

(19)日本国特許庁 ( J P )

(12) 特 許 公 報 ( B 2 )

(11)特許出願公告番号

特公平6-75835

(24) (44)公告日 平成 6 年(1994) 9 月28日

(51)Int.Cl. <sup>5</sup>	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
B 2 5 J	9/06	A 8611-3F		
	9/10	Z		
	13/00	Z		

請求項の数 2 (全 10 頁)

(21)出願番号	特願平1-80032	(71)出願人	999999999 工業技術院長 東京都千代田区霞が関 1 丁目 3 番 1 号
(22)出願日	平成 1 年(1989) 3 月30日	(72)発明者	荒井 裕彦 茨城県つくば市並木 1 丁目 2 番地 工業技 術院機械技術研究所内
(65)公開番号	特開平2-262989	(72)発明者	館 ▲あきら▼ 茨城県つくば市並木 1 丁目 2 番地 工業技 術院機械技術研究所内
(43)公開日	平成 2 年(1990)10月25日	(74)指定代理人	工業技術院機械技術研究所長
出願人において、実施許諾の用意がある。		審査官	島田 信一
		(56)参考文献	特開 昭63-80079 ( J P , A )

(54)【発明の名称】 マニピュレータ及びその制御方法

1

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 n 自由度のマニピュレータであって、 n 個の関節部を有し、前記 n 個の関節部のうちの k 個の関節部にアクチュエータを備え、残り n - k 個 ( k < n - k ) の関節部に保持ブレーキを備えていることを特徴とするマニピュレータ

【請求項 2】 n 自由度のマニピュレータであって、 n 個の関節部を有し、前記 n 個の関節部のうちの k 個の関節部にアクチュエータを備え、残り n - k 個の関節部に保持ブレーキを備えるマニピュレータの操縦方法であって、前記保持ブレーキを備えた関節部のうち m 個 ( m < k ) の関節部の保持ブレーキを解放し、残り n - k - m 個の関節部の保持ブレーキを作用した状態で関節間の動力学的干渉によりアクチュエータを有する関節のトルクまたは力によって前記 m 個のブレーキを解放した関節に

2

角加速度または加速度を発生させて前記ブレーキを解放した関節の角度または変位を制御し、前記手順を少なくとも 2 回以上行って n - k 個の保持ブレーキを備えた関節の角度または変位を制御し、前記保持ブレーキを全て作用した状態ではアクチュエータを有する関節の角度または変位を前記アクチュエータにより制御することを特徴とするマニピュレータの制御方法

【発明の詳細な説明】

[ 産業上の利用分野 ]

10 この発明は n 自由度のマニピュレータアームの位置制御をするための技術に関するものである。人間の手作業代行のため、多自由度のリンクからなるアームを有するロボットが開発され、人間の行う巧みな動作を実現するため、位置制御が行なわれている。

[ 従来技術 ]

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、リンク機構の各関節に対しその関節を駆動する1個のアクチュエータとその関節の回転の検出するセンサが対応するものである。従ってマニピュレータは通常各関節で実質的に独立の位置決め能力を持ち、マニピュレータの自由度とアクチュエータの個数は一致する。自由度の数に比べて、アクチュエータの数を減らすことを目的としてアクチュエータ数より多い自由度を制御する種々の手法が提案されているが、差動機構と対象物の拘束による方法や、関節間に動力伝達機構を設ける方法等、機構に依存するものが中心である。

しかし、機構に依存する上記従来の方法はマニピュレータの構造を複雑にし、これにともなって、価格が高価になりかつマニピュレータの重量を大きくするので、大きな駆動エネルギーを必要とする。

この点を解決するために、本件発明の発明者は先に新たなマニピュレータを提案した(昭和63年特許願第80079号)。この新たに提案されたマニピュレータは $n$ 自由度のマニピュレータであって、 $n$ 個の関節部を有し、前記 $n$ 個の関節部のうちの $k$ 個の関節部にアクチュエータを備え、残り $n - k$ 個( $k < n - k$ )の関節部に保持ブレーキを備えていることを特徴としており、マニピュレータ関節のアクチュエータ類を減少させる顕著な効果を発揮するものである。

[発明が解決しようとする課題]

しかし上記発明は関節の数 $n$ とアクチュエータの数 $k$ との間に( $k < n - k$ )のブレーキを備えるという制約があったので、これがアクチュエータ等の減少の制約となっている。

本件発明では上記の制約をなくすことによりマニピュレータ関節のアクチュエータ類をより一層減少させ、大幅なコストダウンを可能にし、また関節を軽量化することが可能であり、アクチュエータの小型化、省エネルギー化を可能とするマニピュレータ及びその制御方法を提供することを目的とするものである。

[課題を解決するための手段]

以下では関節を回転関節として述べるが、直動関節についても全く同様に適用できる。

この目的に対応して、この発明のマニピュレータは、 $n$ 自由度のマニピュレータであって、 $n$ 個の関節部を有し、前記 $n$ 個の関節部のうちの $k$ 個の関節部にアクチュエータを備え、残り $n - k$ 個( $k < n - k$ )の関節部に保持ブレーキを備えていることを特徴としている。

また、この発明のマニピュレータの制御方法は、 $n$ 自由度のマニピュレータであって、 $n$ 個の関節部を有し、前記 $n$ 個の関節部のうちの $k$ 個の関節部にアクチュエータを備え、残り $n - k$ 個の関節部に保持ブレーキを備えるマニピュレータの操縦方法であって、前記保持ブレーキを備えた関節部のうち $m$ 個( $m < k$ )の関節部の保持ブレーキを解放し、残り $n - k - m$ 個の関節部の保持ブレ

ーキを作動した状態で関節間の動力学的干渉によりアクチュエータを有する関節のトルクまたは力によって前記 $m$ 個のブレーキを解放した関節に角加速度または加速度を発生させて前記ブレーキを解放した関節の角度または変位を制御し、前記手順を少なくとも2回以上行って $n - k$ 個の保持ブレーキを備えた関節の角度または変位を制御し、前記保持ブレーキを全て作動した状態ではアクチュエータを有する関節の角度または前記アクチュエータにより制御することを特徴としている。

10 [作用]

この発明のマニピュレータ及びマニピュレータの制御方法では、 $k$ 個のアクチュエータのトルクによって( $n - k$ )個の保持ブレーキのうち $m$ 個を解放した状態で保持ブレーキのみの $m$ 個の関節を含む $k$ 個の関節の角度を制御し、前記手順を少なくとも一回以上反復して保持ブレーキのみの( $n - k$ )個の関節の角度を制御し、保持ブレーキを全て作動させた状態でアクチュエータを備えた $k$ 個の関節の角度を制御し、これによってマニピュレータの手先を任意の点から任意の点に移動させることができる。

20

[実施例]

以下、この発明の詳細を一実施例を示す図面について説明する。

マニピュレータの力学系が通常持っている非線形性・干渉性は各関節上に構成されたサーボ機構に対して外乱として働く。この外乱トルクを補償することがマニピュレータの制御における主要な問題の一つとなっている。ところが外乱トルクが発生するということは、他の関節の運動によって、それ自身はトルク発生能力を持たない関節の運動を引き起こすことができるということである。

30

この発明はアクチュエータを持たない非駆動関節を有するマニピュレータを、このような動力学的干渉性を利用して制御する技術に関するものである。

まず、原理を説明する。

第1図において、1はマニピュレータである。マニピュレータ1は複数のリンク $l$   $\{l_1, l_2, \dots, l_n\}$ を関節 $C$   $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ で連結した $n$ 自由度をなしている。先端のリンク $l_n$ はハンド2となっている。複数の関節 $C$   $\{C_1, \dots, C_n\}$ のうち、任意の $k$ 個の関節 $C$   $\{C_1, \dots, C_k, \dots\}$ にはアクチュエータ $A$   $\{A_1, \dots, A_k, \dots, A_n\}$ が備えられており、残余の( $n - k$ )個の関節 $C$   $\{C_2, \dots, C_n\}$ には保持ブレーキ $B$   $\{B_1, \dots, B_{n-k}\}$ が備えられている。

40

アクチュエータ $A$ はそれぞれ隣り合うリンクを駆動して相対位置、相対角速度、相対角加速度を制御可能である。

保持ブレーキ $B$ はそれぞれ隣り合うリンクの動きを固定、解放可能である。

$n$ 自由度のマニピュレータを制御対象とする。そのうち $k$ 自由度の関節は通常のマニピュレータ同様、アクチュエータ $A$ と角度センサで構成される能動関節とし、残り

50

5

$n - k$ 自由度はアクチュエータを持たずに保持ブレーキBと角度センサのみからなる非駆動関節とする ( $0 < k < n$ )。非駆動関節は、保持ブレーキOFFの状態では自由に回転することができる。また、保持ブレーキをONにすると非駆動関節はその角度で固定される。

非駆動関節の保持ブレーキをOFFにすると、能動関節の運動に伴って発生する干渉トルクによって、間接的にその非駆動関節が制御できる。また、保持ブレーキをONにすると、その非駆動関節に影響を与えることなく他の関節の角度を制御できる。更に、すべての非駆動関節の保持ブレーキをONにして固定すれば、通常のマニピュレータと同様に能動関節が制御できる。これらの制御モードを組合せ、制御を行う関節を順次切換えてマニピュレータ全体の位置・姿勢を制御する。

マニピュレータの運動方程式は、

$$M(q)\ddot{q} + b(q, \dot{q}) = u \tag{1}$$

と表される。但し、

$$b(q, \dot{q}) = h(q, \dot{q}) + \dot{q} + g(q) \tag{*}$$

$$q = \begin{bmatrix} \phi & | & m \\ \psi & | & k \\ \theta & | & n-k-m \end{bmatrix}$$

とする。に属する非駆動関節は固定されているから  $\ddot{\theta} = 0$  である。

6

\*  $q \in R^n$  は関節角度ベクトル、  $u \in R^n$  は関節トルクベクトル、  $g(q) \in R^n$  は重力項、  $h(q, \dot{q}) \in R^n$  はコリオリ・遠心力項、  $M(q) \in R^{n \times n}$  は慣性行列、  $R^{n \times n}$  は粘性摩擦行列を表す。

ここで  $q$  の要素のうち任意の  $k$  個の関節角を選んで  $R^k$  とおく、そのうちで非駆動関節は  $m$  個であるとする ( $0 < m < k$ )。すると  $k$  個の能動関節のうちでその中に含まれない関節の数も  $m$  個になり、その角度を  $R^m$  とおくと、に含まれない残り  $n - k - m$  個の関節は全て非駆動関節であり、その角度を  $R^{n-k-m}$  とおく。また、 $k$  個の能動関節のトルクを  $R^k$  とおく。に属する非駆動関節のブレーキはOFF、に属する非駆動関節のブレーキはONにする。ブレーキOFFの非駆動関節のブレーキトルクはゼロとおける。ブレーキONの非駆動関節のブレーキトルクを とおく。  $q, u$  の要素の順序を並べかえ、新たに、

$$u = \begin{bmatrix} \tau & | & k \\ 0 & | & m \\ \nu & | & n-k-m \end{bmatrix} \tag{2}$$

$M(q), b(q, \dot{q})$  もそれに対応して並べかえ、次のように区分する。

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_{11}(q) & M_{12}(q) & M_{13}(q) \\ M_{21}(q) & M_{22}(q) & M_{23}(q) \\ M_{31}(q) & M_{32}(q) & M_{33}(q) \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ m \\ n-k-m \end{matrix}$$

$\begin{matrix} 7 & & 8 \\ & m & k & n-k-m \end{matrix}$

(3)

$$b(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} b_1(q, \dot{q}) \\ b_2(q, \dot{q}) \\ b_3(q, \dot{q}) \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ m \\ n-k-m \end{matrix}$$

(2), (3)を(1)に代入すると、

$$M_{11} \ddot{\theta} + M_{12} \ddot{\eta} + b_1(q, \dot{q}) - = 0 \quad (4a)$$

$$M_{21} \ddot{\theta} + M_{22} \ddot{\eta} + b_2(q, \dot{q}) = 0 \quad (4b)$$

$$M_{31} \ddot{\theta} + M_{32} \ddot{\eta} + b_3(q, \dot{q}) - = 0 \quad (4c)$$

(4a), (4b)の  $(q, \dot{q})$  に各関節で計測された関節角及び角速度の現在値を代入すると、

$b_1(q, \dot{q})$ ,  $b_2(q, \dot{q})$  及び  $M_{11}$ ,  $M_{12}$ ,  $M_{21}$ ,  $M_{22}$  が求められる。更に角加速度  $\ddot{\eta}$  に目標値 ( $= \ddot{\eta}_d$ ) を与えると、(4b)は  $\ddot{\theta}$  に関する連立1次方程式とみなせる。係数行列  $M_{21}$  は と との間の動力的干渉を表わし、マニピュレータの構造や質量分布に依存する。 $M_{21}$  が正則ならば(4b)は一意に解くことができ、

$$\ddot{\theta} = -M_{21}^{-1} M_{22} \ddot{\eta}_d - M_{21}^{-1} b_2(q, \dot{q}) \quad (5)$$

(5)に(4a)を代入すると、

$$\begin{aligned} &= (M_{21} - M_{11} M_{21}^{-1} M_{22}) \ddot{\eta}_d \\ &+ b_1(q, \dot{q}) \\ &- M_{11} M_{21}^{-1} b_2(q, \dot{q}) \end{aligned} \quad (6)$$

こうして求められたトルクを能動関節において発生すれば、角加速度  $\ddot{\theta}$ ,  $\ddot{\eta}_d$  が得られる。すなわち、k個の能動関節のトルクによって、m個の非駆動関節を含むk個の関節の角加速度を任意に決定することができる。m個の能動関節の角加速度  $\ddot{\theta}$  は  $\ddot{\eta}_d$  によって決定され、任意に与えることはできない。また  $n - k - m$  個の非駆動関節の角速度  $\dot{\theta}$ , 角加速度  $\ddot{\theta}$  は0である。しかし角加速度を制御するk個の関節の割当てを、ブレーキのON/OFFによって順次切換えてゆけば、最終的にはすべての関節

の角度が制御できる。(非駆動関節の保持ブレーキを全てONにして非駆動関節を完全に固定した状態は  $m = 0$  に相当し、通常のマニピュレータと同様に能動関節が制御できる。)

<制御アルゴリズム>

30 マニピュレータの位置・姿勢を制御する場合、ブレーキON/OFFによる制御モードの組合せ方によって、無数の制御アルゴリズムが考えられる。まずその一例として、 $m = n - k$  ( $k$ ) の場合の任意の2点間のPTP制御を考える。この場合全ての非駆動関節のブレーキを同時にON/OFF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、マニピュレータの全関節を目標角度に設定するには最低1回のモード切替が必要である。一方ブレーキOFFにおいて非駆動関節と能動関節を正確な目標角度まで同時に動かすことは困難であると考えられる。そこで制御を行う順番としては、まずブレーキOFFで非駆動関節を位置決めし、しかるのちにブレーキONで残りの能動関節に位置決めを行う方が有利である。

これだけでもPTP制御は可能であるが、制御をより容易にするため、最初にブレーキONの区間をつけ加え、そこで能動関節による初期加速を行う。リンク機構に運動エネルギーを与えて、ブレーキOFFの区間で非駆動関節が動きやすくし、能動関節の無駄な動きを小さく抑える。従って2点間を結ぶ軌道を次の3つの区間にわけて制御

を行う(第2図)。

- I. 軸保持区間 ( $T_0 \leq t < T_1$ , ブレーキON)
- II. 軸解放区間 ( $T_1 \leq t < T_2$ , ブレーキOFF)
- III. 軸保持区間 ( $T_2 \leq t < T_3$ , ブレーキON)

IIにおいて非駆動関節を含むk個の目標軌道に沿って動かし、I・IIIにおいて残りのm個の能動関節を初期位置から最終位置まで動かす。

まずIIにおける軌道とアクチュエータのトルクをオフラインで次のように決定する(第3図)。

①非駆動関節を全て含むk個の関節に対し角度、加速度、角加速度の目標値  $\theta_d(t)$ ,  $\dot{\theta}_d(t)$ ,  $\ddot{\theta}_d(t)$  ( $T_1 \leq t < T_2$ ) を与える。(但しブレーキON/OFFの瞬間には非駆動関節が停止していなければならないため、境界条件として  $\dot{\theta}_d(T_1) = \dot{\theta}_d(T_2) = 0$ )

②残りm個の関節について、初期値  $\theta(T_1)$ ,  $\dot{\theta}(T_1)$  を与える。

③(5), (6)式の計算を行い、 $\theta(T_1)$ ,  $\ddot{\theta}(T_1)$  を求める。

④  $\ddot{\theta}(t)$  を数値積分することにより  $\dot{\theta}(T_1 + T)$ ,  $\theta(T_1 + T)$  を求める。

但し Tはサンプリング間隔である。

⑤ { ③(5), (6)式の計算 ④数値積分 } を反復し、IIの全区間にわたってトルク  $\tau$  及び角加速度  $\ddot{\theta}$ , 角速度  $\dot{\theta}$ , 角度  $\theta$  を決定する。

またオフライン計算の結果を用いてIIの区間とI, IIIの区間との間の  $\theta$  の境界値を決定する。

リアルタイムで制御を実行する際には次のようなフィードバック制御則を用いる。

$$\ddot{\theta}_d = \ddot{\theta}_d + K_v (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + K_p (\theta_d - \theta) \tag{7}$$

( $K_v, K_p$  は対角ゲイン行列)

ここで  $\theta_d, \dot{\theta}_d, \ddot{\theta}_d$  は①で与えられた角度、角速度、角加速度の目標値、 $\theta, \dot{\theta}$  は角度、角速度の実測値である。(7)で得られた角加速度  $\ddot{\theta}_d$  を(6)の  $\ddot{\theta}_d$  に代入してトルク  $\tau$  を求める。この場合、 $\dot{\theta}$  も数値積分によらず実測値を用いることができる(第4図)。

I・IIIにおける  $\theta$  の制御は通常のマニピュレータと同一である。Iでは  $\theta(T_0)$ : 初期位置、 $\dot{\theta}(T_0) = 0$  か

ら、②で与える  $\theta(T_1)$ ,  $\dot{\theta}(T_1)$  を目標値とする制御を行う。またIIIでは  $\theta(T_2)$ ,  $\dot{\theta}(T_2)$  から  $\theta(T_3)$ : 最終位置、 $\dot{\theta}(T_3) = 0$  を目標値とする制御を行う(第5図、第6図)。

以上のアルゴリズムによりマニピュレータの関節角  $q$  を任意の2点間で動かすことができる。

$n - k > k$  の場合、同時にブレーキを解放して制御できる非駆動関節の数は最大でk個である。そこで非駆動関節のうち  $m_1$  個 ( $m_1 < k$ ) のブレーキをOFF、他の非駆動関節のブレーキをONにして、 $n - k - k$  の場合と同様の手順によりブレーキOFFの非駆動関節を制御する。位置決めが完了したら非駆動関節のブレーキON/OFFを切換え、異なる組合せの  $m_2$  個 ( $m_2 < k$ ) の非駆動関節を同様に制御する。 $m_1, m_2, \dots$  個ずつ順次すべての非駆動関節の位置決めを行う(第7図)。非駆動関節の位置決めが完了したらすべての保持ブレーキをONにし、位置決めの完了していない能動関節の位置決めを行う。

【発明の効果】

この発明では関節で連続したリンクを有するマニピュレータにおいて、関節間の動学的干渉を利用してアクチュエータを有する関節のトルクによってアクチュエータを有しない関節に角加速度を発生させて角度を制御するので、アクチュエータを有しない関節を伝達機構を要せず駆動することができ、マニピュレータ関節のアクチュエータ数を減らすことができる。したがってマニピュレータの構造が簡単になり小型化、省エネルギー化を図ることができる。

【図面の簡単な説明】

第1図はこの発明のマニピュレータを示す説明図、第2図は制御アルゴリズムを示す説明図、第3図は制御アルゴリズムのフローチャート、第4図はフィードバック制御による収束性を示す線図、第5図、第6図はマニピュレータの運動を示すスティック線図及び軌道、第7図は  $n - k > k$  の場合の制御を示す説明図である。

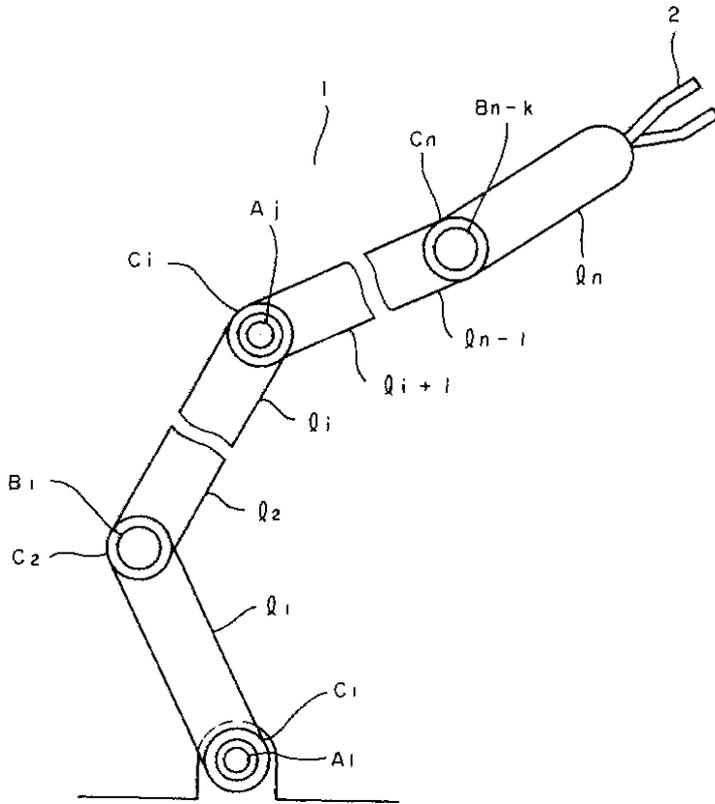
1.....マニピュレータ

A ( $A_1 \sim A_k$ ) .....アクチュエータ

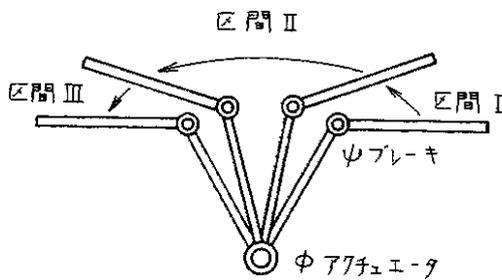
B ( $B_1 \sim B_{n-k}$ ) .....保持ブレーキ

C ( $C_1 \sim C_n$ ) .....関節

【第1図】



【第2図】



区間 I ψ軸保持ブレーキON  
φ軸起動

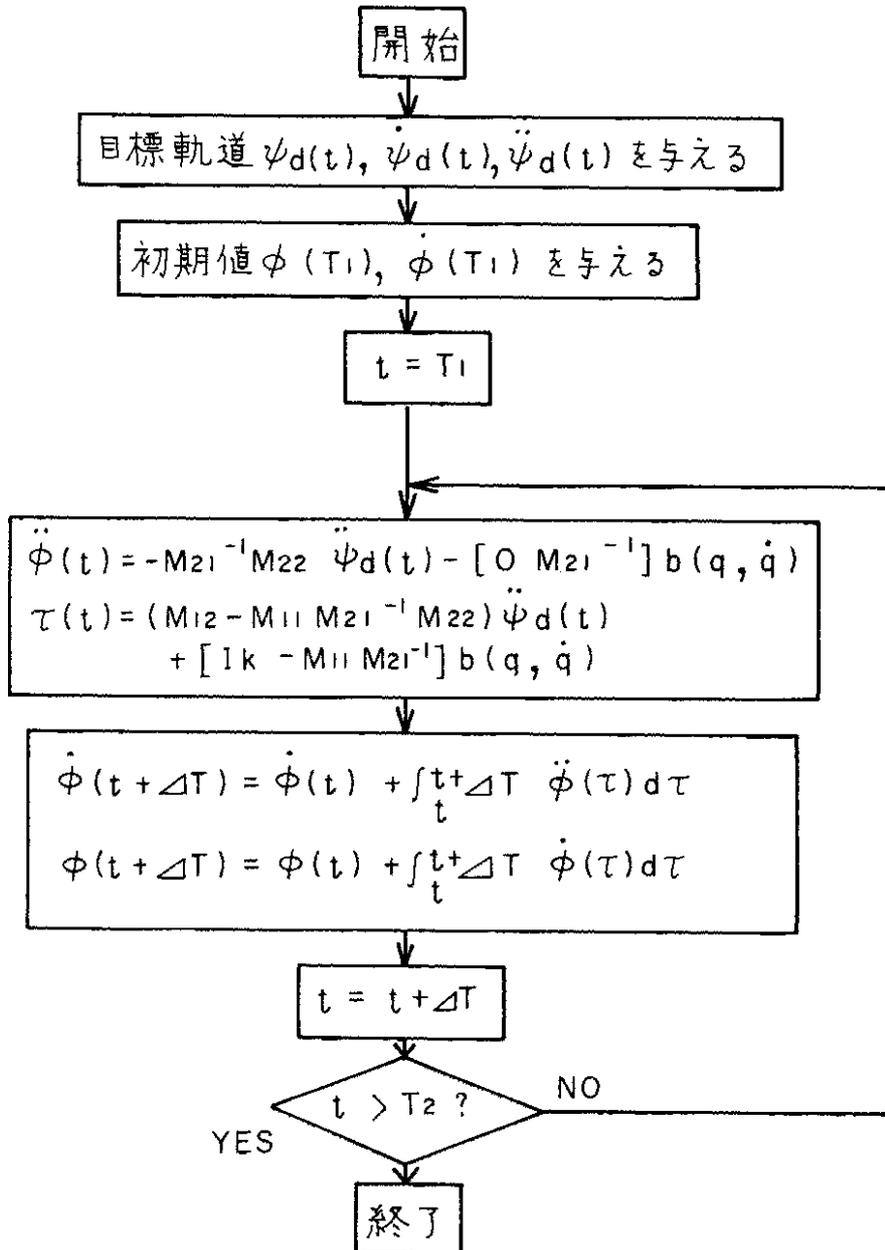
区間 II ψ軸保持ブレーキOFF  
ψ軸位置決め

区間 III ψ軸保持ブレーキON  
φ軸位置決め

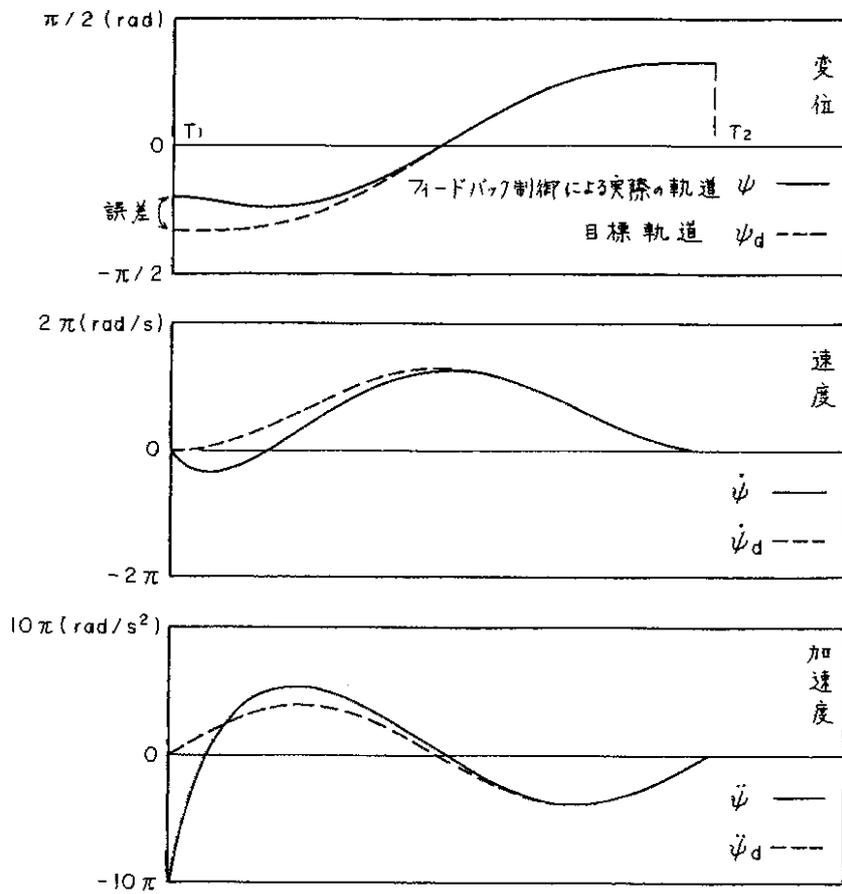
$n = 2, k = 1, m = 1$

【第3図】

(IIにおける軌道とトルクの決定)



【第4図】

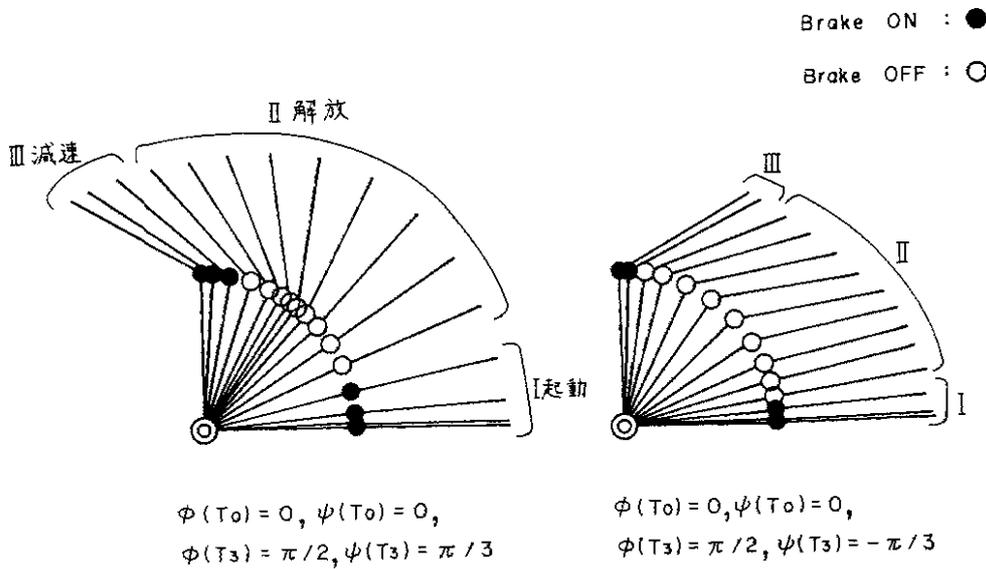


$\langle \psi(T_1) = -\pi/3, \psi(T_2) = \pi/3, \text{error} = 20\% : T_2 - T_1 = 1.03(\text{s}) \rangle$

Feedback Control

フィードバック制御則(7)式による誤差収束性のシミュレーション

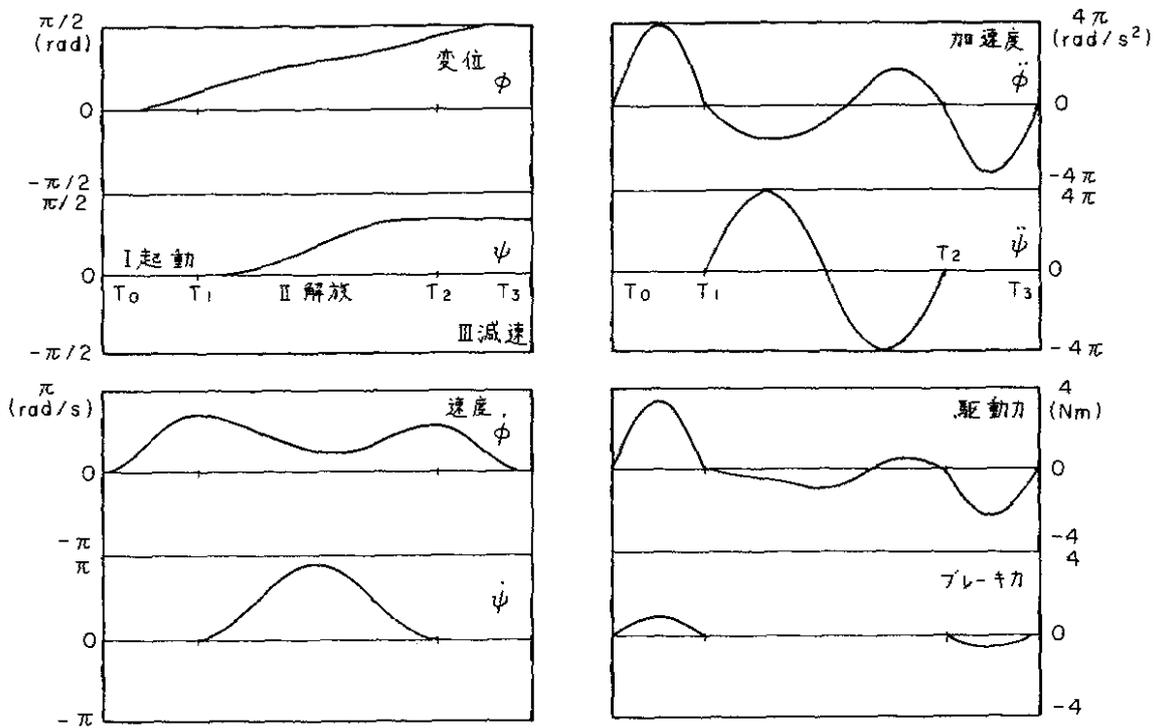
【第5図】



Simulated motion of the manipulator

n = 2, m = 1, k = 1 の時の位置決め例 (シミュレーション)

【第6図】



$\langle \phi(T_0) = 0, \psi(T_0) = 0, \phi(T_3) = \pi/2, \psi(T_3) = \pi/3 : T_1 - T_0 = T_3 - T_2 = 0.28, T_2 - T_1 = 0.73, T_3 - T_0 = 1.29 (s) \rangle$

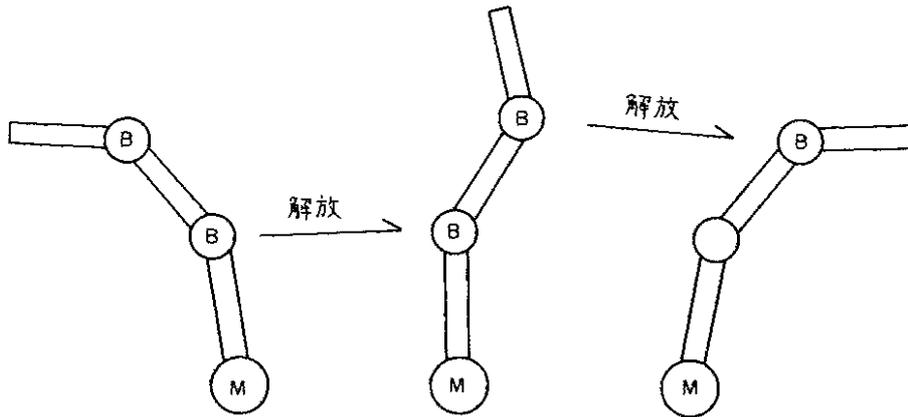
Example of a trajectory

n = 2, k = 1, m = 1 の軌道の例 (シミュレーション)

【第7図】

さらに多くの自由度の制御

アクチュエータ  $r$  個  $\rightarrow$  同時に制御できる自由度:  $r$  自由度  
ブレーキ解放を時分割的に行なう  $\rightarrow$  自由度の制限なし



$n = 3, k = 1, m = 1$  の場合の制御