解 説

マクロ・マイクロシステムによるフレキシブル・マニピュレータの制御

Control of Flexible Manipulators using Macro-Micro Manipulator System

吉 川 恒 夫*¹ 細 田 耕*² *¹京都大学工学部 *²大阪大学工学部

Tsuneo Yoshikawa*¹ and Koh Hosoda*² *¹Faculty of Engineering, Kyoto University *²Faculty of Engineering, Osaka University

1. は じ め に

ロボットマニピュレータの宇宙分野への適用や産業用ロボットの軽量化、高速化、負荷の増大などに伴い、ロボット自体の柔軟性を考慮した制御の必要性が認識されるようになり、フレキシブルアームの研究が進められてきている。当初はアームの振動抑制制御が主な目的であったが、最近では軌道制御や力制御など、より複雑な制御の研究が行われるようになった。しかしながらフレキシブルアームの軌道制御、力制御の問題はまだ十分には解明されておらず、これまでに提案されている方式では複雑な制御則を実行しなければならないものが多い。

一方、実際の柔軟アームでは、JEMの宇宙用アームや高圧電線作業用ロボットなどのように、その先端に手首などの軽量、高剛性の小さなアームがついているような場合が多い。このような場合には、柔軟性を持つため高速高精度な動きには適さないが大きな可動範囲を持つマクロアーム（以下、マクロ部と略記）と、その先端についた可動範囲は小さいが高速で高精度な動きの可能なマイクロアーム（以下、マイクロ部と略記）からなるシステム、すなわちマクロ・マイクロシステムとみなせるものが少なくない。しかもこのような構成のマニピュレータを用いることによって、マクロ部の柔軟性にもかかわらず、手先の位置や力を高速高精度に制御できる可能性が存在する。またこのようなシステムを用いることにより、制御則自体を簡略化できる可能性が存在する。

マクロ部が剛体の場合のマクロ・マイクロシステムについては、既に多くの報告がある[1]~[4]が、マクロ部が柔軟な場合のマクロ・マイクロシステムの制御に関する報告は少なかった。最近このようなケースについての報告が

活発に発表されている[5]~[11]。Chiangら[5]は1リンクフレキシブルアームの先端に1リンク剛体マイクロアームがついたシステムについて、マクロ部には各軸PDまたは弾性変形を考慮したLQG制御を、マイクロ部には先端位置終点周りの制御系を、極配置により求める方法について述べている。そして、この結果求められた制御系について安定性を調べ、マイクロ部の長さがその衝撃中心より短い場合には、系が非最小位相系になり安定性が確保し難いことについて述べている。Ballhausら[6]は2リンクの平面フレキシブルアームの先端に、平行機構を持つマイクロ部を装備しているアームについて、これによってcoordinated slewを行うために制御系について述べている。Bookら[7]はフレキシブルアームの先端にSAM (Small Articulated Arm) を取り付けことを提案しているが、マクロ・マイクロシステムとしての解析や制御に関する考察はされていない。筆者らはマクロ部に柔軟性が存在するようなマクロ・マイクロシステムについて、先端誤差の補償のしやすさの尺度となる可補償性を提案し、システムの冗長性を利用した軌道計画を提案した。また、システムの幾何学的な関係式から導かれる準静的軌道制御[8][9]、運動方程式をもとにマイクロ部の運動による反力を補償するような動的軌道制御を提案した[10]。さらにマクロ・マイクロシステムで力制御を実現するために、位置と力のハイブリッド制御を提案した[11]。

本稿では、このようなマクロ・マイクロシステムを用いたフレキシブルアームの位置制御、力制御に関連するいくつかの結果を紹介する。

2. マクロ・マイクロシステムを用いた終点周りの制御

Ballhausら[6]は、マイクロ部の先端位置を望みの点に収束させるための制御則を提案している(図1)。

与えられたロボット手先の目標位置に対し、マクロ部に対してはそれを剛体とみなしたときの逆運動学問題を解くことによって各軸の目標位置の計算をする。そして、現在の関節位置と目標関節位置を5次の時間多項式で補間する

原稿受付 1993年12月6日

キーワード: Flexible manipulator, Macro-micro system, trajectory tracking control, Hybrid position/force control

*¹ 〒606 京都府京都市左京区吉田本町

*² 〒565 大阪府吹田市山田丘2-1

*¹ Kyoto-shi

*² Suita-shi, Osaka

図1 マクロ・マイクロシステムの制御系[6]

ことによって、マクロ部の関節各軸に対する時間軌道を与える。このようにして与えられた目標関節軌道に対し、PD制御を適用することにより、マクロ部の制御を行っている。

マイクロ部に対しては、与えられた先端の目標軌道がマイクロ部の可動範囲外にある場合には、あるあらかじめ決められた関節位置を目標とし、可動範囲内にある場合には、マイクロ部に関する逆運動学問題を解くことにより目標関節位置を求める。このようにして得られた目標関節位置に対して、PD制御を適用することにより、マイクロ部の制御を行っている。

文献[6]では、このような制御則を2自由度のマクロ部と、パラレルリンクの2自由度マイクロ部からなるシステムに対して適用し、coordinated slewを実現している。しかし、軌道制御に関する考察は行われていない。

3. マクロ・マイクロシステムによる軌道制御

3.1 マクロ・マイクロシステムの可補償性

マクロ部として柔軟なアームを持つマクロ・マイクロシステムの先端に生じる誤差の補償の容易さを評価する指標として、マクロ・マイクロシステムの可補償性が提案されている[8]。本節ではこの可補償性の概念について述べる。

システムが Λ 個の関節を持つマクロ部と λ 個の関節を持つマイクロ部からなるとする。基準座標系 Σ_0 から見た手先位置ベクトルを $\mathbf{p}$ ($\in \mathcal{R}^n$)、各関節の関節変位ベクトルを $\boldsymbol{\theta}$ ($\in \mathcal{R}^{\Lambda+\lambda}$) で記述する(図2)。ただし、 n (≤ 6) は作業変数の次元数であり、 $\mathcal{R}^n$ は n 次元ユークリッド空間を表す。 $\boldsymbol{\theta}$ はマクロ部の関節変位ベクトル $\boldsymbol{\theta}_M$ ($\in \mathcal{R}^\Lambda$) とマイクロ部の関節変位ベクトル $\boldsymbol{\theta}_m$ ($\in \mathcal{R}^\lambda$) に分離でき、

$$\boldsymbol{\theta} = [\boldsymbol{\theta}_M^T \boldsymbol{\theta}_m^T]^T \quad (1)$$

と表せる。ここで $\mathbf{e}$ ($\in \mathcal{R}^g$) は、例えば[14]で提案されているような、マクロ部の弾性を有限次元近似した一般化座標からなるベクトルであるとする。ただし、 g は有限次元近似された弾性変位の自由度である。手先変位 $\mathbf{p}$ は各関節変位 $\boldsymbol{\theta}$ と弾性変位 $\mathbf{e}$ の非線形関数として、

$$\mathbf{p} = \mathbf{f}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{e}) \quad (2)$$

図2 マクロ・マイクロシステム

と表せる。

微小変位の2次以上の項を無視すると、微小変位 $\Delta \mathbf{p}$ は

$$\Delta \mathbf{p} = \mathbf{J}_M \Delta \boldsymbol{\theta}_M + \mathbf{J}_m \Delta \boldsymbol{\theta}_m + \mathbf{J}_e \Delta \mathbf{e} \quad (3)$$

と表せる。ただし、 $\mathbf{J} \in \mathcal{R}^{n \times (\Lambda+\lambda)}$, $\mathbf{J}_e \in \mathcal{R}^{n \times g}$, $\mathbf{J}_M \in \mathcal{R}^{n \times \Lambda}$, $\mathbf{J}_m \in \mathcal{R}^{n \times \lambda}$ はそれぞれ $\mathbf{f}$ の $\boldsymbol{\theta}$, $\mathbf{e}$, $\boldsymbol{\theta}_M$, $\boldsymbol{\theta}_m$ に関するヤコビ行列である。

手先が目標点に一致している状態から弾性変位が $\Delta \mathbf{e}$ だけ微小変化したとき手先位置に微小変化 $\mathbf{J}_e \Delta \mathbf{e}$ が生じる。このとき、マクロ部を動かさずに、マイクロ部の関節変位ベクトルを現在の状態から $\Delta \boldsymbol{\theta}_m$ だけ微小変化させて $\Delta \mathbf{p} = \mathbf{0}$ とすることができるとき、このシステムはマイクロ部によって可補償であると定義する。

式(3)で $\Delta \boldsymbol{\theta}_M = \mathbf{0}$, $\Delta \mathbf{p} = \mathbf{0}$ と置くことにより $\Delta \mathbf{e}$ による誤差を補償する $\Delta \boldsymbol{\theta}_m$ を求める。

$$\mathbf{0} = \mathbf{J}_m \Delta \boldsymbol{\theta}_m + \mathbf{J}_e \Delta \mathbf{e} \quad (4)$$

このような $\Delta \boldsymbol{\theta}_m$ が存在するためには

$$\text{range}(\mathbf{J}_m) \supseteq \text{range}(\mathbf{J}_e) \quad (5)$$

でなければならない。すなわち、可補償であるための必要十分条件が、式(5)で与えられる。

マクロ・マイクロシステムがマイクロ部によって可補償である場合、補償の容易さを評価する評価基準としてシステムの可補償度が以下のように定義される。変数 $\Delta \mathbf{e}$ の各要素の重みを考慮して $\Delta \mathbf{e}$, $\Delta \boldsymbol{\theta}_m$ を次のように正規化する。

$$\Delta \tilde{\mathbf{e}} = \mathbf{T}_e \Delta \mathbf{e} \quad (6)$$

$$\Delta \tilde{\boldsymbol{\theta}}_m = \mathbf{T}_m \Delta \boldsymbol{\theta}_m \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{T}_e$, $\mathbf{T}_m$ は正規化のための対角行列とする。式(4)より、

$$\tilde{\mathbf{J}}_m \Delta \tilde{\boldsymbol{\theta}}_m = -\tilde{\mathbf{J}}_e \Delta \tilde{\mathbf{e}} \quad (8)$$

を得る。ただし、 $\tilde{\mathbf{J}}_m = \mathbf{J}_m \mathbf{T}_m^{-1}$, $\tilde{\mathbf{J}}_e = \mathbf{J}_e \mathbf{T}_e^{-1}$ である。今、発生可能な弾性変位が $\|\Delta \tilde{\mathbf{e}}\| \leq 1$ のようなクラスであると

すると、このような $\Delta \tilde{e}$ に対して $\Delta \tilde{\theta}_m$ のユークリッドノルム $\|\Delta \tilde{\theta}_m\|$ を最小にするような $\Delta \tilde{\theta}_m$ は

$$\Delta \tilde{\theta}_m = -\tilde{J}_m^+ \tilde{J}_e \Delta \tilde{e} \quad (9)$$

で与えられる。ただし A^+ は行列 A の疑似逆行列を表す。

今、 $\|\Delta \tilde{e}\| \leq 1$ を満足する $\Delta \tilde{e}$ に対して $\Delta \tilde{\theta}_m$ のとる領域を考えるとこの領域は楕円体となり、この体積の逆数に比例する量

$$I_c = \frac{1}{|\tilde{J}_m^+ \tilde{J}_e \tilde{J}_e^T \tilde{J}_m^+|^2} \quad (10)$$

によってマクロ・マイクロシステムのマイクロ部による可補償度を定義する。

マイクロ部が作業座標の次元と同じだけ自由度を持つ場合 ($\lambda=n$) の可補償度を考えよう。マイクロ部が特異姿勢にないとするば、 J_m は正規行列となるので、 I_c は

$$I_c = \frac{|J_m|}{|J_e J_e^T|^{1/2}} \quad (11)$$

となる。ただし、 $|*|$ は行列 $*$ の行列式である。 I_c の分子はマイクロ部の可操作性[12]を表しており、分母は弾性変位が生じた場合にその弾性変位が手先位置の変位に対して与える影響の度合いを示している。したがって、可補償度を大きくするためにはマイクロ部を可操作性が向上する方向へ、マクロ部の弾性変位の影響が小さくなる方向へシステムを運動させれば良いことが分かる。

3.2 可補償度を利用した軌道計画

マクロ・マイクロシステムの場合、システム全体の自由度は作業空間に対して冗長度を持つ場合が多い。手先目標軌道が与えられたとき、この冗長性を利用して、弾性変位による手先誤差のマイクロ部による補償がなるべく容易な関節軌道を計画することができる。

軌道計画の段階では重力による静的な弾性変位のみを考えるものとし、関節変位が θ のときの静的な弾性変位が $e=e(\theta)$ で与えられるとすると、式(2)より、

$$p=f(\theta, e(\theta)) \quad (12)$$

となる。これを時間微分して

$$\dot{p}=J_R \dot{\theta} \quad (13)$$

を得る。ただし、 J_R は $f(\theta, e(\theta))$ の θ に関するヤコビ行列である。式(13)より、冗長性を利用してマクロ・マイクロシステムの可補償度 I_c をなるべく大きく保つような軌道を計画する場合、目標関節速度 $\dot{\theta}_d$ は以下のように与えられる[12]。

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_d &= J_R^+ \dot{p}_d + (E_{i \times i} - J_R^+ J_R) \xi k_p \\ \xi &= \partial I_c / \partial \theta \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、 E_i は $i \times i$ の単位行列、 k_p は適当な正の定数であり、 $\dot{\theta}_d$ が過大とならず、かつ I_c をなるべく速やかに大きくするという条件を満たすように選ぶ。

3.3 準静的軌道制御

本節ではマクロ部についてはその複雑なダイナミクスを

考慮せず、手先に生じる弾性変位を幾何学的な関係式を用いてマイクロ部の目標値を修正することで補償するような、マクロ・マイクロシステムを用いた準静的制御系について述べる。

マクロ部に関しては各軸ごとにPD制御を行うこととし、制御入力 τ_M を、

$$\tau_M = K_{PM}(\theta_{Md} - \theta_M) + K_{VM}(\dot{\theta}_{Md} - \dot{\theta}_M) \quad (15)$$

のように与える。ここで、 K_{PM} 、 K_{VM} はそれぞれマクロの位置と速度のフィードバックゲイン行列である。

マイクロ部には目標値 θ_{md} に手先誤差を修正するような修正量 $\Delta \theta_{md}$ を加え、修正された目標値に対して、各軸PD制御を適用する。

$$\tau_m = K_{pm}(\theta_{md} + \Delta \theta_{md} - \theta_m) + K_{vm}(\dot{\theta}_{md} + \dot{\Delta \theta}_{md} - \dot{\theta}_m) \quad (16)$$

ここで、 K_{pm} 、 K_{vm} はそれぞれマイクロ部の位置と速度のフィードバックゲイン行列である。修正量 $\Delta \theta_{md}$ はマクロ部の弾性変形、及びマクロ部関節の関節誤差による手先誤差を補償するものであり、式(3)において $\Delta p=0$ とおくことにより以下のように与えられる。

$$\Delta \theta_{md} = -J_m^+ (J_M \Delta \theta_M + J_e \Delta e) \quad (17)$$

右辺の( )内の各要素はマクロ部の関節変位と、弾性変形が測定可能であるときこれらからの算出可能な項である。このようにして構成した制御系のブロック図を図3(a)に示す。また、手先の絶対位置が視覚センサなどで計測できるとき、式(16)は以下のような制御系に置き換えられる(図3(b))。

$$\tau_m = -K_{pm} J_m^+ \Delta p + K_{vm}(\dot{\theta}_{md} - \dot{\theta}_m) \quad (18)$$

実験により、この準静的軌道制御系によって軌道制御が実現されることが確認されている[9]。また、この制御系は前章の Ballhaus らの方法と類似のものとなっているが、Ballhaus らのものは軌道制御を意図していないことに注意されたい。

(a) 準静的軌道制御系 (関節変位センサ、弾性変位センサより手先位置を検出する場合)

(b) 準静的軌道制御系 (手先位置を検出するセンサが装備されている場合)

図3 マクロ・マイクロシステムによる準静的軌道制御系

準静的軌道制御系では、システムの幾何学的関係から手先誤差補償するようなマイクロ部の変位量を計算しているため、マイクロ部の運動が高速になった場合、その動的な干渉による影響を受けてしまう可能性がある。そこで次節では、このような動的な項を考慮したマクロ・マイクロシステムの動的軌道制御について述べる。

3.4 動的軌道制御

式(2)を時間微分して手先速度と関節速度の関係式

$$\dot{p} = J_M \dot{\theta}_M + J_m \dot{\theta}_m + J_e \dot{e} \quad (19)$$

を得る。\$J_M, J_m, J_e\$ をまとめて

$$J = [J_M : J_m : J_e] \quad (20)$$

と記述すると、この \$J\$ (\$\in \mathcal{R}^{n \times (\lambda + \lambda + \theta)}\$) を用いて式(19)は

$$\dot{p} = J [\dot{\theta}_M^T \ \dot{\theta}_m^T \ \dot{e}^T]^T \quad (21)$$

と表すことができる。これをさらに時間微分として加速度の関係

$$\begin{aligned} \ddot{p} &= J [\ddot{\theta}_M^T \ \ddot{\theta}_m^T \ \ddot{e}^T]^T + \dot{J} [\dot{\theta}_M^T \ \dot{\theta}_m^T \ \dot{e}^T]^T \\ &\triangleq J [\ddot{\theta}_M^T \ \ddot{\theta}_m^T \ \ddot{e}^T]^T + a \end{aligned} \quad (22)$$

を得る。

マクロ・マイクロシステムの運動方程式は柔軟リンク部分の運動を有限次元近似すると一般に以下になる。

$$M \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_M \\ \ddot{\theta}_m \\ \ddot{e} \end{bmatrix} + h = \begin{bmatrix} E_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tau_M + \begin{bmatrix} 0 \\ E_\lambda \\ 0 \end{bmatrix} \tau_m \quad (23)$$

ここで \$M(\theta_M, \theta_m, e)\$ は慣性行列、\$h(\theta_M, \theta_m, e, \dot{\theta}_M, \dot{\theta}_m, \dot{e})\$ は遠心力、コリオリ力、重力などの非線形項および柔軟性による弾性力の項である。慣性行列 \$M\$ が逆行列を持つとき、式(23)は

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_M \\ \ddot{\theta}_m \\ \ddot{e} \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} E_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tau_M + M^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ E_\lambda \\ 0 \end{bmatrix} \tau_m - M^{-1} h \quad (24)$$

と変形することができる。式(24)の両辺に左から \$J\$ をかけ、式(22)を用いると、手先加速度と駆動入力との関係式

$$\ddot{p} = N_M \tau_M + N_m \tau_m - J M^{-1} h + a \quad (25)$$

を得る。ただし、

$$\begin{aligned} N_M &= J M^{-1} [E_A \ 0 \ 0]^T \\ N_m &= J M^{-1} [0 \ E_\lambda \ 0]^T \end{aligned}$$

である。

動的軌道制御の場合も準静的軌道制御の場合と同様に考え、マクロ部に対する制御則は式(15)を用いる。

これに対しマクロ部には、式(25)をもとに、手先誤差を補償するような制御則を適用する。マクロ部が手先座標の次元と同じだけ自由度を持つ場合 (\$\lambda = n\$) には、新たな入力 \$u_m\$ として、マイクロ部に対する駆動入力 \$\tau_m\$ を

$$\tau_m = N_m^{-1} (u_m - N_M \tau_M + J M^{-1} h - a) \quad (26)$$

とすることにより、閉ループ系を

$$\ddot{p} = u_m \quad (27)$$

という線形非干渉系にすることができる。マイクロアーム

図4 マクロ・マイクロシステムによる動的軌道制御

ムは剛体であると考えられるので、ここでの \$N_m\$ は通常の剛体ロボットの手先座標系に関する慣性逆行列に弾性による微小項を付加したものであり、特異姿勢を除いては一般に逆行列を持つ。

モデル化誤差や外乱などに対処するために \$u_m\$ を以下のように決め、手先座標でのサーボ系を構成する。

$$u_m = \ddot{p}_d + K'_{vm}(\dot{p}_d - \dot{p}) + K'_{pm}(p_d - p) \quad (28)$$

ここで \$K'_{pm}, K'_{vm}\$ はそれぞれ手先位置、速度に関するフィードバックゲインである。式(15) (26) (28) を用いてマクロ・マイクロシステムの動的軌道制御系を構成することができる(図4)。

この動的軌道制御系を用いれば理論的には完全に目標軌道を実現できる。実験による検証では、準静的軌道制御系よりも小さい誤差で軌道制御が実現されている[10]。

4. マクロ・マイクロシステムによる力制御

フレキシブルアームのみ、すなわちマイクロ部のみで力制御が実現するには、複雑な制御を適用しなければならないが、マクロ・マイクロ構成のシステムであれば、容易に力制御を実現できると考えられる。本章では、このような考え方のもとに、マクロ・マイクロシステムを用いたフレキシブルアームの位置と力のハイブリッド制御のための一つの軌道計画法と制御アルゴリズムについて紹介する[11]。

マクロ・マイクロシステムの位置と力のハイブリッド制御のための軌道計画は以下のような手順で行われる(図5)。

step 1 弾性変位が生じていない状態 (\$e=0\$) で、拘束面上の目標位置 \$p_d\$ を実現するような目標関節角 \$\theta_{d(1)}\$ を求める。ここで、上付添字 \$c\$ はそのベクトルの参照座標系が拘束座標系であることを示す。

step 2 関節角が \$\theta_{d(1)}\$ に追従しているものとして、手先に目標力 \$f_d\$ が加わったときに生じる弾性変位 \$\Delta e_{(2)}\$ を求める。

step 3 弾性変位 \$\Delta e_{(2)}\$ によって生じる手先誤差を補償するように \$\theta_{d(1)}\$ を修正し \$\theta_d\$ を得る。

こうして求められた目標関節角を利用し、マクロ・マイクロシステムを用いた準静的ハイブリッド制御系を適用する。この制御系は、マクロ部には、その複雑なダイナミクスを考慮しない大まかな制御を適用し、生じる手先の位置誤差、力誤差を、マイクロ部に Raibert[13]らの方法を修正して適用することによって取り除くものである。

図5 力制御のための軌道計画

マクロ部には軌道計画によって求めた目標関節軌道 θ_{Md} に沿って、各軸 PD 制御を適用する。マクロ部に対する制御入力 τ_M は位置制御の場合と同様、式(15)を用いる。

次にマイクロ部に対する制御則を導く。位置方向及び力方向の誤差 $\Delta^c p$, $\Delta^c f$ を

$$\Delta^c p = S({}^c p_d - {}^c p) \quad (29)$$

$$\Delta^c f = (E_n - S)({}^c f_d - {}^c f) \quad (30)$$

と表す。ここで S はコンプライアンス選択行列と呼ばれるもので、

$$S = \text{diag}[s_1, s_2, \dots, s_n] \quad (31)$$

であり、 s_j ($j=1, 2, \dots, n$) の値は位置制御方向については 1、力制御方向については 0 とする。

手先誤差 $\Delta^c p$ が生じたとき、これを補償するためのマクロ部の変位及び速度 $\Delta\theta_m$, $\Delta\dot{\theta}_m$ は

$$\Delta\theta_m \cong J_m^{-1} \Delta^c p \quad (32)$$

$$\Delta\dot{\theta}_m = J_m^{-1} \Delta^c \dot{p} \quad (33)$$

で与えられる。手先に生じる力誤差 $\Delta^c f$ とつり合うマイクロ部の駆動力 $\Delta\tau_m$ は

$$\Delta\tau_m = J_m^T \Delta^c f \quad (34)$$

で与えられる。

以上より、マイクロ部の制御則を位置に関しては PD 動作によって、力に関しては I 動作によって行うことにすると、これらの位置誤差及び力誤差を補償するための関節駆動力 τ_{mp} 及び τ_{mf} は

$$\tau_{mp} = K_{mpp} \Delta\theta_m + K_{mpd} \Delta\dot{\theta}_m \quad (35)$$

$$\tau_{mf} = K_{mfi} \int_0^t \Delta\tau_m(t') dt' \quad (36)$$

となる。ここで、 K_{mpp} , K_{mpd} , K_{mfi} はそれぞれマイクロ部の位置フィードバックの比例及び微分ゲイン、力フィードバックの積分ゲインである。これらを用いて

$$\tau_m = \tau_{mp} + \tau_{mf} \quad (37)$$

図6 位置と力のハイブリッド制御系

を最終的な入力トルクとしてマイクロ部の関節に加える。以上のようにして得られた制御系を図6に示す。このようにして得られた軌道計画、及び位置と力のハイブリッド制御によって、良好な実験結果が得られることが確認されている[11]。

この制御系では、システムの動特性を考慮していないために、高速な動作を実現する際には制御誤差が大きくなる可能性がある。現在、動特性を考慮した制御系を検討中である。

5. おわりに

フレキシブルアームを単体で制御する際の、種々の困難さを、マクロ・マイクロシステムを用いることによって回避できる。マクロ・マイクロシステムを用いる場合の安定性については、Chiang ら[5]が1自由度マクロ・1自由度マイクロシステムについて述べているのみであり、今後の検討が待たれる。

参考文献

- [1] A. Sharon, N. Hogan and E.D. Hardt: "High bandwidth force regulation and inertia reduction using a macro/micro manipulator system," In Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 126-132, 1988.
- [2] O. Khatib: "Reduced effective inertia in macro-/minimanipulator systems," In Robotics Research The Fifth International Symposium, pp. 279-284, MIT Press, 1990.
- [3] 川瀬, 石川, 澤田, 高田: "手首と腕の協調制御によるマニピュレータのコンプライアンス制御", 日本ロボット学会誌, vol. s, no. 4, pp. 401-408, 1991.
- [4] 永井, 吉川: "冗長マクロマイクロマニピュレータのインピーダンス制御", システム制御情報学会講演会予稿集, pp. 421-422, 1993.
- [5] W. W. Chiang, R. Kraft and R. H. Cannon Jr.: "Design and experimental demonstration of rapid, precise end-point control of a Wrist carried by a very flexible manipulator," Int. J. of Robotics Research, vol. 10, no. 1, pp. 30-40, 1991.
- [6] W. L. Ballhaus and S. M. Rock: "End-point control of a two-link flexible robotic manipulator with a mini-manipulator: initial experiments," In Proc. American Control Conference, pp. 2510-2514, 1992.
- [7] J. Y. Lew and W. J. Book: "Hybrid control of flexible manipulators with multiple contact," In Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 242-247, 1993.
- [8] 吉川, 細田, 土井: "マクロ-マイクロシステムによるフレキシブルアームの準静的軌道制御", 日本ロボット学会誌, vol. 11, no. 1, pp. 140-

- 147, 1993.
- [9] T. Yoshikawa, K. Hosoda, T. Doi and H. Murakami: "Quasi-static trajectory tracking control of flexible manipulator by macro-micro system," In Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3-210-215, 1993.
- [10] 吉川, 細田, 土井, 村上: "マクロ-マイクロシステムによるフレキシブルアームの動的軌道制御", 日本ロボット学会誌, vol. 12, no. 2, 1994.(掲載予定).
- [11] 吉川, 細田, 松本, 村上: "マクロ-マイクロシステムによるフレキシブルアームの位置と力の準静的ハイブリッド制御", 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 661-664, 1993.
- [12] 吉川: "ロボット制御基礎論", コロナ社, 1988.
- [13] R. H. Raibert and J. J. Craig: "Hybrid position/force control of manipulators," Trans. of ASME, J. of DSC, vol. 104, no. 2, pp. 126-133, 1981.
- [14] 吉川, 村上, 細田: "2本のフレキシブルリンクを有する3自由度マニピュレータのモデリングと制御", 日本ロボット学会誌, vol. 9, no. 1, pp. 1-10, 1991.

吉川恒夫 (Tsuneo Yoshikawa)

1941年12月19日生。1969年京都大学大学院博士課程修了。同年同大学工学部助手。1970年同大学助教授。1986年同大学教授(1991年より機械工学教室勤務) ロボット工学及び制御工学の研究に従事。工学博士。システム制御情報学会, 計測自動制御学会, 日本機械学会, (日本ロボット学会正会員)

IEEEなどの会員。

細田 耕 (Koh Hosoda)

1965年11月9日生。1988年京都大学工学部精密工学科卒業。1993年同大学工学部工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了。同年大阪大学工学部電子制御機械工学科助手となり。現在に至る。ロボット工学の研究に従事。博士(工学)。計測自動制御学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)