の変化を与えた。閉ループ系の極が-34.2(三重根)となるようにゲインを設定した。制御則(5)による応答(a)には振動が生じている。同じゲインに対しても、式(8)による応答(b)は安定している。制御則(8)では、制御則(5)で振動がはじまる位置ゲインの10倍以上にゲインを上げて安定した応答が得られた。

次に能動関節、非駆動関節ともに静止した状態から非駆動関節に目標軌道を与え、3・3節で述べたアルゴリズムを用いて追従させる制御を行った。 $\phi_0=0, \psi_{end}=1 \text{ rad}, T_2-T_1=0.5 \text{ s}$ として、式(14)の目標軌道を与え



(a) 実験結果



(b) 目標軌道

図7 非駆動関節の軌道追従

た。結果を図7に示す。(a)は制御則(8)による応答結果である。ほぼ目標軌道(b)に沿った制御が行われている。ここでは閉ループ極は $-41.5$ (三重根)とした。

図8のスティック線図は3・4節のアルゴリズムによる、マニピュレータ全体のPTP制御の実行例である。位置決め時間は $1.05$ sであった。

非駆動関節の位置決め精度を調べるため、 $\phi_0=0, \psi_0=0, \phi_{\text{end}}=0 \sim \pi/2, \psi_{\text{end}}=\pi/12 \sim \pi/2$ の範囲で $\phi_{\text{end}}, \psi_{\text{end}}$ を $\pi/12$ 刻みに変え、すべての点について位置決めを行った。 $\psi$ の位置決め誤差は $1.3 \times 10^{-3}$  rad以下であった。

制御の再現性を調べるため、 $\phi_0=0, \psi_0=0$ から $\phi_{\text{end}}=\pi/2, \psi_{\text{end}}=\pi/3$ に100回位置決めを行い、繰返し精度を測定した。 $\psi$ の位置決め誤差の平均値は、 $4.5 \times 10^{-4}$  radであった。また繰返し精度の指標として求めた標準偏差は $1.7 \times 10^{-4}$  radであった。エンコーダの分解能は $2.6 \times 10^{-4}$  radであるから、ほぼ限界に近い繰返し精度が得られている。

さらに、パラメータ変動の影響を調べるため、アーム先端に $0.5$  kgのウェイトを取付け、ウェイトなしのパラメータで繰返し位置決めを行った( $\phi_0=0, \psi_0=0$

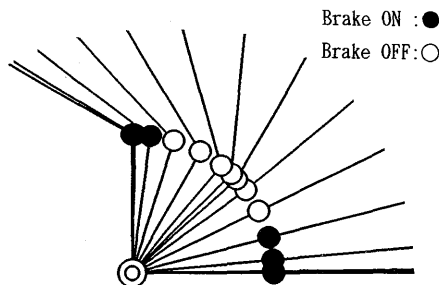


図8 PTP制御の結果

( $\phi_0=0, \psi_0=0, \phi_{\text{end}}=\pi/2, \psi_{\text{end}}=\pi/3$ )

→ $\phi_{\text{end}}=\pi/2, \psi_{\text{end}}=\pi/3$ ).  $\psi$ の平均誤差は $2.1 \times 10^{-3}$  radと比較的小さく、モデル誤差の影響の大半はフィードバック制御によって補償できることがわかった。また $\psi$ の標準偏差は $2.1 \times 10^{-4}$  radで、繰返し精度はほとんど悪化しなかった。

## 5. 結 言

本報では第2軸がアクチュエータをもたず保持ブレーキとセンサのみからなる非駆動関節である2自由度の水平多関節マニピュレータを試作し、動力学の干渉性を利用した位置制御の基礎実験を行った。本手法により非駆動関節についても高い繰返し精度をもつ位置制御が実現できることが確認された。

本手法は基本的にマニピュレータの動力学モデルに依存するものの、フィードバック制御によりモデル誤差のかなりの部分が補償できることも明らかになった。さらに大きなパラメータの変動がある場合にも、実時間パラメータ同定と適応制御手法を併用すれば有効であると考えられる。

## 文 献

- (1) Paul, R. P., *Robot Manipulators*, (1981), 157, MIT Press.
- (2) Vukobratović, M. (加藤監訳), ロボットの手—力学と運動—, (1979), 101, 日刊工業新聞社.
- (3) 邱・ほか2名, 日本ロボット学会第7回学術講演会予稿集, (1989), 637.
- (4) 荒井・館, 計測自動制御学会論文集, 25-9(1989), 1012.