

非駆動関節を有するマニピュレータの 動力学的干渉による位置制御[†]

荒井 裕彦*・館 暉*

Position Control of a Manipulator with Passive Joints using Coupled Dynamics

Hirohiko ARAI* and Susumu TACHI*

This paper describes a method to control position of a manipulator which is composed of active joints and passive joints. The passive joints have holding brakes instead of actuators. While the brakes are released, the passive joints are indirectly controlled by the motion of the active joints using coupled characteristics of manipulator dynamics. While the brakes are held, the passive joints are fixed and the active joints are controlled. The condition that ensures the controllability of the passive joints is obtained. An algorithm for PTP control of the manipulator is also presented. The feasibility of the method is demonstrated by simulation experiments for a two degrees of freedom manipulator.

Key Words: manipulator, passive joint, coupled dynamics, output controllability

1. 緒 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、リンク機構の各関節に対しその関節を駆動するアクチュエータとその関節の変位を検出するセンサが1個ずつ対応するものである。したが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もち、マニピュレータの機構上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、コストダウンなどを目的として、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いるが、差動機構と対象物の拘束による方法¹⁾、関節間に動力伝達機構を設ける方法²⁾など、

マニピュレータを構成する基本的なリンク機構以外の付加的機構に依存するものが中心である。

マニピュレータの力学系は通常、非線形性・干渉性をもち、それらは各関節上で独立に線形フィードバックループを構成して位置制御を行う場合、外乱として作用する。この外乱の影響を除去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おり、非線形性・干渉性をもたないマニピュレータの機構設計法なども考案されている³⁾。ところが外乱となる力が発生するという事は、他の関節の運動によって、それ自身は力の発生能力をもたない関節の運動を引き起こせることも意味する。

Vukobratović^{4),5)}は、運動および駆動力が部分的に既知であるシステムに対し、動的平衡条件から運動および駆動力のうち未知の部分構成する手法をプログラム式協調制御として提案し、歩行ロボットにおいてアクチュエータをもたない支持点の関節の制御にこの手法を適用した。これはアクチュエータをもたない関節を含むサブシステムと、その他の関節からなるサブシステムとの間の動力学的干渉を利用して、前者の運動を後者で制御するものである。ただし動的平衡条件は2階の微分方程式として表わされるため、運動を完全に規定するには境界条件を与えることが必要である。Vukobratovićは定常歩行における脚切替の反復性から境界条件を決定している。しかしこの境界条件の与え方は歩行ロボットの特殊性に依存したもので、実現できる運動パターンに限られるため、マニピュレータの位置決めに適用することは困難であった。

本報告では、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を有するマニピュレータを動力学的干渉性を利用して位置制御する手法について提案する。本手法はブレーキ ON/OFF のモード切替によって、アクチュエータをもつ能動関節の運動の初期条件を任意に与えることができるため、自由な運動パター

[†] 第27回計測自動制御学会学術講演会(1988・8)およびロボティクス・自動化システムシンポジウム(1988・10)で発表

* 機械技術研究所 つくば市並木 1-2

* Mechanical Engineering Laboratory, Tsukuba
(Received December 5, 1988)

(Revised April 21, 1989)

ンが構成できるという特徴を有している。

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、2自由度モデルについてのシミュレーションにより本手法の実現可能性を示す。

2. 原理

n 自由度のマニピュレータを制御対象とする。そのうち r 自由度の関節は通常のマニピュレータ同様、アクチュエータと変位センサで構成される能動関節とし、残り $n-r$ 自由度は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とする。ただし、 $r \geq n/2$ とする。

保持ブレーキ ON の状態では非駆動関節は動かないため、通常のマニピュレータと同様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動くため、能動関節の運動によって発生する干渉トルク(力)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。

マニピュレータの運動方程式は、

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

と表わされる。ただし、

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

$q \in R^n$ は関節変位ベクトル、 $u \in R^n$ は関節駆動力ベクトル、 $g(q) \in R^n$ 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、 $(\Gamma) \in R^{n \times n}$ は粘性摩擦行列を表わす。

ここで q の要素のうち $n-r$ 個の非駆動関節をすべて含む r 個の関節の変位を選んで $\phi \in R^r$ とおく ($r \geq n/2$ より、 $r \geq n-r$ である)。残りの $n-r$ 個の関節はすべて能動関節であり、その変位を $\psi \in R^{n-r}$ とおく。また、 r 個の能動関節の駆動力を $\tau \in R^r$ とおく。ブレーキ OFF の場合、非駆動関節の駆動力はゼロとおける。 q 、 u の要素の順序を並べかえ、新たに、

$$q = \begin{bmatrix} \phi \\ \psi \end{bmatrix} \begin{matrix} n-r \\ r \end{matrix} \quad u = \begin{bmatrix} \tau \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} r \\ n-r \end{matrix} \quad (2)$$

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

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_{11}(q) & M_{12}(q) \\ M_{21}(q) & M_{22}(q) \end{bmatrix} \begin{matrix} r \\ n-r \end{matrix} \quad (3)$$

(2)、(3)式を(1)式に代入すると、

$$M_{11}\ddot{\phi} + M_{12}\ddot{\psi} + [I_r \ 0]b(q, \dot{q}) - \tau = 0 \quad (4a)$$

$$M_{21}\ddot{\phi} + M_{22}\ddot{\psi} + [0 \ I_{n-r}]b(q, \dot{q}) = 0 \quad (4b)$$

(4a)、(4b)式の q 、 \dot{q} に各関節で計測された関節変位および速度の現在値を代入すると、 $b(q, \dot{q})$ および

M_{11} 、 M_{12} 、 M_{21} 、 M_{22} 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、(4b)式は $\ddot{\phi}$ に関する連立1次方程式とみなせる。係数行列 M_{21} は ϕ と ψ との間の動学的干渉を表わし、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)式は一意に解くことができ、

$$\ddot{\phi} = -M_{21}^{-1}M_{22}\ddot{\psi}_d - [0 \ M_{21}^{-1}]b(q, \dot{q}) \quad (5)$$

(5)式を(4a)式に代入すると、

$$\tau = (M_{12} - M_{11}M_{21}^{-1}M_{22})\ddot{\psi}_d + [I_r - M_{11}M_{21}^{-1}]b(q, \dot{q}) \quad (6)$$

こうして求められた駆動力 τ を能動関節において発生すれば、加速度 $\ddot{\phi}$ 、 $\ddot{\psi}_d$ が得られる^{4),5)}。

すなわちブレーキ OFF の状態では、 r 個の能動関節の駆動力によって、 $n-r$ 個の非駆動関節を含む r 個の関節の加速度 $\ddot{\psi}$ を任意に決定することができる。残り $n-r$ 個の関節の加速度 $\ddot{\phi}$ は $\ddot{\psi}_d$ によって決定され、任意に与えることはできない。ただし、運動を完全に規定するには加速度のほかに変位、速度の初期条件を与える必要がある。非駆動関節の変位の初期値はブレーキを OFF にする瞬間の変位として与えられ、速度の初期値はゼロとなる。また能動関節の変位、速度の初期値はブレーキ ON の状態における制御によって任意に与えることができる。

一方ブレーキ ON の状態では非駆動関節は一定変位で固定され、速度、加速度はゼロである。また能動関節は変位、速度、加速度のすべてについて、非駆動関節に影響を与えることなく自由に制御できる。

以上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し、マニピュレータ全体の位置・姿勢の制御を行う。運動パターンの構成例については第4章で述べる。

3. 可制御性および出力可制御性

本章ではシステム理論の観点から⁶⁾、非駆動関節を有するマニピュレータの提案する手法による制御について理論的裏付けを与える。まず本手法では非駆動関節のブレーキ装着およびブレーキ ON/OFF による制御モード切替を提案している。その根拠として、非駆動関節に重力が作用しない姿勢をとるマニピュレータにおいては、マニピュレータの構造に係わりなくシステム全体は不可制御であり、ブレーキ OFF の状態で全関節を同時には位置決めできないことを示す。

つぎに本手法では、ブレーキ OFF の状態で能動関節と同じ個数の(非駆動関節をすべて含む)関節を制御することを提案し、そのために非駆動関節の個数を能動関節の個数以下に制限している。その根拠としてシ

システム全体が不可制御でも、出力を能動関節と同数の関節の変位および速度に限定すれば、システムが出力可制御になることを示す。また出力可制御となるための慣性行列の条件が、第2章で述べた駆動力を求めるための条件 (M_{21} : 正則) と等価であることを証明し、線形近似と解析的表現の整合性を確認する。

3.1 線形近似モデル

まずマニピュレータの運動方程式を線形状態方程式で近似する。慣性行列 $M(q)$ は一般に正則であるから、(1)式より、

$$\ddot{q} - M(q)^{-1}u + M(q)^{-1}b(q, \dot{q}) = 0 \quad (7)$$

ブレーキ OFF の状態でも平衡を保つために、非駆動関節には重力が作用しないと、また非駆動関節における摩擦は無視できるとする。このとき(7)式を平衡点の近傍で線形近似すれば、システムの状態方程式はつぎのように表わされる。

$$\dot{x} = Ax + B\tau \quad (8)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & I_{n-r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_r \\ N_{11} \frac{\partial c}{\partial \phi} & N_{11} \frac{\partial c}{\partial \dot{\phi}} & N_{11} \frac{\partial c}{\partial \ddot{\phi}} & N_{11} \frac{\partial c}{\partial \ddot{\phi}} \\ N_{21} \frac{\partial c}{\partial \phi} & N_{21} \frac{\partial c}{\partial \dot{\phi}} & N_{21} \frac{\partial c}{\partial \ddot{\phi}} & N_{21} \frac{\partial c}{\partial \ddot{\phi}} \end{bmatrix} \begin{matrix} n-r \\ r \\ n-r \\ r \end{matrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ N_{11} \\ N_{21} \end{bmatrix} \begin{matrix} n-r \\ r \\ n-r \\ r \end{matrix} \quad x = \begin{bmatrix} \delta \phi \\ \delta \dot{\phi} \\ \delta \ddot{\phi} \\ \delta \ddot{\phi} \end{bmatrix} \begin{matrix} n-r \\ r \\ n-r \\ r \end{matrix}$$

ただし、

$$M(q)^{-1} = \begin{bmatrix} N_{11}(q) & N_{12}(q) \\ N_{21}(q) & N_{22}(q) \end{bmatrix} \begin{matrix} n-r \\ r \end{matrix} \quad (9)$$

$$c(q, \dot{q}) = [-I, 0]b(q, \dot{q})$$

システムの状態変数は、関節変位および速度の微小変動 $\delta\phi, \delta\dot{\phi}, \delta\ddot{\phi}, \delta\ddot{\phi}$ 、入力に能動関節の駆動力 τ である (この場合 r の大きさおよび $\phi, \dot{\phi}$ の選び方は任意とし、必ずしも ϕ が $n-r$ 個の非駆動関節をすべて含んでいなくともよいとする)。

3.2 可制御性

まず、(8)式のシステムにおいて、平衡点近傍における局所的な位置決めが実現できるか否かを知るため、システムの可制御性を調べる。ここで、 $2n$ 次正方向行列 T を、

$$T = \begin{bmatrix} 0 & N_{11} & 0 & N_{12} \\ 0 & N_{21} & 0 & N_{22} \\ N_{11} & 0 & N_{12} & 0 \\ N_{21} & 0 & N_{22} & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

とおくと、 T は正則で、

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & M_{11} & M_{12} \\ M_{11} & M_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{21} & M_{22} \\ M_{21} & M_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

T を用いて変数変換 $x = Tz$ を行い、

$$\dot{z} = Az + B\tau \quad (12)$$

とする。ただし、

$$\bar{A} = T^{-1}AT$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial c}{\partial \phi} N_{11} + \frac{\partial c}{\partial \dot{\phi}} N_{21} & \frac{\partial c}{\partial \phi} N_{11} + \frac{\partial c}{\partial \dot{\phi}} N_{21} \\ I_r & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{\partial c}{\partial \phi} N_{12} + \frac{\partial c}{\partial \dot{\phi}} N_{22} & \frac{\partial c}{\partial \phi} N_{12} + \frac{\partial c}{\partial \dot{\phi}} N_{22} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I_{n-r} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{B} = T^{-1}B = \begin{bmatrix} I_r \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$z = T^{-1}x = \begin{bmatrix} M_{11}\delta\phi + M_{12}\delta\dot{\phi} \\ M_{11}\delta\phi + M_{12}\delta\dot{\phi} \\ M_{21}\delta\phi + M_{22}\delta\dot{\phi} \\ M_{21}\delta\phi + M_{22}\delta\dot{\phi} \end{bmatrix}$$

(12)式のシステムに対して、その可制御性を調べるために可制御行列 \bar{V} を求めると、

$$\bar{V} = [\bar{B} \quad \bar{A}\bar{B} \quad \dots \quad \bar{A}^{n-1}\bar{B}]$$

$$= \begin{bmatrix} I_r & \frac{\partial c}{\partial \phi} N_{11} + \frac{\partial c}{\partial \dot{\phi}} N_{21} & * & \dots \\ 0 & I_r & ** & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots \end{bmatrix} \quad (13)$$

$\text{rank } \bar{V} = 2r < 2n$ より、(12)式のシステムは不可制御である。したがってそれと等価である(8)式のシステムも不可制御である。すなわち $r (< n)$ 個の関節の駆動力によって、 n 個の関節の変位および速度を同時に制御する場合、いかなる入力を与えても位置決めを行うことができない領域が平衡点近傍においても存在する。

3.3 出力可制御性

ここで、(12)式のシステムの出力方程式を、

$$y = \bar{C}z \quad (14)$$

$$y = \begin{bmatrix} \delta\phi \\ \delta\dot{\phi} \end{bmatrix} \quad \bar{C} = \begin{bmatrix} 0 & N_{21} & 0 & N_{22} \\ N_{21} & 0 & N_{22} & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} r \\ r \\ n-r \\ n-r \end{matrix}$$

とおき、 r 個の関節の変位および速度を出力とする。システムが出力可制御ならば、出力 $\delta\phi$, $\delta\dot{\phi}$ を任意の値からゼロに収束させる入力 τ の存在が保証される。(12), (14)式のシステムが出力可制御であるための必要十分条件は、行列 $N=[\bar{C}B, \bar{C}\bar{A}B, \bar{C}\bar{A}^2B, \dots, \bar{C}\bar{A}^{n-1}B]$ の階数が $2r$ となることである。ところで、

$$\bar{N} = \bar{C}\bar{V} = \begin{bmatrix} 0 & N_{21} \\ N_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_r & \frac{\partial c}{\partial \dot{\phi}} N_{11} + \frac{\partial c}{\partial \phi} N_{21} & * & \dots \\ 0 & I_r & ** & \dots \end{bmatrix} \quad (15)$$

より、この条件は N_{21} が正則となることと同値である。したがって、 N_{21} が正則ならば、 ϕ , $\dot{\phi}$ を希望の値に設定することが可能であり、平衡点近傍における局所的な位置決めが実現できる。

ここで能動関節の個数 r を $r \geq n-r$ とすれば、 $n-r$ 個の非駆動関節をすべて含むように ϕ の r 個の成分を選ぶことができ、その場合能動関節の駆動力によってすべての非駆動関節の位置決めが行える。一方、出力行列 \bar{C} としていかなる行列を与えても、(15)式より行列 \bar{N} の階数は最大 $2r$ であるから、 $r+1$ 個以上の関節の変位および速度を出力として選んでも出力可制御にはならない。したがって能動関節の個数よりも多くの非駆動関節の位置決めを行うことはできない。

また、この条件は(4b)式が解をもつ条件 (M_{21} : 正則) と一致することが証明できる。すなわち、線形近似を行わずに r 個の関節の駆動力によって $n-r$ 個の非駆動関節を含む r 個の関節の加速度を任意に決定できることと、(12), (14)式のシステムが出力可制御であることは等価である。

【命題】 n 次正方行列

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{matrix} r \\ n-r \end{matrix} \quad (a)$$

が正則のとき、 M の逆行列を、

$$M^{-1} = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{bmatrix} \begin{matrix} n-r \\ r \end{matrix} \quad (b)$$

とおくと、 M_{21} が正則であるための必要十分条件は N_{21} が正則であることである。

(証明) まず十分条件を証明する。 N_{21} は正則であるから(b)の両辺に、

$$Q = \begin{bmatrix} I_{n-r} & -N_{11}N_{21}^{-1} \\ 0 & I_r \end{bmatrix} \begin{matrix} n-r \\ r \end{matrix} \quad (c)$$

を左からかけると、

$$QM^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & N_{12} - N_{11}N_{21}^{-1}N_{22} \\ N_{21} & N_{22} \end{bmatrix} \begin{matrix} n-r \\ r \end{matrix} \quad (d)$$

Q , M はともに正則であるから、 QM^{-1} は正則である。したがって QM^{-1} の第1~第 $n-r$ 行ベクトルを取り出すと、その階数は $n-r$ であり、 $N_{12} - N_{11}N_{21}^{-1}N_{22}$ ($=N_*$) は正則である。(d)の両辺にさらに、

$$P = \begin{bmatrix} I_{n-r} & 0 \\ -N_{22}^{-1}N_*^{-1} & I_r \end{bmatrix} \begin{matrix} n-r \\ r \end{matrix} \quad (e)$$

を左からかけると

$$PQM^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & N_* \\ N_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} n-r \\ r \end{matrix} \quad (f)$$

ここで(f)の両辺に M を右からかけると、

$$PQ = PQM^{-1}M = \begin{bmatrix} N_*M_{21} & N_*M_{22} \\ N_{21}M_{11} & N_{21}M_{12} \end{bmatrix} \quad (g)$$

ところで、(c), (e)より、

$$PQ = \begin{bmatrix} I_{n-r} & -N_{11}N_{21}^{-1} \\ -N_{22}N_*^{-1} & I_r + N_{22}N_*^{-1}N_{11}N_{21}^{-1} \end{bmatrix} \quad (h)$$

であるから、 $M_{21} = N_*^{-1}$ 。したがって M_{21} は正則である。必要条件については、 M と N とを交換すればまったく同様にして証明できる。

(証明終)

4. 制御アルゴリズム

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 の二つの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。ここではその一例として、最も簡単な任意の2点間の PTP 制御を考える。

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位置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位置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 で残りの能動関節の位置決めを行うほうが有利である。

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。ブレーキ OFF の区間で非駆動関節が動きやすいように、リンク機構に運動エネルギーを与え、能動関節のむだな動きを小さく抑える。

したがって2点間を結ぶ軌道をつぎの三つの区間に

わけて制御を行う。

- (i) ϕ 軸保持区間 ($T_0 \leq t < T_1$, ブレーキ ON)
- (ii) ϕ 軸解放区間 ($T_1 \leq t < T_2$, " OFF)
- (iii) ϕ 軸保持区間 ($T_2 \leq t < T_3$, " ON)

(ii)において非駆動関節を含む r 個の関節を目標軌道に沿って動かし、(i)・(iii)において残りの $n-r$ 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駆動力をオフラインでつぎのように計算する (Fig. 1).

- ①非駆動関節をすべて含む r 個の関節に対し変位, 速度, 加速度の目標値 $\psi_d(t), \dot{\psi}_d(t), \ddot{\psi}_d(t)$ ($T_1 \leq t < T_2$) を与える (ただしブレーキ 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 $\dot{\psi}_d(T_1) = \dot{\psi}_d(T_2) = 0$).
- ②残り $n-r$ 個の関節について, 初期値 $\phi(T_1), \dot{\phi}(T_1)$ を与える.
- ③(5), (6)式の計算を行い, $\tau(T_1), \ddot{\phi}(T_1)$ を求める.
- ④ $\ddot{\phi}(t)$ を数値積分することにより $\dot{\phi}(T_1 + \Delta T), \phi(T_1 + \Delta T)$ を求める. ただし ΔT はサンプリング間隔である.
- ⑤③(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駆動力 τ および加速度 \ddot{q} , 速度 \dot{q} , 変位 q を計算する.

オフライン計算によって得られた駆動力 τ はフィードフォワード補償に用いることができる. また, (ii)の区間と(i), (iii)の区間との間の $\phi, \dot{\phi}$ の境界値をオフライン計算の結果を用いて決定する.

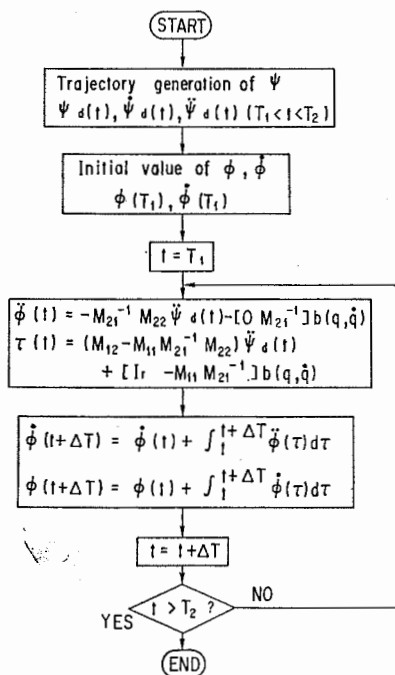


Fig. 1 Control algorithm in brake-off period

リアルタイムで制御を実行する際にはつぎのようなフィードバック制御則を用いる。

$$\ddot{\phi}_d = \ddot{\phi}_d + \mathbf{K}_v(\dot{\phi}_d - \dot{\phi}) + \mathbf{K}_p(\phi_d - \phi) \quad (16)$$

($\mathbf{K}_v, \mathbf{K}_p$ は対角ゲイン行列)

ここで $\phi_d, \dot{\phi}_d, \ddot{\phi}_d$ は①で与えられた変位, 速度, 加速度の目標値, $\phi, \dot{\phi}$ は変位, 速度の実測値である。

(16)式で得られた加速度 $\ddot{\phi}_d$ を(6)式の $\ddot{\phi}_d$ に代入して駆動力 τ を求める. この場合 $\phi, \dot{\phi}$ も数値積分によらず実測値を用いることができる. (4a), (5), (6), (16)式より,

$$(\ddot{\phi}_d - \ddot{\phi}) + \mathbf{K}_v(\dot{\phi}_d - \dot{\phi}) + \mathbf{K}_p(\phi_d - \phi) = 0 \quad (17)$$

という関係が得られ, $\mathbf{K}_v, \mathbf{K}_p$ を適当に選べば $\phi_d - \phi$ が 0 に収束することが保証される。

(i)・(iii)における ϕ の制御は通常のマニピュレータと同一である. (i)では $\phi(T_0)$: 初期位置, $\dot{\phi}(T_0) = 0$ から, ②で与える $\phi(T_1), \dot{\phi}(T_1)$ を目標値とする制御を行う. また(iii)では $\phi(T_2), \dot{\phi}(T_2)$ から, $\phi(T_3)$: 最終位置, $\dot{\phi}(T_3) = 0$ を目標値とする制御を行う。

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

5. シミュレーション

本手法の実現性を確認するために, 第1軸にアクチュエータ, 第2軸にブレーキを有する平面2自由度マニピュレータ (Fig. 2) についてシミュレーションを行い, 必要なトルク, 位置決めに要する時間などを評価した. (5), (6)式は具体的につぎのように表される。

$$\ddot{\phi} = -\frac{M_{22}\ddot{\psi} + D_{211}(\phi)\dot{\phi}^2}{M_{21}(\phi)} \quad (18)$$

$$\tau = \left(M_{12}(\phi) - \frac{M_{11}(\phi)M_{22}}{M_{21}(\phi)} \right) \ddot{\phi} + D_{112}(\phi)\dot{\phi}\dot{\psi} + D_{122}(\phi)\dot{\phi}^2 - \frac{M_{11}(\phi)D_{211}(\phi)\dot{\phi}^2}{M_{21}(\phi)} \quad (19)$$

(ii)における ϕ の軌道は任意に与えられるから, アクチュエータの負担が小さくなるように正弦波状の加減速を行う. アクチュエータのトルクを制限するために $|\ddot{\phi}|$ の最大値 a を決め, $\phi(T_1), \phi(T_2)$ の値を与え

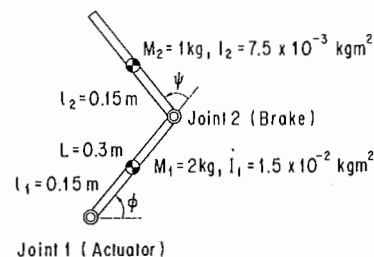


Fig. 2 Two degrees of freedom manipulator

て $T_2 - T_1$ を求め、 ϕ の軌道を決定する。

ϕ の軌道は、4章②～⑤のアルゴリズムで決定される。ところが(18)式の主要な項は ϕ 、 $\dot{\phi}$ に依存せず、 ϕ 、 $\dot{\phi}$ のみの関数となる。そこで、 $\int_{T_1}^{T_2} \dot{\phi}(t) dt$ および $\int_{T_1}^{T_2} \{\phi(t) - \phi(T_1)\} dt$ の値を概算し、後に(i)、(iii)との接続の条件から初期値 $\phi(T_1)$ 、 $\dot{\phi}(T_1)$ を定める。

(i)、(iii)における ϕ の軌道も正弦波状の加減速を行う。 $\phi(T_0)$ 、 $\phi(T_3)$ の値および $|\dot{\phi}|$ の最大値 a を与えて、(ii)との接続の条件から $T = T_1 - T_0 = T_3 - T_2$ および $\phi(T_1)$ 、 $\phi(T_2)$ 、 $\dot{\phi}(T_1)$ 、 $\dot{\phi}(T_2)$ の値を定める。

$a = 4\pi \text{ rad/s}^2$ としたときの位置制御の一例をスティック線図で示す (Fig. 3)。 (18)、(19)式が解をもつ条件は $M_{21} \neq 0$ であるから、このマニピュレータにおいては、 $-2.30 < \psi < 2.30$ の範囲で制御が可能である。そこで、

$$\phi(T_0) = 0, \quad -\frac{2\pi}{3} \leq \psi(T_0) \leq \frac{2\pi}{3},$$

$$0 \leq \phi(T_3) \leq \frac{2\pi}{3}, \quad -\frac{2\pi}{3} \leq \psi(T_3) \leq \frac{2\pi}{3}$$

の範囲で $\phi(T_0)$ 、 $\psi(T_0)$ 、 $\phi(T_3)$ 、 $\psi(T_3)$ の値を $\pi/6$ 刻みで変化させて与え、最長位置決め時間、最大トルクなどを求めた (Table 1)。この範囲内ではどの2点間の位置決めも 2.4 s 以内に完了し、アクチュエータやブレーキに要求される性能も入手可能な製品で十分満たされる。 $M_{21} = 0$ となる動力学上の特異点に近い $\psi = \pm 2\pi/3$ を範囲から除けば、位置決め時間はさらに短く、トルク・速度・加速度はさらに低く抑えられる。

また(18)式においてリンクの質量と長さ依存する係数は消去されるため、マニピュレータの形状が相似形でリンク2の質量分布が一樣である限り、リンクの

質量や長さに関係なく、同じ最大角加速度 a の値に対して、 T_3 、 ϕ 、 $\dot{\phi}$ は同じ最大値を示す。

6. 結 言

本報告では保持ブレーキとセンサのみからなる非駆動関節を有するマニピュレータを、動学的干渉性を利用して位置制御する手法について提案し、基本原理および制御が可能になる条件を示した。2自由度のモデルについてのシミュレーションにより、この手法の実現性を確認した。現在、実機を用いた基礎実験を進めている。

なお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した制御手法であるため、これまでにも多くの研究がなされているマニピュレータのモデリング、パラメータ同定の手法を併用することによりさらに有効なものになると考えられる。

また、制御可能である条件については行列の正則性による定性的な判別にとどまっているが、出力可制御性ゲイン⁶⁾のような定量的な評価基準によって実用上の制御のしやすさを表わすことが望ましい。

本手法を適用してマニピュレータの関節アクチュエータのいくつかを保持ブレーキに置き換えることにより、軽量化、省エネルギー化、コストダウンなどの効果を見込むことができる。本手法の用途としては、それらの効果を生かした簡易組立ロボット、冗長マニピュレータの冗長自由度制御などがあげられる。また宇宙マニピュレータ、宇宙構造物の伸展などの宇宙分野への応用は、重力の影響がないため、より効果的であると考えられる。

最後に日頃ご支援いただいている阿部稔機械技術研究所次長、矢田恒二ロボティクス部長、ならびに本研究を進めるにあたり貴重な助言をいただいた遠隔制御課、感覚機構課諸氏に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 広瀬茂男：連結差動機構，第2回日本ロボット学会学術講演会予稿集，173/176 (1984)
- 2) 北川，浅田：単一のサーボモータによって駆動される形状可変式多自由度ロボットアームの設計，第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集，407/408 (1987)
- 3) 浅田春比古：非干渉一定慣性アームの設計理論，計測自動制御学会論文集，23-2，155/162 (1987)
- 4) M. Vukobratović (加藤，山下訳)：歩行ロボットと人工の足，日刊工業新聞社 (1975)
- 5) M. Vukobratović (加藤監訳)：ロボットの手—力学と運動—，日刊工業新聞社 (1979)
- 6) 岩月，川又，樋口：可制御性と可観測性に着目したロボットアームの性能評価，計測自動制御学会論文集，23-2，149/154 (1987)
- 7) R. P. Paul: Robot Manipulators, MIT Press (1981)
- 8) 古田，川路，美多，原：メカニカルシステム制御，オーム社 (1984)
- 9) 有本 卓：線形システム理論，産業図書 (1974)

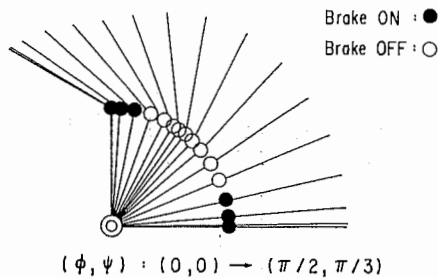


Fig. 3 Simulated motion of the manipulator

Table 1 Simulation result

Positioning time	$T_3 \leq 2.39 \text{ s}$
Actuator torque	$\tau_{\phi} \leq 5.3 \text{ N}\cdot\text{m}$
Actuator velocity	$\dot{\phi} \leq 5.4 \text{ rad/s}$
Actuator acceleration	$\ddot{\phi} \leq 38.7 \text{ rad/s}^2$
Brake torque	$\tau_{\psi} \leq 0.94 \text{ N}\cdot\text{m}$