作業環境のパラメータ推定に基づいた 多自由度マニピュレータの力制御

正員 村上 俊之 (慶應大)

正員 大西 公平 (慶應大)

A Force Control of Multi-Degrees-of-Freedom Manipulator Based on Parameter Estimation

Toshiyuki Murakami, Member, Kouhei Ohnishi, Member (Keio University)

The paper describes an adaptive force controller. In general force controller, force response depends on unknown parameters of the environment which the manipulator contacts. In case the target environment is hard, the force response of common system is oscillatory. To obtain stable force response which is independent of environment, it is necessary to adjust control gain according to the environment.

In the proposed method, a disturbance observer is applied to each joint and the total disturbance effects are canceled out in joint space. In the observer-based manipulator, full dynamics including the environment is cleared up and the workspace force controller is constructed without any disturbance effect. Then the least-squares estimator of unknown parameters of environment is also introduced to adjust the control gain. Several experimental results are shown to verify the proposed force controller.

キーワード：外乱オブザーバ，加速度コントローラ，パラメータ推定，作業空間，力制御

1. はじめに

多自由度マニピュレータを用いて接触を伴う作業を行う場合，過大な力の印加を防ぎマニピュレータの先端が接触している作業対象物（以下，マニピュレータの作業環境と呼ぶ）を保護することが第一に要求される。一方，一般的な力制御においては力指令に対する応答の速さも要求される。多自由度マニピュレータの力制御は，従来から主に固定ゲインを用いた PID 力フィードバック制御が行われてきた。しかし，固定ゲインを用いた制御では，作業環境のもつスチフネスの変動に対して適応するのは困難である。スチフネスが高くなると力応答が振動的になり必ずしも安定な応答が得られない。逆に，スチフネスが低くなると力応答の整定時間が長くなり速応性が悪くなる。従って，力フィードバック制御系に含まれる作業環境のダイナミ

クスが未知であったり変動したりする場合には，作業環境の特性に応じてコントローラのフィードバックゲインを随時調整する必要がある。しかし，従来そのゲイン調整は実験などで試行錯誤を繰返して経験的に調整を行っていた。これはフィードバックループに未知の制御対象が含まれるために補償要素の設計が経験的になるからであり，制御対象の特性が推定できれば補償要素の設計は容易となるはずである。

この問題点を解決するために本論文では，まずマニピュレータの関節に外乱オブザーバを適用することにより，外乱の影響をほとんど受けず，各パラメータがノミナル値に固定された加速度コントローラと呼ばれるサーボ系を構成する。これにより，多自由度マニピュレータの手先効果のダイナミクスが，その可到達空間（作業空間）において明確化される。そこで，作業環境のダイナミクスをばね要素と粘性要素を用いてモ

デル化することにより力フィードバック系を作業空間において簡単な二次系モデルで近似することが可能となる。ここで、未知パラメータであるばね係数と粘性係数を作業環境との接触力、マニピュレータの先端の位置、速度の三つの情報から最小二乗法に基づいて推定し、この推定値を用いてコントローラのゲイン調整を自動的に行う。このゲイン調整の際に力応答の安定性と速応性の指標となるパラメータをあらかじめ所望の値に設定しておき、作業環境の動特性に依存しない安定した力制御を実現する。

本論文の構成を示す。まず、関節空間において外乱トルクを定義し、外乱オブザーバに基づいたロバスト制御系を構成する。次に、作業空間での動力学方程式を導出し、同式を用いた作業空間での力コントローラを示す。次に、最小二乗法に基づいた環境の未知パラメータ推定法を示し、適応型の力コントローラを実現する。また、提案する力コントローラの有効性を確認するため、3自由度ダイレクトドライブマニピュレータを用いた実験結果を示す。

2. 外乱オブザーバによる加速度コントローラ

関節空間におけるアクチュエータおよびロボットのモデルは図1のように表される。ここで、ロボットの各関節に作用する外乱トルクベクトルは(1)式のように定義される。

$$\begin{aligned} T_{dis} = & T_{int} + T_{ext} + f_c + D\dot{q} \\ & + \text{diag}\{J(q) - J_n\} \ddot{q} + (K_{tn} - K_t) I_a^{ref} \end{aligned} \quad (1)$$

(1)式の右辺第1項は重力、遠心力の効果を含む他関節からの干渉トルク、第2項は外部からの反作用トルク、第3項はクーロン摩擦トルク、第4項は粘性トルク、第5項は自己慣性の変動トルク、第6項はトルクリプルを表している。ここで、 I_a^{ref} はトルク電流、 K_t および $J(q)$ はトルク係数行列、慣性行列をそれぞれ表す。(1)式を用いることによって関節空間でのマニピュレータの動力学方程式は(2)式のように書ける。

$$J_n \ddot{q} = K_{tn} I_a^{ref} - T_{dis} \quad (2)$$

(2)式を基に外乱オブザーバを構成し、推定外乱トルクのフィードバックを行うと図2が得られる⁽³⁾⁽⁵⁾。同図は、 i 番目の関節の構成線図を表す。図2において、外乱オブザーバから得られる推定外乱トルクは次式のようになる。

$$\hat{T}_{disi} = \frac{g}{s + (K_{ti}/K_{tni})g} T_{disi} \quad (3)$$

図1 アクチュエータおよびマニピュレータのモデル

Fig. 1. A model of actuator and robot.

図2 オブザーバに基づいた関節の構成図

Fig. 2. Observer-based joint system.

図3 加速度コントローラ

Fig. 3. Acceleration controller.

図2は何ら近似を施さずことなく図3の破線部分に変換される。同図は関節空間における加速度コントローラであり、これより関節空間での加速度の誤差ベクトルは(4)式のように書ける。

$$\ddot{q}_i^{ref} - \ddot{q}_i = J_{ni}^{-1} G_{si}(s) T_{disi} = P_i \quad (4)$$

$$G_{si}(s) = \frac{s}{s + (K_{ti}/K_{tni})g}$$

(4)式において、 P_i を等価外乱加速度と呼び、外乱オブザーバのゲイン g を十分大きく設定することでその値はほぼ零とみなせる。従って、外乱の影響を受けずに加速度指令に対して追従する加速度コントローラが得られる。

3. 作業空間でのコントローラの構成

本章では、各関節が加速度コントローラとなっている多自由度マニピュレータの作業空間での力コントローラの基本構成法を示す。多自由度マニピュレータにおいて、作業空間での位置、速度、加速度および関節空間での位置、角速度、角加速度の関係式は次のよう

に表される。

$$\mathbf{x} = \mathbf{H}(\mathbf{q}) \dots \dots \dots (5)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \frac{\partial \mathbf{H}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_{\text{aco}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \dots \dots \dots (6)$$

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}_{\text{aco}}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}_{\text{aco}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \dots \dots \dots (7)$$

(5)～(7)式において、 $\mathbf{q}$, $\mathbf{x}$ は関節空間および作業空間での位置ベクトル、 $\mathbf{J}_{\text{aco}}(\mathbf{q})$ はヤコビ行列を表す。また、ヤコビ行列を用いることによって関節空間でのトルクベクトル $\boldsymbol{\tau}$ と作業空間での力ベクトル $\mathbf{F}^{\text{ref}}$ の関係式も次のように記述できる。

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{I}_v \ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_{\text{aco}}(\mathbf{q})^T \mathbf{F}^{\text{ref}} \dots \dots \dots (8)$$

各関節が加速度コントローラになっているマニピュレータでは、(8)式における慣性行列 $\mathbf{I}_v$ は任意の仮想慣性行列となる。ここで、関節空間での運動エネルギーと作業空間での運動エネルギーが等しいと仮定すると、作業空間での等価質量行列 $\mathbf{M}_v$ は次式のように定義される⁽⁷⁾。

$$\mathbf{M}_v(\mathbf{x}) = \mathbf{J}_{\text{aco}}(\mathbf{q})^{-T} \mathbf{I}_v \mathbf{J}_{\text{aco}}(\mathbf{q})^{-1} \dots \dots \dots (9)$$

(4)～(9)式より、作業空間でのマニピュレータの動力学方程式はベクトル形式で(10)式のように記述できる。同式において、 $\mathbf{P}$ は各要素に各関節の等価外乱加速度をもつベクトルであり、外乱オブザーバが適用されたマニピュレータではその値はほぼ零である。ここで、(8)、(10)式に基づいて力コントローラを構成した場合、その構成線図は図4のようになる⁽³⁾⁽⁵⁾。同図における $\mathbf{K}_v$ は力応答の安定性を増すための速度フィードバックゲイン行列である。また、力を加えている作業環境は図5に示されるようにスチフネス $\mathbf{K}_e$ および粘性係数 $\mathbf{D}_e$ でモデル化し、作業対象から受ける反作用力は(11)式のように定義する。

$$\mathbf{M}_v(\mathbf{x}) \ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}^{\text{ref}} + \mathbf{M}_v(\mathbf{x}) \mathbf{J}_{\text{aco}}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} - \mathbf{M}_v(\mathbf{x}) \mathbf{J}_{\text{aco}}(\mathbf{q}) \mathbf{P} \dots \dots \dots (10)$$

$$\mathbf{F}^{\text{res}} = \mathbf{K}_e \mathbf{x} + \mathbf{D}_e \mathbf{S} \mathbf{x} \dots \dots \dots (11)$$

各関節において加速度コントローラが構成されている多自由度マニピュレータでは、図4に示される関節

図4 作業空間での力コントローラ

Fig. 4. Force controller in workspace.

空間での慣性行列 $\mathbf{I}_v$ は任意に設定できる。そこで、任意の仮想慣性行列 $\mathbf{I}_v$ を(12)式のように設定することで作業空間において等価質量行列を $\mathbf{M}_{vn}$ に固定化することができる。これは、(12)式を(9)式へ代入することで明らかとなる。更に、 $\mathbf{M}_{vn}$ を対角行列とすることで作業空間での各軸方向の力応答は完全に非干渉化される。

$$\mathbf{I}_v = \mathbf{J}_{\text{aco}}(\mathbf{q})^T \mathbf{M}_{vn} \mathbf{J}_{\text{aco}}(\mathbf{q}) \dots \dots \dots (12)$$

ここで、(12)式を図4のコントローラに代入すると(13)式が得られる。同式は、作業空間で生成された力ベクトルを等価質量行列およびヤコビの逆行列によって角加速度ベクトルに変換し、各関節への指令ベクトルとすることで作業空間における力応答が非干渉化されることを意味している。また、(13)式にヤコビの逆行列が含まれることから、作業空間での非干渉力コントローラは特異点を除いたマニピュレータの可到達領域にて実現されることがわかる。

$$\ddot{\mathbf{q}}^{\text{ref}} = \mathbf{J}_{\text{aco}}(\mathbf{q})^{-1} \mathbf{M}_{vn}^{-1} \{ \mathbf{F}^{\text{ref}} - \mathbf{M}_{vn} \mathbf{J}_{\text{aco}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \} \dots \dots \dots (13)$$

(10)、(12)式より、力指令に対する位置応答は次式のようにになる。

$$\mathbf{x} = \{ \mathbf{M}_{vn} \mathbf{S}^2 + (\mathbf{D}_e + \mathbf{K}_v) \mathbf{S} + \mathbf{K}_e \}^{-1} \mathbf{F}^{\text{cmd}} \dots \dots \dots (14)$$

(14)式から、作業環境のダイナミクスも含めた作業空間での力コントローラの構成線図は図6のようになり、力指令に対する力応答は(15)式で与えられる。ここで、 $\mathbf{S}$ は対角要素にラプラス演算子をもつ対角行列である。

図5 ロボットおよび環境のモデル

Fig. 5. A model of robot and environment.

図6 作業環境を含めた力コントローラ

Fig. 6. Force controller including environment.

図 7 適応型力コントローラ
Fig. 7. Adaptive force controller.

$$\begin{aligned}
 F^{\text{res}} &= (D_e S + K_e) \{ M_{vn} S^2 + (D_e + K_v) S \\
 &\quad + K_e \}^{-1} F^{\text{cmd}} \\
 &\doteq \omega_n^2 (S^2 + 2\zeta_n \omega_n S + \omega_n^2)^{-1} F^{\text{cmd}} \\
 &\quad (K_e \gg D_e) \\
 &\quad \left(\omega_n = \sqrt{K_e M_{vn}^{-1}}, \right. \\
 &\quad \left. \zeta_n = \frac{1}{2} (K_v + D_e) (M_{vn} K_e)^{-1/2} \right) \quad (15)
 \end{aligned}$$

(15)式より、外乱オブザーバが適用された多自由度マニピュレータでは作業空間での力制御系が二次系で近似できることがわかる。しかしながら、その力応答は作業環境の未知パラメータの影響を受ける。従って、作業環境に依存しない安定な力応答を得るには、未知パラメータに応じたゲイン調整を行う必要がある。そこで、次章では環境の未知パラメータを最小二乗法に基づいて推定し、環境のパラメータに依存しない力コントローラを構成する。

4. パラメータ推定に基づいた力コントローラ

本章では、環境の未知パラメータを同定するため最小二乗法に基づいた推定アルゴリズムを導入する⁽⁴⁾⁽⁶⁾。作業環境のモデルとしては、図5に示すモデルを仮定し、パラメータ推定における一方向の誤差 e を(16)式で与える。

$$e(k) = \tau(k) - m(k)^T \alpha(k) \quad (16)$$

ここで、 $\alpha(k) = [K_w(k) D_w(k)]^T$ ：未知パラメータベクトル、 $m(k) = [x_j(k) \dot{x}_j(k)]^T$ ：測定値ベクトル、 $\tau(k) = F_j^{\text{es}}(k)$ ：力センサの出力

(16)式に基づき指数重み付きの誤差関数 $J(k)$ を次式のように定義する。ここで、 μ は忘却係数である。

$$J(k) = \sum_{j=1}^k \mu^{k-j} \{e(j)\}^2 \quad (17)$$

上式の誤差関数 $J(k)$ を最小にするような $\alpha(k)$ が環境の未知パラメータの最小二乗推定値 $\hat{\alpha}(k)$ であり、 $\partial J / \partial \alpha = 0$ より(18)、(19)式を得る。ここで、 $Q(k)$ は適応ゲイン行列と呼ばれ、通常その初期値は、 $Q(0) = \beta I$ (I ：単位行列、 β ：大きな正数)とする。

$$\begin{aligned}
 \hat{\alpha}(k+1) &= \hat{\alpha}(k) + \frac{Q(k) m^T(\tau(k+1) - m^T \hat{\alpha}(k))}{\mu + m^T(k+1) Q(k) m(k+1)} \quad (18)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q(k+1) &= \frac{1}{\mu} \left\{ Q(k) \right. \\
 &\quad \left. - \frac{Q(k) m(k+1) m^T(k+1) Q(k)}{\mu + m^T(k+1) Q(k) m(k+1)} \right\} \quad (19)
 \end{aligned}$$

(16)、(18)、(19)式により求められた未知パラメータの推定値 $\hat{\alpha}(k)$ を用いて、環境によらず安定な力応答を得るために(20)式に示すようなゲイン調整を行う。同式において、 ω_n 、 ζ_n は所望とする力応答の固有振動数および減衰係数を表す。

$$M_{vn} = \hat{K}_e \omega_n^{-2}, \quad K_v = 2\zeta_n \sqrt{M_{vn} \hat{K}_e} - \hat{D}_e \quad (20)$$

図7は(20)式に基づいた適応型力コントローラの構成を表している。同図の力コントローラを用いることによって、作業環境の未知パラメータに依存しない力応答を得ることができる。

5. 実験結果

ここでは、図7の適応型力コントローラの有効性を確認するため、3自由度ダイレクトドライブマニピュレータを用いた力制御の実験結果を示す。

〈5・1〉 実験システム 実験で用いる3自由度多

図 8 3自由度ダイレクトドライブロボット

Fig. 8. 3-degrees-of-freedom robot.

 表 1 ダイレクトドライブモータの仕様
Table 1. Specification of DD motor.

items	unit	joint 1, 2	joint 3
encoder	p/r	$1,000 \times 2^{11}$	10×2^{16}
rated output	W	630	380
maximum torque	N.m	150	45
mass	kg	24	9.5

関節マニピュレータの模式図を図8に示す。マニピュレータの各関節の駆動には表1に示される仕様をもつダイレクトドライブモータが用いられている。また、マニピュレータの先端には外部との接触力を検出するための力センサが取付けられている。コントローラの計算はDSP（ディジタルシグナルプロセッサ： μ PD 77230）を用いて行っており、そのデータ信号の流れ図を図9に示す。コントローラのサンプリング周期は1msである。

〈5・2〉 ゲイン調整アルゴリズムの実行手順

図7に示した適応型の力コントローラにおいて、各パラメータのゲイン調整は図10に示す流れ図に従って行う。同図からわかるように、ゲイン調整の際のマニピュレータの安全を確保するため、パラメータ推定をオフラインで行っているが、DSPを用いることでオンライン調整も容易に行える。

ステップ①では、力制御開始後2秒間の力応答、位置および速度応答のデータをメモリに保存する。サンプリング周期は1msであるから、各応答とも2,000個のデータが保存される。ステップ②では、データ保存後、マニピュレータを安全地点（初期姿勢）へ退避させる。ステップ③では、保存されたデータからマニピュレータが接触している作業環境の未知パラメータ（ K_e , D_e ）を(17), (18)式を用いて同定する。パラメータ同定において必要な位置変位 x は作業対

 図 9 コントロールシステムの信号の流れ図
Fig. 9. Signal flow diagram of control system.

図 10 コントロールアルゴリズム実行の流れ図

Fig. 10. Signal flow diagram of control algorithm.

図 11 プログラム構成

Fig. 11. Program structure.

象物がマニピュレータに押されて生じる対象物表面の変位である。そのため、マニピュレータが最初に接触した地点（ステップ的な力指令を与える前の対象物の接触位置）を基準点とし、その基準点からのずれを位置変位とする。最後のステップ④では、求められた未知パラメータの推定値から(19)式に基づいて所望の力

表 2 同定された作業環境の未知パラメータ
Table 2. Identified parameters of environment.

対象物	スチフネス	粘性係数
木	$1.75 \times 10^5 \text{ N/m}$	$4.97 \times 10^3 \text{ Nsec/m}$
ゴム	$7.06 \times 10^4 \text{ N/m}$	$4.00 \times 10^3 \text{ Nsec/m}$

図 12 力制御実験結果 (PD コントロール)
Fig. 12. Experimental results (PD control).

図 13 力制御実験結果 (適応型コントロール)
Fig. 13. Experimental results (adaptive control).

応答を得るための M_{in} , K_v を決定する。上記の四つのステップが終了した後、再び力制御を開始する。

〈5・3〉 力制御実験結果 図 10 の流れ図に従って行った力制御の実験結果を示す。実験では、図 8 に示したマニピュレータを用い、 x 方向に力制御、 y 方向に位置制御を行っている。また、コントローラのメインプログラムの構成は図 11 のようになっている。

まず、二つの異なる対象物 (木およびゴム) に対して PD コントローラを用いて行った力制御の実験結果を図 12 に示す。同図からわかるように固定ゲインのままでは、固い対象物 (木) では力応答が振動的になっていることがわかる。

次に、図 7 に示した適応型の力コントローラを用いてパラメータ調整を行った場合の実験結果を図 13 に示す。同図より、作業環境に関係なく所望とする安定な力応答が得られていることがわかる。ここで、適応

図 14 同定された未知パラメータ
(作業対象物: 木)
Fig. 14. Identified parameters (wood).

図 15 同定された未知パラメータ
(作業対象物: ゴム)
Fig. 15. Identified parameters (rubber).

ゲイン行列の初期値を決定する β は 1.0×10^6 、忘却係数 μ は 0.999 とし、作業環境のスチフネスおよび粘性係数の初期値は各々 5.0×10^5 , 0.0 とした。また、力応答の固有振動数 ω_n および減衰係数 ζ_n は、60, 1.0 に設定した。同定されたパラメータを表 2 および図 14, 図 15 に示す。

適応型の力コントローラでは、PD コントロールに比べ力応答が多少遅れている。これは、目標応答特性の設定において ω_n を小さく、 ζ_n を大きくしているためであり、コントローラ自身の問題ではない。特に作業環境が木の場合には、PD コントロールによって得られた応答速度と同等の応答速度を得ようとする、速度フィードバックゲインを大きくする必要が生じ、速度信号に含まれるノイズの影響を強調してしまう結果となる (力センサの出力に含まれるノイズも含め、力コントローラ全体のノイズに対する感度に関係する)。そのため、ノイズによる微小振動が力応答に現れてしまう。このノイズによる微小振動を避けるため、適応型力コントローラでは目標応答速度を小さめに設定している。しかしながら、オーバーシュートのな

い所望とする力の応答特性が得られており、作業環境に関係なく常に安定な力応答を得るという本論文の目的は達成されているといえる。

6. む す び

本論文では、多自由度マニピュレータの力制御系に含まれる作業環境の未知パラメータを最小二乗法に基づいて推定し、推定したパラメータを用いてコントローラのゲイン調整を行うことで作業環境に依存しない適応型の力コントローラを実現した。本手法では、マニピュレータの各関節に外乱オブザーバが適用されているため、外乱の影響を受けることなしに作業空間上で力コントローラを構成することができ、パラメータ推定のアルゴリズムも容易に適用することができる。

提案する適応型力コントローラは、各関節の加速度コントローラが十分によく実現できていることが前提条件となっている。現段階では負荷の慣性がノミナル値に対して数十倍（この値はオブザーバに含まれるフィルタゲインおよび力コントローラのゲインに依存する）以上変動しなければ、加速度コントローラがよく実現できることが明らかにされており、通常の力制御においては本論文で提案した適応型力コントローラは有効に働くと考えられる。このことは、3自由度ダイレクトドライブマニピュレータを用いた実験により確かめられた。

加速度コントローラの限界あるいはそれに伴う力コントローラの安定解析については今後検討する予定である。

（平成4年1月16日受付，同4年6月11日再受付）

文 献

- (1) M. Brady, et al.: Robot Motion (1982) The MIT Press
- (2) R. P. Paul: Robot Manipulators (1981) The MIT Press
- (3) 駒田, 他: 「加速度に基づく多自由度ロボットの力フィードバック制御」, 電学論 D, 109, 325 (平成-5)
- (4) 加登, 他: 「パラメータ推定に基づいた自動ゲイン調整によるマニピュレータの力制御」, 電気学会, 産業計測制御研資, IIC-90-42 (平2)
- (5) T. Murakami, et al.: "Advanced Motion Control in Mechatronics-A Tutorial", IEEE. Workshop on Intelligent Motion Control, Vol. 1, SL 9-17 (1990)
- (6) J. J. Craig: Adaptive Control of Mechanical Manipulators (1988) ADDISON - WESLEY PUBLICATION COMPANY, New York
- (7) O. Khatib: "A Unified Approach For Motion and Force Control of Manipulators: The Operational Space Approach", IEEE, J. Robotics & Automation, RA-3, No. 1 (1987)

付 録

付表 1 記号表
app. Tabel 1. Nomenclature.

τ	: 関節空間でのトルクベクトル
q	: 関節空間での位置ベクトル
T_{dis}	: 関節空間での外乱トルクベクトル
T_{int}	: 関節空間での干渉トルクベクトル
T_{ext}	: 関節空間での反作用トルクベクトル
D	: 粘性トルク係数行列
f_c	: クーロン摩擦トルクベクトル
I_a	: トルク電流ベクトル
I_{cmp}	: 外乱トルクの補償電流ベクトル
I_b	: 関節空間での仮想慣性行列
J_n	: オブザーバのノミナルな慣性モーメントを対角要素にもつ対角行列
$J_{aco}(q)$	: ヤコビ行列
K_t	: トルク係数行列
$J(q)$	: 慣性行列
F	: 作業空間での力ベクトル
F^{res}	: 作業空間での反作用力ベクトル
M_v	: 作業空間での等価質量行列
M_{vn}	: 作業空間での任意の等価質量行列
x	: 作業空間での位置ベクトル
K_e	: 作業空間でのスチフネス行列
D_e	: 作業空間の粘性係数行列
K_v	: 速度フィードバックゲイン行列
S	: 対角要素にラプラス演算子をもつ対角行列
下添字 i	: 関節の番号
上添字 cmd	: モーションの指令ベクトル
上添字 ref	: 制御系への指令ベクトル
上添字 T	: 行列の転置

村 上 俊 之 (正員)

昭和40年10月5日生。平成5年3月慶應義塾大学大学院後期博士課程修了。同年4月同大学理工学部電気工学科助手。工学博士。現在、ロボットおよびモーションコントロールに関する研究に従事。

大 西 公 平 (正員)

昭和27年7月25日生。55年東京大学大学院博士課程修了。現在、慶應義塾大学理工学部電気工学科助教授。工学博士。