

# 柔軟マクロ／剛体マイクロマニピュレータの 振動抑制を考慮した準静的軌道制御

吉川 恒夫\* 金岡 克弥\*

## Quasi-Static Trajectory Tracking Control Considering Vibration Suppression of Flexible-Macro/Rigid-micro Manipulators

Tsuneo Yoshikawa\* and Katsuya Kanaoka\*

We propose a quasi-static trajectory tracking control method for the general flexible manipulators which have a flexible-macro/rigid-micro structure. We derive the quasi-static control schemes without considering the dynamics of the manipulator. The purposes of these schemes are position error compensation and vibration suppression for both macro and micro part. We consider the combination of the error compensation control and the vibration suppression control for the macro part and the error compensation control for the micro part and consider the combination of the error compensation control and the vibration suppression control for the macro part and the active mass damper for the micro part. The former combination is called the *trajectory tracking mode* and the latter is called the *vibration suppression mode*. These two proposed modes are easy to implement. It is shown by experiments that the *trajectory tracking mode* realizes the high performance of the trajectory tracking, the *vibration suppression mode* realizes the high performance of the vibration suppressing, and the switching of these two control modes is effective.

**Key Words:** Flexible manipulator, Quasi-static trajectory tracking control, Flexible-macro/rigid-micro system, Error compensation, Vibration suppression

### 1. はじめに

近年、産業用ロボットや宇宙用マニピュレータにおける長腕化や軽量化に伴い、アーム剛性の低下によるマニピュレータの柔軟性が制御上の問題となっている。このようなマニピュレータはフレキシブルマニピュレータと呼ばれ、軽量・高速、柔軟性に起因する機構の安全性といった利点から、その制御上の問題を克服すべく多くの研究が行われてきた。

特に、フレキシブルマニピュレータの軌道制御については、様々なアプローチで研究が進められている。主な研究としては、(a) 歪みゲージなどのセンサ出力フィードバックによる振動抑制制御 [1] (b) 運動学的な関係から準静的に手先誤差を補償する方法 [2] [3] (c) 動力学モデルに基づいて制御を行う方法 [4] ~ [8] などが挙げられる。

(a) の、センサ出力フィードバックによる振動抑制制御では、非常に簡単な制御則に基づいて振動制御を行うことができるが、リンクの弾性変位によって生じる手先の位置誤差補償については考慮されない。

(b) の、手先に生じた位置誤差を準静的に補償するような

各関節の補償量を運動学的な関係から計算し、制御の目標値を修正する方法では、計算量の少ない実装に適した制御則が得られるが、速度が大きい場合には、補償量に大きな誤差を生じる可能性がある。また、後述のマクロマイクロシステムのような、マニピュレータの持つ機構的な特性は利用されていない。

(c) の、モデル化した動特性から逆運動学・逆動力学に基づいて制御を行う方法では、正確なモデルが得られればフィードフォワードによる高速・高精度な制御性能が期待できる。反面、正確な動特性モデルを同定する煩雑さや、実時間で逆動力学を解くための計算量の増大は避けがたい。また、動特性が変化した場合の対応も難しい。

これらの研究はすべて、弾性リンクを駆動するアクチュエータをそのまま振動制御にも用いるという前提のもとになされている。一方、ハードウェア構成をも含めたアプローチとして、柔軟マクロ／剛体マイクロマニピュレータシステム（以下 M-m システム）を構成することが考えられる。M-m システムの構造的特性を利用して、多自由度フレキシブルマニピュレータの手先軌道制御を行った研究として、文献 [9] ~ [11] などが挙げられる。文献 [9] では、マクロ部はアクチュエータを持たない柔軟ベースであり、剛体マイクロ部を用いて手先位置誤差補償とマクロ部の制振制御を実現しているが、実現可能な手先軌道がマイクロ部の動力学によって限定される。文献 [10] [11] では、マイクロ

原稿受付 1999年12月29日

\*京都大学大学院工学研究科

\*Graduate School of Engineering, Kyoto University

部について準静的、あるいは動的に手先位置誤差の補償制御を行い、M-mシステムの可補償性について考察しているが、弾性変位による位置誤差の補償はすべてマイクロ部に依存しており、マクロ部は位置誤差の補償および制振に寄与していない。

本論文では、M-mシステムを構成するフレキシブルマニピュレータにおいて、柔軟マクロ部・剛体マイクロ部それぞれが手先位置誤差補償と制振の両方に寄与する軌道制御則を提案する。システムの動特性は一切未知であることを前提として、マクロ部としてのフレキシブルマニピュレータについて、運動学に基づく準静的補償制御則、準静的制振制御則を導出し、さらに剛体マイクロ部の構造的特性を利用した準静的補償制御則、準静的アクティブマスダンパ方式制御則を導出する。

軌道制御にあたっては、位置誤差補償と制振それぞれの制御則による操作量を重ね合わせる方法として (a) 制御量を周波数領域において分割する (b) 制御量を位置誤差補償方向と制振方向に分割する (c) 操作量を切り換える、あるいは重み付けして重畳する、などが考えられる。本論文においては、マクロ部、マイクロ部の構造的特性と制御目的を考慮して、マクロ部では (a)、マイクロ部では (c) の方法を用いてそれぞれの制御則の欠点を補い合えることを示し、4自由度平面フレキシブルマニピュレータを用いて実験的に効果を確認する。

## 2. 柔軟マクロ/剛体マイクロシステム

### 2.1 システムの構成

本論文で取り扱う M-m システムは、Fig. 1 に示すようなものである。このような構造のマニピュレータとしては、国際宇宙ステーション日本モジュールの JEMRMS などが挙げられる。M-m システムでは、マクロ部は大出力のアクチュエータと長いリンクを持ち可動範囲は大きい、リンクには柔軟性が存在し、高速・高精度な動きは困難である。マイクロ部は、可動範囲は狭いが小型であるため、高速で高精度な動きが可能であり、剛体マニピュレータとみなして扱うことが可能である。以下ではこの構造的特性を制御に利用することを考えていく。

### 2.2 運動学

システムが  $\Lambda$  個の関節および柔軟リンクを持つマクロ部と、 $\lambda$  個の関節および剛体リンクを持つマイクロ部からなるとする。以下、一般化座標以外のベクトルは、基準座標系  $\Sigma_0$  表現とする。 $\Sigma_0$  から見た手先位置ベクトルを  $p \in \mathbb{R}^n$ 、各関節の関節

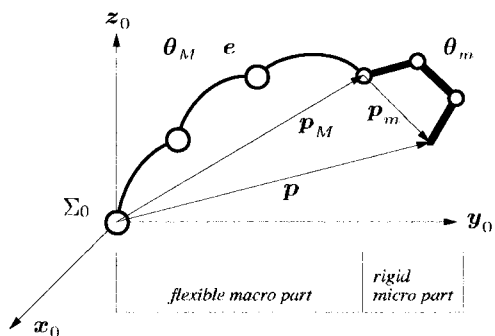


Fig. 1 Flexible-macro/rigid-micro system

変位ベクトルを  $\theta \in \mathbb{R}^{\Lambda+\lambda}$  で記述する。ただし、 $n (\leq 6)$  は作業変数の次元数であり、 $\mathbb{R}^n$  は  $n$  次元ユークリッド空間を表す。手先位置ベクトル  $p$  は、マクロ部の先端位置  $p_M \in \mathbb{R}^n$  と、マクロ部先端から見たマイクロ部手先位置  $p_m \in \mathbb{R}^n$  に分離でき、

$$p = p_M + p_m \quad (1)$$

と表せる。また、関節変位ベクトル  $\theta$  は、マクロ部の関節変位ベクトル  $\theta_M \in \mathbb{R}^\Lambda$  とマイクロ部の関節変位ベクトル  $\theta_m \in \mathbb{R}^\lambda$  に分離でき、

$$\theta = [\theta_M^T, \theta_m^T]^T \quad (2)$$

と表せる。 $\theta, \theta_M, \theta_m$  は関節変位の一般化座標からなるベクトルである。マクロ部柔軟リンクの弾性変位ベクトルを  $e \in \mathbb{R}^g$  とする。これは、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り、 $g$  は有限次元近似された弾性変位の自由度である。

手先位置  $p$ 、およびマクロ部先端位置  $p_M$  は、各関節変位  $\theta$  と弾性変位  $e$  の非線形関数

$$p = p(\theta, e) \quad (3)$$

$$p_M = p_M(\theta_M, e) \quad (4)$$

として運動学的関係が表現できる。微小変位の二次以上の項を無視すると、これらの微小変位  $\Delta p, \Delta p_M$  は、

$$\Delta p = J_M \Delta \theta_M + J_e \Delta e + J_m \Delta \theta_m \quad (5)$$

$$\Delta p_M = J_M^M \Delta \theta_M + J_e^M \Delta e \quad (6)$$

と表せる。ただし、右辺の行列  $J^*$  はヤコビ行列であり、それぞれ  $J_M = \partial p / \partial \theta_M \in \mathbb{R}^{n \times \Lambda}$ 、 $J_m = \partial p / \partial \theta_m \in \mathbb{R}^{n \times \lambda}$ 、 $J_e = \partial p / \partial e \in \mathbb{R}^{n \times g}$ 、 $J_M^M = \partial p_M / \partial \theta_M \in \mathbb{R}^{n \times \Lambda}$ 、 $J_e^M = \partial p_M / \partial e \in \mathbb{R}^{n \times g}$  で与えられる。

## 3. マクロ部制御

本章では、Fig. 1 に示す M-m システムの運動学に基づき、マクロ部において、マクロ部先端の位置誤差補償を準静的に実現する制御則、およびマクロ部柔軟リンクの振動を準静的に抑制する制御則を導出し、それらの関係について述べる。

### 3.1 マクロ部準静的補償制御

マクロ部では、リンクに存在する柔軟性のために先端の位置誤差が生じる。マクロ部柔軟リンクの微小弾性変位  $\Delta e$  によって生じるマクロ部先端位置誤差  $\Delta p_M$  をゼロに補償するための準静的な補償量  $\Delta \theta_M$  は、アームが可補償 [12] であるとき、式 (6) において  $\Delta p_M = 0$  とおくことにより、

$$\Delta \theta_M = -(J_M^M)^+ J_e^M \Delta e \quad (7)$$

と計算される。ここで、 $(J_M^M)^+$  は  $J_M^M$  の疑似逆行列を表す。

式 (7) の補償量  $\Delta \theta_M$  を目標値に加えることによって位置補償を行うのであるが、この補償量を用いて P 制御や D 制御を行うと、補償駆動力がリンクを励振する方向に働き、系が不安定となる。姜ら [2] は、 $\Delta \theta_M$  に一次遅れのローパスフィルタをかけて用いることでこの問題を回避していた。ここでは、補

償量による目標値の修正を、PD には加えず I 制御の項のみに加えるような制御則を提案する。すなわち、

$$\begin{aligned}\tau_M^{com} &= \mathbf{K}_{pM}(\boldsymbol{\theta}_{Md} - \boldsymbol{\theta}_M) \\ &+ \mathbf{K}_{iM} \int_0^t (\boldsymbol{\theta}_{Md} + \Delta\boldsymbol{\theta}_M - \boldsymbol{\theta}_M) dt \\ &+ \mathbf{K}_{dM}(\dot{\boldsymbol{\theta}}_{Md} - \dot{\boldsymbol{\theta}}_M)\end{aligned}\quad (8)$$

ただし、 $\mathbf{K}_{pM} = \text{diag}[K_{pMi}] \in \mathbb{R}^{\Lambda \times \Lambda}$ 、 $\mathbf{K}_{iM} = \text{diag}[K_{iMi}] \in \mathbb{R}^{\Lambda \times \Lambda}$ 、 $\mathbf{K}_{dM} = \text{diag}[K_{dMi}] \in \mathbb{R}^{\Lambda \times \Lambda}$  はそれぞれマクロ部各軸 PID ゲインを表す対角行列、 $\boldsymbol{\theta}_{Md} \in \mathbb{R}^{\Lambda}$  はマクロ部各軸関節目標軌道、 $\tau_M^{com} \in \mathbb{R}^{\Lambda}$  はマクロ部各軸関節駆動力である。

補償量を I 制御にのみ加えるという考え方は、比例・微分先行型 PID 制御 (I-PD 制御) の一種とみなすこともできる。

$$\begin{aligned}\tau_M^{com} &= \mathbf{K}_{pM}(\boldsymbol{\theta}_{Md} + \Delta\boldsymbol{\theta}_M^{lpf} - \boldsymbol{\theta}_M) \\ &+ \mathbf{K}_{iM} \int_0^t (\boldsymbol{\theta}_{Md} + \Delta\boldsymbol{\theta}_M^{lpf} - \boldsymbol{\theta}_M) dt \\ &+ \mathbf{K}_{dM}(\dot{\boldsymbol{\theta}}_{Md} + \Delta\dot{\boldsymbol{\theta}}_M^{lpf} - \dot{\boldsymbol{\theta}}_M)\end{aligned}\quad (9)$$

ここで、 $\Delta\boldsymbol{\theta}_M^{lpf}$  は、補償量  $\Delta\boldsymbol{\theta}_M$  を以下のようなローパスフィルタに加えたときの出力

$$(\Delta\boldsymbol{\theta}_M^{lpf})_i = \frac{K_{iMi}}{K_{iMi} + K_{pMi}s + K_{dMi}s^2} (\Delta\boldsymbol{\theta}_M)_i \quad (10)$$

である。ただし、 $(\Delta\boldsymbol{\theta}_M^{lpf})_i$  は、ベクトル  $\Delta\boldsymbol{\theta}_M^{lpf}$  の第  $i$  要素 ( $i = 1, 2, \dots, \Lambda$ ) を表すものとする。

式 (8) と式 (9) は伝達関数表現上等価である。マクロ部準静的補償制御則 (8) は、式 (9) (10) と同様の効果を持つことが分かる。すなわち、式 (10) で決定される補償量の低周波成分  $\Delta\boldsymbol{\theta}_M^{lpf}$  のみに位置誤差補償制御を適用することに等しい。

このように、マクロ部準静的補償制御則 (8) は簡潔な表現でフィルタと PID 制御を同時に実現でき、直感的な設計がしやすいと考えられる。しかし、フィルタ設計と制御系設計を PID ゲインのみで行うため、設計の自由度は減少することになる。提案する制御則 (8) では十分な制御性能が得られない場合には、制御則として式 (9) を用いて式 (10) のフィルタをゲインとは独立に設計することも可能である。

### 3.2 マクロ部準静的制振制御

前節では、補償量の低周波成分  $\Delta\boldsymbol{\theta}_M^{lpf}$  を用いるのと等価な位置誤差補償制御 (8) を導出した。そこで考慮されなかった補償量の高周波成分は、

$$\begin{aligned}(\Delta\boldsymbol{\theta}_M^{hpf})_i &= (\Delta\boldsymbol{\theta}_M)_i - (\Delta\boldsymbol{\theta}_M^{lpf})_i \\ &= \frac{K_{pMi} + K_{dMi}s}{K_{iMi} + K_{pMi}s + K_{dMi}s^2} s(\Delta\boldsymbol{\theta}_M)_i\end{aligned}\quad (11)$$

と表される。この  $\Delta\boldsymbol{\theta}_M^{hpf}$  は、マクロ部準静的補償制御での位置誤差補償の対象とならない振動成分であり、抑制されることが望ましい。式 (11) から、 $\Delta\boldsymbol{\theta}_M^{hpf}$  は、位置誤差速度  $\Delta\dot{\boldsymbol{\theta}}_M$  に一種のローパスフィルタをかけたものであることが分かる。

そこで、マクロ部の制振のための制御量として、準静的な補償量  $\Delta\boldsymbol{\theta}_M$  の高周波成分  $\Delta\boldsymbol{\theta}_M^{hpf}$  を用いることを提案する。これによって、一般的な三次元多自由度フレキシブルマニピュレー

タに対しても容易に制御量を求めることが可能となる。また、 $\Delta\boldsymbol{\theta}_M^{hpf}$  は速度の次元を持ち、重力などによる定常なたわみには作用せず、制振に有効な速度フィードバックの効果を持つ。

制振駆動力として

$$\tau_M^{damp} = -\mathbf{K}_{damp} \Delta\boldsymbol{\theta}_M^{hpf} \quad (12)$$

をマクロ部各軸関節駆動力に加える。ただし  $\mathbf{K}_{damp} \in \mathbb{R}^{\Lambda \times \Lambda}$  はマクロ部各軸制振ゲインを表す対角行列である。

柔軟マクロ部の二つの制御則、準静的補償制御 (8) と準静的制振制御 (12) の式から分かるように、これらは補償量  $\Delta\boldsymbol{\theta}_M$  に対して互いに逆向きの駆動力を発生する。しかし、補償量のうち実際に制御力に作用するのは、周波数領域が分離した  $\Delta\boldsymbol{\theta}_M^{lpf}$  と  $\Delta\boldsymbol{\theta}_M^{hpf}$  であるため、これら二つの制御則は、その効果を打ち消し合うことなく同時に使用することが可能である。

## 4. マイクロ部制御

### 4.1 マイクロ部準静的補償制御

マクロ部準静的補償制御においては、マクロ部アクチュエータの仕様によって与えられる応答速度を超える高速な誤差の補償はできない。また、ローパスフィルタ (10) によってカットオフされる誤差の高周波成分の補償もできない。そこで、マイクロ部の機構的特性を生かして、これらマクロ部で補償できない手先位置誤差の補償を行う。このためには以下に示す、文献 [10] による準静的軌道制御系を用いる。

修正量  $\Delta\boldsymbol{\theta}_m \in \mathbb{R}^{\lambda}$  は式 (5) より以下のように与えられる [10]。

$$\Delta\boldsymbol{\theta}_m = -\mathbf{J}_m^+(\mathbf{J}_M \Delta\boldsymbol{\theta}_M + \mathbf{J}_e \Delta \mathbf{e}) \quad (13)$$

上式中の  $\Delta\boldsymbol{\theta}_M$  は、式 (7) による修正量としての  $\Delta\boldsymbol{\theta}_M$  とは異なり、現在のマクロ部関節誤差を表す  $\Delta\boldsymbol{\theta}_M = \boldsymbol{\theta}_{Md} - \boldsymbol{\theta}_M$  であることに注意されたい。

マイクロ部では目標値  $\boldsymbol{\theta}_{md} \in \mathbb{R}^{\lambda}$  に修正量  $\Delta\boldsymbol{\theta}_m$  を加え、修正された目標値に対して関節角  $\boldsymbol{\theta}_m$  に関する各軸 PID 制御を適用する。

$$\begin{aligned}\tau_m^{com} &= \mathbf{K}_{pm}(\boldsymbol{\theta}_{md} + \Delta\boldsymbol{\theta}_m - \boldsymbol{\theta}_m) \\ &+ \mathbf{K}_{im} \int_0^t (\boldsymbol{\theta}_{md} + \Delta\boldsymbol{\theta}_m - \boldsymbol{\theta}_m) dt \\ &+ \mathbf{K}_{dm}(\dot{\boldsymbol{\theta}}_{md} - \dot{\boldsymbol{\theta}}_m)\end{aligned}\quad (14)$$

ただし  $\mathbf{K}_{pm} \in \mathbb{R}^{\lambda \times \lambda}$ 、 $\mathbf{K}_{im} \in \mathbb{R}^{\lambda \times \lambda}$ 、 $\mathbf{K}_{dm} \in \mathbb{R}^{\lambda \times \lambda}$  はそれぞれマイクロ部各軸 PID ゲインを表す対角行列、 $\tau_m^{com} \in \mathbb{R}^{\lambda}$  はマイクロ部各軸関節駆動力である。

### 4.2 マイクロ部準静的アクティブマスダンパ

マクロ部準静的制振制御においても、マクロ部アクチュエータの仕様によって与えられる応答速度を超える高速な振動の抑制はできない。また、マクロ部準静的制振制御は柔軟リンクを介して間接に行われるため、現在手先に生じている振動を速やかに抑制するには不十分である。そこで、応答の比較的速いマイクロ部をアクティブマスダンパとして用いることによって、直接マクロ部先端に制御力を加えることができる。

マクロ部先端位置  $\mathbf{p}_M$  の  $\Sigma_0$  における並進速度ベクトル

$\dot{p}_M \in \mathfrak{R}^3$ , 角速度ベクトル  $\omega_M \in \mathfrak{R}^3$  は,

$$v_M = \begin{bmatrix} \dot{p}_M \\ \omega_M \end{bmatrix} = J_M^{vM}(\theta_M) \dot{\theta}_M + J_e^{vM}(e) \dot{e} \quad (15)$$

となる。ただし  $J_M^{vM} \in \mathfrak{R}^{6 \times \Lambda}$ ,  $J_e^{vM} \in \mathfrak{R}^{6 \times g}$  は,  $\dot{\theta}_M, \dot{e}$  から  $v_M \in \mathfrak{R}^6$  へのヤコビ行列である。

$v_M$  に対して, M-m システムにおけるマイクロ部準静的アクティブマスダンパ (以下準静的 AMD) の機能を持つ以下の制御則を適用する。

$$\begin{bmatrix} {}^0 f_{\Lambda+1} \\ {}^0 n_{\Lambda+1} \end{bmatrix} = K_{dAMD}(v_{Md} - v_M) \quad (16)$$

ここで,  ${}^0 f_i, {}^0 n_i$  はそれぞれ,  $\Sigma_0$  から見たリンク座標系  $\Sigma_i$  の原点に作用する力とモーメントであり,  $K_{dAMD} \in \mathfrak{R}^{6 \times 6}$  はマイクロ部各軸準静的 AMD ゲインを表す対角行列である。 $v_{Md}$  は, 弾性変位を 0 とした場合の軌道計画で与えられるマイクロ部先端の目標速度であり,

$$v_{Md} = \begin{bmatrix} \dot{p}_{Md} \\ \omega_{Md} \end{bmatrix} = J_M^{vM}(\theta_{Md}) \dot{\theta}_{Md} \quad (17)$$

である。

動特性は一切未知であることから, AMD としての制御力  ${}^0 f_{\Lambda+1}, {}^0 n_{\Lambda+1}$  に静力学的に等価なマイクロ部関節駆動力  $\tau_m^{AMD} \in \mathfrak{R}^\lambda$  は以下ようになる [13]。

$$-\tau_m^{AMD} = (J_m^{vM})^T \begin{bmatrix} {}^0 f_{\Lambda+1} \\ {}^0 n_{\Lambda+1} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$J_m^{vM} = \left[ (J_m^{vM})_{\Lambda+1}, \dots, (J_m^{vM})_{\Lambda+\lambda} \right] \quad (19)$$

$$(J_m^{vM})_i = \begin{cases} \begin{bmatrix} z_i \times {}^0 p_{\Lambda+1,i} \\ {}^0 z_i \end{bmatrix} & (\text{if R}) \\ \begin{bmatrix} {}^0 z_i \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} & (\text{if P}) \end{cases} \quad (20)$$

$\tau_m^{AMD}$  の負号は, 手先側でなく根本側への関節駆動力であることを表す。また,  ${}^0 z_i$  は,  $\Sigma_0$  から見た  $z_i$  軸方向の単位ベクトルであり,  ${}^0 p_{\Lambda+1,i}$  は, リンク座標系  $\Sigma_i$  の原点からマイクロ部先端 (マイクロ部根元) へのベクトルである。 $J_m^{vM} \in \mathfrak{R}^{6 \times \lambda}$  は速度・角速度ベクトルに対するヤコビ行列であるが, マイクロ部各関節速度  $\dot{\theta}_m$  からマイクロ部先端 (マイクロ部根元) 速度・角速度  $v_M$  へのヤコビ行列となることに注意されたい。

以上のことから, 準静的 AMD によるマイクロ部関節駆動力  $\tau_m^{AMD}$  は,

$$\begin{aligned} \tau_m^{AMD} &= K_{pAMD}(\theta_{md} - \theta_m) \\ &+ K_{iAMD} \int_0^t (\theta_{md} - \theta_m) dt \\ &- (J_m^{vM})^T K_{dAMD}(v_{Md} - v_M) \end{aligned} \quad (21)$$

で与えられる。上式においては, 平衡位置を定めるために PI 項を付加しており,  $K_{pAMD} \in \mathfrak{R}^{\lambda \times \lambda}$ ,  $K_{iAMD} \in \mathfrak{R}^{\lambda \times \lambda}$  はマイクロ部各軸 PI ゲインを表す対角行列である。

剛体マイクロ部の二つの制御則, 準静的補償制御 (14) と準静的 AMD (21) においては, 共に同じ周波数領域の振動に起因する量  $\Delta\theta_m$  と  $v_M$  を制御に用いており, かつ制御目的が異なるため, 重ね合わせたときの制御力による効果は不明である。場合によっては意味をなさなくなる恐れがあるため, 本論文においては, これら二つの制御則は, 同時には使用せずに切り換えての使用に限定する。

## 5. M-m システムの制御

### 5.1 制御則の組み合わせ

これまで述べてきたそれぞれの制御則をマクロマイクロマニピュレータの軌道制御に用いることを考える。柔軟マイクロ部駆動力  $\tau_M$  として準静的補償制御 (8) と準静的制振制御 (12) を共に用いる。柔軟マイクロ部の二つの制御は, 前述のように同時に使用できる。

剛体マイクロ部駆動力  $\tau_m$  としては, 準静的補償制御 (14) と準静的 AMD (21) を重みをつけて重ね合わせる。

まとめると, 以下のような制御則を用いることになる。

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_M \\ \tau_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_M^{com} + \tau_M^{damp} \\ w\tau_m^{com} + (1-w)\tau_m^{AMD} \end{bmatrix} \quad (22)$$

ここで,  $w$  ( $0 \leq w \leq 1$ ) はマイクロ部制御を決定する重み係数である。 $w = 1$  の場合, 手先位置決め・軌道追従を重視した制御となる。これを, 軌道追従モードと呼ぶことにする。 $w = 0$  の場合は柔軟リンクの制振を重視した制御であり, これを, 制振モードと呼ぶことにする。

### 5.2 制御モードの切り換え

マニピュレータに与えられる作業には, 手先の高精度な軌道制御が必要な部分と, それほど精度は必要ない部分に分けられるものが多い。例えば, 作業を実際に行う領域では高精度が必要であるが, 作業領域から別の作業領域への移動の際には, 多少精度を落としても問題ないと考えられる。このように, 作業に応じて高精度領域と低精度領域を定め, 高精度領域では軌道追従モード ( $w = 1$ ), 低精度領域では制振モード ( $w = 0$ ) とすることで, 制御則を使い分けることができる。高精度領域から低精度領域の境界では,

$$w = \frac{1}{2} \left( 1 + \cos \frac{\pi t}{\Delta t} \right) \quad (23)$$

低精度領域から高精度領域の境界では,

$$w = \frac{1}{2} \left( 1 - \cos \frac{\pi t}{\Delta t} \right) \quad (24)$$

のように制御モード決定パラメータ  $w$  の値をなめらかに切り換える。ただし,  $\Delta t$  は切り換え時間,  $t$  ( $0 \leq t \leq \Delta t$ ) は切り換え開始からの制御時間である。

## 6. 実験

### 6.1 実験システム

実験に用いる M-m システム (Fig. 2) は, 鉛直平面上 4 自由度を持ち, 柔軟マイクロ部が回転の 2 自由度 (M1, M2), 剛体マイクロ部が回転 (m1) 直動 (m2) の 2 自由度である。

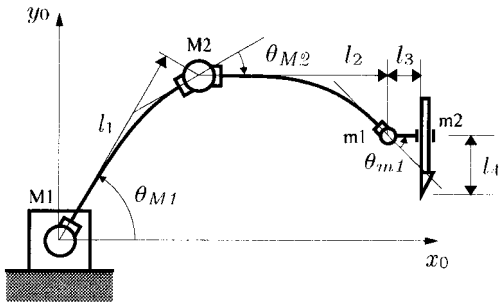


Fig. 2 Coordinate system of experimental setup

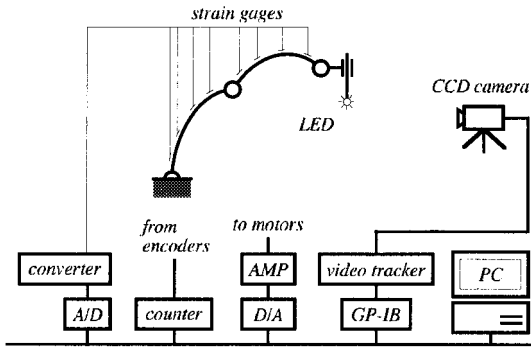


Fig. 3 Control system of experimental setup

マクロ部リンク 1, 2 の長さは  $l_1 = 0.730$  [m],  $l_2 = 0.7645$  [m] であり、それぞれの柔軟部分は S45C 炭素鋼製の丸棒で、長さが共に 0.60 [m]、直径はそれぞれ 0.013 [m], 0.008 [m] である。マイクロ部リンク 3 の長さは  $l_3 = 0.041$  [m] であり、直動リンク 4 の可動範囲は  $0.08425 \leq l_4 \leq 0.13425$  [m] である。

マクロ部の駆動には、DC サーボモータをハーモニックドライブ減速して用いている。減速比は M1, M2 関節共に 1 : 100 である。マイクロ部の駆動には、DC サーボモータをギヤで減速して用いている。減速比は m1 で 1 : 2, m2 で 1 : 3 であり、これを差動機構を用いることで回転と直動の運動に変換している。

制御装置の構成を Fig. 3 に示す。各軸には光学式エンコーダが取り付けられており、関節変位を計測することができる。また、マクロ部リンクの柔軟部分にはそれぞれ、柔軟部分の根元から 0.05, 0.20, 0.40, 0.55 [m] の 4 点に歪みゲージを張り付けてある。その 4 点における曲率の値から柔軟リンクの弾性変位を三次の多項式で近似して推定し、各時刻におけるリンク形状出力としている。関節変位速度、弾性変位速度は、変位をサンプリング時間ごとに差分して得る。

手先位置の測定には、応用計測研究所製のビデオトラッカ G2120II を用いている。これによって、手先に取り付けた LED の絶対位置が計測される。ただし、この手先絶対位置は、実験結果の測定のみを用いており、制御目的には利用していない。

ホストコンピュータによって計算された各軸の駆動力は、D/A ボードを介してサーボアンプに供給され、各関節を駆動する。ホストコンピュータとしては日本電気製 PC-9821Xa12 を用いている。

すべての実験において、制御のサンプリング時間は 3.33 [ms]

Table 1 Controller gain

(a) Macro part

| Gain       |            | joint M1 | joint M2 |
|------------|------------|----------|----------|
| $K_{pM}$   | [Nm/rad]   | 2000.0   | 1000.0   |
| $K_{iM}$   | [Nm/rad·s] | 2000.0   | 1000.0   |
| $K_{dM}$   | [Nms/rad]  | 200.0    | 200.0    |
| $K_{damp}$ | [Nm/rad]   | 200.0    | 300.0    |

(b) Micro part error compensation

| Gain     | joint m1       | joint m2   |
|----------|----------------|------------|
| $K_{pm}$ | 10.0 [Nm/rad]  | 20.0 [N]   |
| $K_{im}$ | 8.0 [Nm/rad·s] | 15.0 [N/s] |
| $K_{dm}$ | 0.01 [Nms/rad] | 0.02 [Ns]  |

(c-1) Micro part AMD (PI gain)

| Gain       | joint m1       | joint m2   |
|------------|----------------|------------|
| $K_{pAMD}$ | 10.0 [Nm/rad]  | 20.0 [N]   |
| $K_{iAMD}$ | 8.0 [Nm/rad·s] | 15.0 [N/s] |

(c-2) Micro part AMD (AMD gain)

| Gain       | $x_0$ 方向    | $y_0$ 方向    | $\omega_0$ 方向   |
|------------|-------------|-------------|-----------------|
| $K_{dAMD}$ | 20.0 [Ns/m] | 20.0 [Ns/m] | 0.005 [Nms/rad] |

であり、実験データの記録は 30 [Hz] で行った。各制御則における制御ゲインは、Table 1 に示す値を用いた。

### 6.2 振動抑制実験

各制御モードの制御性能を比較するため、系に外乱を加えたときの振動抑制実験を行った。手先位置を  $p_0 = [0.9$  [m],  $0.65$  [m]] で一定に保つ目標軌道を与えておき、マクロ部第 2 リンクの柔軟部先端に鉛直下向きに 4.90 [N] の力を加えて静止した状態から、 $t = 0$  s の瞬間にその力を抜くという外乱を加えて、マクロ部第 1 リンクの歪み量を測定した。この歪み量は、第 1 リンクの柔軟部分の根元から 0.05 [m] の位置に張り付けられた歪みゲージによる測定値である。比較する制御則<sup>†</sup>としては、

- (a) マクロ部、マイクロ部とも通常の PID 制御。
- (b) マクロ部、マイクロ部とも準静的補償制御 (制振なし)。
- (c) 軌道追従モード。
- (d) 制振モード。

を用いた (a) の通常の PID 制御とは、式 (8) と式 (14) において、 $\Delta\theta_M, \Delta\theta_m$  を共に 0 とおいたものである。その PID ゲインは、マクロ部、マイクロ部の準静的補償制御のゲイン (Table 1 (a) および (b) 参照) と同じにした。

実験結果は Fig. 4 のようになった (a) の PID 制御では、外乱による振動は減衰していくものの、その速度は遅い (b) では、マイクロ部準静的補償制御が手先位置誤差を補償する動きがマクロ部を励振し、振動は減衰しなくなる (c) では、マイクロ部準静的補償制御による励振が、マクロ部準静的制振制御を加えることで抑さえられ、振動が速やかに減衰することが分かる。しかし、比較的応答の遅いマクロ部によって制振を行うため、外乱の直後の振動は PID 制御の場合と変わらないか、むしろ

<sup>†</sup>マイクロ部準静的補償制御 (14) 単独での制御効果については、文献 [10] で述べられていることもあり、実験結果を挙げていないが、振動制御については Fig. 4 (b) に、軌道制御については Fig. 5 (b) に近い結果が得られる。

しる大きくなっている (d) では、マクロ部制振制御に加えてマイクロ部によって準静的 AMD を行うことで、外乱の直後のピークの振動が抑えられていることが分かる。

以上の結果から、制振を考慮せずに準静的補償制御のみを用いると、振動が抑制されない場合が存在しうることが分かる。これと比較して、軌道追従モードのようにマクロ部の制振制御を行うだけでもかなりの制振効果が見られ、さらに、マイクロ部にも制振機能を持たせた制振モードにすると、さらに改善が見られる。

### 6.3 軌道制御実験

次に、位置決めおよび軌道追従性能を比較するために、モード切換を含む軌道制御実験を行った。目標軌道は手先位置変数で記述し、一辺 0.3 [m] の正方形を描く軌道  $p_0$   $p_1$   $p_2$   $p_3$   $p_0$  を与えた。ただし、 $p_0 = [0.9 \text{ [m]}, 0.65 \text{ [m]}]$ 、 $p_1 = [0.9 \text{ [m]}, 0.35 \text{ [m]}]$ 、 $p_2 = [1.2 \text{ [m]}, 0.35 \text{ [m]}]$ 、 $p_3 = [1.2 \text{ [m]}, 0.65 \text{ [m]}]$  である。各点間はそれぞれ 1.8 [s] で移動し、各頂点  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$  では 1.0 [s] 静止する。軌道の終了後は、 $p_0$  で静止する。軌道計画は時間の五次多項式で記述し、マイクロ部をその可動範囲中心である  $\theta_{m1} = 0^\circ$ 、 $l_4 = 0.10925 \text{ [m]}$  に固定して、マクロ部柔軟リンクに弾性変位が存在しないとして逆運動学を解いて求めた。比較する制御則としては、

- (a) マクロ部、マイクロ部とも通常の PID 制御。
- (b) 軌道追従モード。
- (c) 軌道追従モードと制振モードの切り換え。

を用いた (a) の通常の PID 制御とは、前節と同様に、式 (8) と式 (14) において、 $\Delta\theta_M$ 、 $\Delta\theta_m$  を共に 0 とおいたものである。その PID ゲインは、マクロ部、マイクロ部の準静的補償制御のゲイン (Table 1 (a) および (b) 参照) と同じにした。

(c) の切り換えにおいては、軌道  $p_0$   $p_1$  と  $p_2$   $p_3$  を

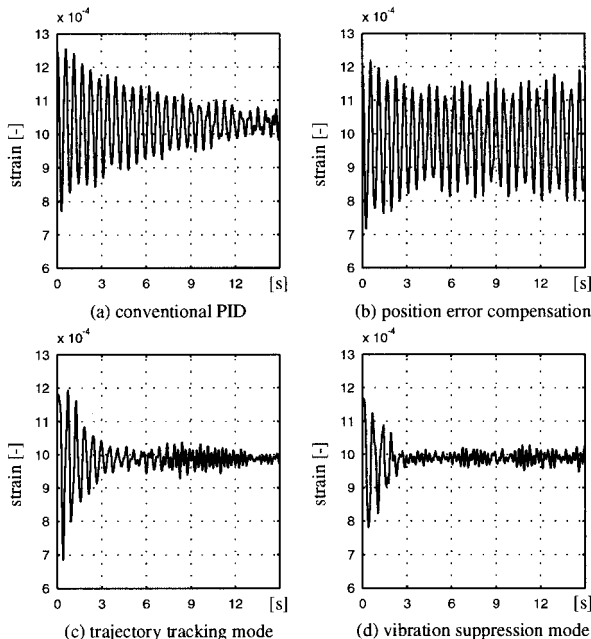


Fig. 4 Experimental result (disturbance response)

低精度領域として制振モード、軌道  $p_1$   $p_2$  と  $p_3$   $p_0$  を高精度領域として軌道追従モードを適用し、正方形の頂点で静止している間にモード切換を行う。

実験結果は Fig. 5 のようになった。図中、破線は目標軌道、実線が実現された軌道である (a) の PID 制御では、弾性変位による手先位置誤差の補償が行われなかったため、大きな誤差が生じている。また、その誤差は最大で 0.10 [m] 以上に達する。これはマイクロ部の可補償範囲を超えており、たとえマイクロ部準静的補償制御のみを行っても、誤差を補償しきれないことが分かる (b) では、マクロ部とマイクロ部の準静的補償制御の併用によって、軌道の全域で目標軌道によく追従している (c) では、高精度領域 (水平移動) では軌道追従モードと同様の性

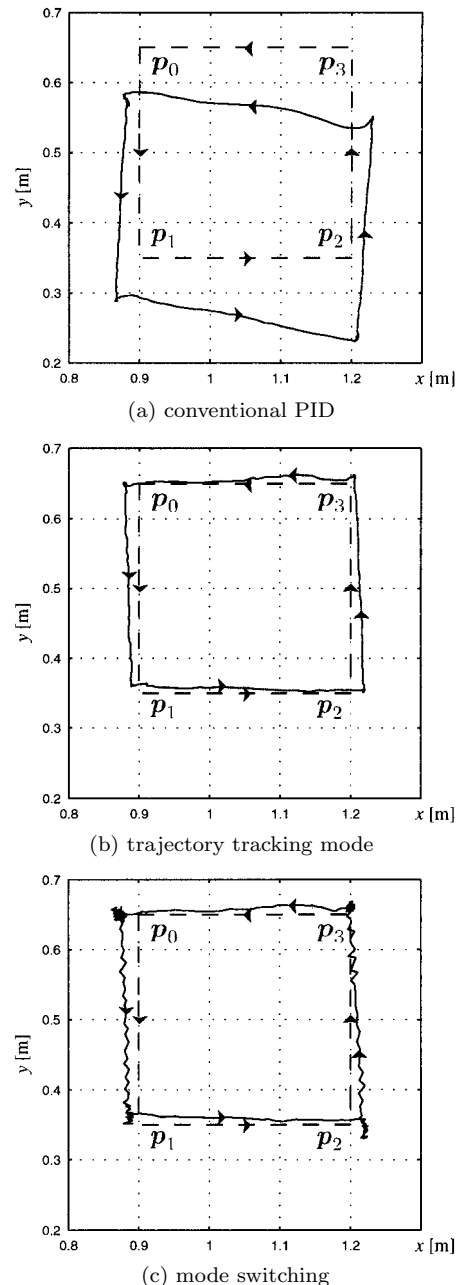


Fig. 5 Experimental result (trajectory control)

能が認められる．低精度領域（垂直移動）においては，手先に多少振動が生じているが，これはマクロ部制振のための反力をマイクロ部準静的 AMD で発生させていることによる．

なお，軌道追従性能のみを考えた場合には，モード切換は必要なく，常に軌道追従モードで制御を行えばよいと考えられる．しかし，マニピュレータの作業全体を考えた場合には 5.2 節でも述べたように，低精度で問題ない領域も存在する．低精度領域で制振モードに切り換えるのは，マイクロ部で位置誤差補償する必要がないときは，その自由度を他の目的（ここでは制振）に割り当てて，有効に使用の方が良いという考えに基づくものである．

## 7. おわりに

柔軟マクロ/剛体マイクロシステムを構成するフレキシブルマニピュレータの軌道制御について，マクロ部，マイクロ部それぞれが位置誤差補償と制振に寄与する制御則と，それらの効果的な組み合わせ，および切り換えを提案した．実験で検討した結果，提案手法のようにシステムの構造的特性を利用することで高精度な軌道制御，制振制御が可能であることが示された．なお，制御の安定性については実験的に確認されたのみであり，今後解析的な検討が必要である．また，本論文では，式(22)における重ね合わせの重み  $w$  を 0, 1 に限定してその効果を検証したが， $0 \leq w \leq 1$  としたときの挙動についても，今後検討する必要がある．

## 参考文献

[1] 羅：“フレキシブルマニピュレータの出力フィードバック制御”，日本ロボット学会誌，vol.12, no.2, pp.200-206, 1994.

- [2] 内山，姜，箱守：“フレキシブルロボットアームの補償制御”，日本ロボット学会誌，vol.7, no.4, pp.284-293, 1989.
- [3] F. Pfeiffer: “A Feedforward Decoupling Concept for the Control of Elastic Robots,” J. Robotic Systems, vol.6, no.4, pp.407-416, 1989.
- [4] B. Siciliano and W. J. Book: “A Singular Perturbation Approach to Control of Lightweight Flexible Manipulators,” Int. J. Robotics Research, vol.7, no.4, pp.79-90, 1988.
- [5] 吉川，細田：“仮想的な剛体リンクと受動関節を用いたフレキシブルアームのモデリング”，計測自動制御学会論文集，vol.27, no.12, pp.1389-1395, 1991.
- [6] R. Theodore and A. Ghosal: “Comparison of the Assumed Modes and Finite Element Models for Flexible Multilink Manipulators,” Int. J. Robotics Research, vol.14, no.2, pp.91-111, 1995.
- [7] 金，近野，内山：“フレキシブルマニピュレータ動力学の高精度集中数モデリング”，日本機械学会論文集，62 巻 602 号，pp. 4005-4011, 1996.
- [8] J. Kövecses: “A Distributed Parameter Model for the Dynamics of Flexible-Link Robots,” J. Robotic Systems, vol.15, no.5, pp.281-298, 1998.
- [9] D. N. Nenchev, K. Yoshida, P. Vichitkulsawat and M. Uchiyama: “Reaction Null-Space Control of Flexible Structure Mounted Manipulator Systems,” IEEE Trans. Robotics and Automation, vol.15, no.6, pp.1011-1023, 1999.
- [10] 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.
- [11] 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, pp.299-303, 1994.
- [12] 姜，内山：“フレキシブルロボットアームの可補償性”，日本ロボット学会誌，vol.6, no.5, pp.416-423, 1988.
- [13] 吉川：ロボット制御基礎論．pp.61-65, コロナ社，1988.



吉川恒夫 (Tsuneo Yoshikawa)

1941年12月19日生．1969年京都大学大学院工学研究科博士課程修了．同年同大学工学部助手．1970年同大学工学部助教授．1986年同大学工学部教授（オートメーション研究施設．1989年より応用システム科学教室．1991年より機械工学教室），1994年組織変更により同大学工学研究科教授（機械工学専攻）となり，現在に至る．ロボット工学，制御工学，および力覚人工現実感の研究に従事．工学博士．システム制御情報学会，計測自動制御学会，日本機械学会の会員．米国 IEEE 学会のフェロー．

（日本ロボット学会正会員）



金岡克弥 (Katsuya Kanaoka)

1971年7月31日生．1997年京都大学大学院工学研究科修士課程修了．同年同大学大学院工学研究科研究生．同年同大学大学院工学研究科博士後期課程に進学．現在に至る．フレキシブルマニピュレータの研究に従事．日本機械学会会員．

（日本ロボット学会学生会員）