学術論文

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

吉川 恒夫*¹ 細田 耕*² 土井 利次*³ 村上 弘記*⁴

Dynamic Trajectory Tracking Control of Flexible Manipulator by Macro-Micro Manipulator System

Tsuneo Yoshikawa*¹, Koh Hosoda*², Toshitsugu Doi*³ and Hiroki Murakami*⁴

In this paper, a dynamic trajectory tracking controller for a macro-micro manipulator system is proposed, in which the dynamics of the system is considered. The macro-micro manipulator system is a system consisting of a wide-range, low-response manipulator as a macro part, and a narrow-range, high-response micro part at the tip of the macro part. When the proposed scheme is applied to the system, the macro part is controlled by PD feedback controller for each joint, while the micro part is controlled to track the desired trajectory considering the dynamics of the whole system. An experimental result demonstrates the effectiveness of the proposed control scheme.

Key Words: Macro-Micro Manipulator System, Flexible Manipulator, Dynamic Trajectory Tracking Control

1. はじめに

現在、宇宙用のマニピュレータなどでは長腕化や軽量化に伴い、アーム剛性の低下により生じる振動や負荷に対するたわみが問題となっている。また、産業用のマニピュレータに関しても高速で作業させる場合や負荷が大きい場合にはアームに弾性変位が生じる。このような柔軟なアーム(フレキシブルアーム)の場合には弾性変位のため手先の位置や姿勢が関節変位のみによっては一意に定まらない。この点がフレキシブルアームを用いて高速で高精度な作業を行わせることを困難にする要因となっている。

フレキシブルアームの軌道制御に関する研究は準静的に制御する方法[1]や動特性まで考慮にいたれた方法[2]~[7]が提案されている。しかし準静的に制御する方法は高速で位置決め制御を行うと予期せぬ振動が生じる可能性がある。また動特性まで考慮にいたれた制御は、柔軟なアームに軌道制御という困難な作業を実現させようとしているために、制御方略が複雑で実時間で軌道制御を実現することは困難である。

一方、実際のフレキシブルアームの場合、長尺、柔軟なアームの先端に軽量、高剛性の小さなアーム(例えば、剛性の高い手首など)がついているようなケースがあると考えられる。こ

のようなケースは、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部と、その先端に付いた可動範囲は小さいが高速で高精度な動きの可能な剛体アームとみなせるマイクロ部よりなるシステム(マクロ・マイクロシステムと呼ぶ)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手先が対象物に加える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に対し、マクロアーム、マイクロアームに異なる制御則を適用することによりそれぞれのアームに対する作業を分担し、これによってフレキシブルアームのみでは困難な軌道制御系を簡単な制御則で実現できる可能性がある。

剛体リンクのみからなるマクロ・マイクロマニピュレータシステムに対しては Khatib[8]や Hogan ら[9]の研究がある。また、フレキシブルアームの手先にマイクロマニピュレータを取り付けたシステムは、宇宙ステーション日本実験モジュール(JEM)用のマニピュレータ[10]や、高所における高圧電線修理用のロボットなどで開発されている。小山ら[11]は柔軟な1リンクのアームの先端部にピエゾアクチュエータを取り付けてシステムの先端位置の制御することを提案、システムの安定性について述べており、これもマクロ・マイクロシステムの一例であると考えられる。しかしいずれにおいても軌道制御についての考察はなされていない。

筆者らはマクロ・マイクロシステムのマクロ部、マイクロ部の可動範囲や運動速度の違いに注目し、フレキシブルアームの軌道制御を実現するために用いることを提案した[12]。この論文[12]ではシステム全体の冗長性を考慮した準静的な軌道計画と軌道制御を提案したが、この方法ではマイクロ部の動作に伴

原稿受付 1993年2月3日

*¹ 京都大学工学部

*² 大阪大学工学部

*³ 東芝株式会社

*⁴ 石川島播磨重工業株式会社

*¹ Faculty of Engineering, Kyoto University

*² Faculty of Engineering, Osaka University

*³ Toshiba Corporation

*⁴ Ishikawajima-Harima Heavy Industries Corporation

いシステムにかかる反力が考慮されていないため、マイクロ部が高速な動作をする場合などマイクロ部の動特性を無視できない動きをするときには制御性能が劣化する。

本論文ではフレキシブルアームの軌道制御を実現するためにマクロ・マイクロシステムを用い、その制御系としてシステムの動特性を考慮にいたれた動的軌道制御系を提案する。まず、マクロ・マイクロシステムの運動学的関係と運動方程式より作業座標系において与えられた軌道に対し、それを実現する駆動トルクが求められることを示す。次にこの式を使った動的軌道制御系を構成する方法について述べる。最後に提案した方法の有効性を実験により検証する。

2. マクロ・マイクロシステムによる動的軌道制御

2.1 システムの運動学

本節ではマクロ部として柔軟なアームを用いた場合のマクロ・マイクロシステムの運動学的関係について述べる。

n 次元の手先作業変位をベクトル $\mathbf{p}(\in \mathbb{R}^n)$ で表す。またマクロ部の関節変位を $\boldsymbol{\theta}_M(\in \mathbb{R}^4)$ で、マイクロ部のそれを $\boldsymbol{\theta}_m(\in \mathbb{R}^4)$ で表す。ここで、 λ はそれぞれマクロ部、マイクロ部の自由度である。マクロ部に存在する弾性変位については、これを記述するような一般化座標を要素とするベクトル $\mathbf{e}(\in \mathbb{R}^q)$ で表すものとする。例えば各リンクのモデルとして偏微分方程式を用いる場合は各モードの大きさを表す一般化座標であり、3次元ばね・質量モデル[13]を用いる場合には各リンク先端の変位、変位角である。

手先作業変位 $\mathbf{p}$ は関節変位 $\boldsymbol{\theta}_M$, $\boldsymbol{\theta}_m$ 及び $\mathbf{e}$ の非線形関数となる。これを

$$\mathbf{p} = \mathbf{f}(\boldsymbol{\theta}_M, \boldsymbol{\theta}_m, \mathbf{e}) \quad (1)$$

とおく。式(1)を時間微分して手先作業変位速度と関節速度の間の関係式

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{J}_M \dot{\boldsymbol{\theta}}_M + \mathbf{J}_m \dot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{J}_e \dot{\mathbf{e}} \quad (2)$$

を得る。ただし、 $\mathbf{J}_e(\in \mathbb{R}^{n \times q})$, $\mathbf{J}_M(\in \mathbb{R}^{n \times 4})$, $\mathbf{J}_m(\in \mathbb{R}^{n \times 4})$ はそれぞれ $\mathbf{f}$ の $\mathbf{e}$, $\boldsymbol{\theta}_M$, $\boldsymbol{\theta}_m$ に関するヤコビ行列である。 $\mathbf{J}_M$, $\mathbf{J}_m$, $\mathbf{J}_e$ をまとめて、

$$\mathbf{J} = [\mathbf{J}_M : \mathbf{J}_m : \mathbf{J}_e] \quad (3)$$

と記述すると、この $\mathbf{J}(\in \mathbb{R}^{n \times (4+\lambda+q)})$ を用いて式(2)は、

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{J} [\dot{\boldsymbol{\theta}}_M^T \dot{\boldsymbol{\theta}}_m^T \dot{\mathbf{e}}^T]^T \quad (4)$$

と表せる。これをさらに時間微分して加速度の関係

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{p}} &= \mathbf{J} [\ddot{\boldsymbol{\theta}}_M^T \ddot{\boldsymbol{\theta}}_m^T \ddot{\mathbf{e}}^T]^T + \dot{\mathbf{J}} [\dot{\boldsymbol{\theta}}_M^T \dot{\boldsymbol{\theta}}_m^T \dot{\mathbf{e}}^T]^T \\ &\triangleq \mathbf{J} [\ddot{\boldsymbol{\theta}}_M^T \ddot{\boldsymbol{\theta}}_m^T \ddot{\mathbf{e}}^T]^T + \mathbf{a} \end{aligned} \quad (5)$$

を得る。

2.2 手先加速度と駆動入力の関係

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。

$$\mathbf{M} \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\theta}}_M \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}}_m \\ \ddot{\mathbf{e}} \end{bmatrix} + \mathbf{h} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_\lambda \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_M + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{E}_\lambda \\ 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_m \quad (6)$$

ここで $\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}_M, \boldsymbol{\theta}_m, \mathbf{e})$ は慣性行列、 $\mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}_M, \boldsymbol{\theta}_m, \mathbf{e}, \dot{\boldsymbol{\theta}}_M, \dot{\boldsymbol{\theta}}_m, \dot{\mathbf{e}})$ は遠心力、コリオリ力、重力などの非線形項及び柔軟性による弾性力の項である。また $\boldsymbol{\tau}_M$, $\boldsymbol{\tau}_m$ はそれぞれマクロ部、マイクロ部

の駆動入力であり、 $\mathbf{E}_i$ は $i \times i$ の単位行列である。慣性行列 $\mathbf{M}$ が逆行列を持つとき、式(6)は

$$\begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\theta}}_M \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}}_m \\ \ddot{\mathbf{e}} \end{bmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_\lambda \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_M + \mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{E}_\lambda \\ 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_m - \mathbf{M}^{-1} \mathbf{h} \quad (7)$$

と変形することができる。式(7)の両辺に左から $\mathbf{J}$ をかけ、式(5)を用いると、手先作業変位の加速度と駆動入力との関係式

$$\ddot{\mathbf{p}} = \mathbf{N}_M \boldsymbol{\tau}_M + \mathbf{N}_m \boldsymbol{\tau}_m - \mathbf{J} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{h} + \mathbf{a} \quad (8)$$

を求めることができる。ただし、

$$\begin{aligned} \mathbf{N}_M &= \mathbf{J} \mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_\lambda \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{N}_m &= \mathbf{J} \mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{E}_\lambda \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

である。

2.3 動的軌道制御系

前節で求めた関係式をもとにマクロ・マイクロシステムの動的軌道制御系を構成する。

マクロ部は長尺でアーム自体に柔軟性を持っており、駆動のためのエネルギーコストもかかるので複雑な制御を適用して高精度を実現するような制御を適用することが難しい。マクロ・マイクロシステムを用いる場合には、その特徴を生かしマクロ部は大まかな位置決めをするだけにとどめることとした簡単な制御が有効であると考えられるので、ここでは各軸について次のような PD 制御を用いることにする。

$$\boldsymbol{\tau}_M = \mathbf{K}_{PM}(\boldsymbol{\theta}_{Md} - \boldsymbol{\theta}_M) + \mathbf{K}_{VM}(\dot{\boldsymbol{\theta}}_{Md} - \dot{\boldsymbol{\theta}}_M) \quad (9)$$

ここで $\mathbf{K}_{PM}$, $\mathbf{K}_{VM}$ は各軸の位置、速度ゲインを示す対角行列、 $\boldsymbol{\theta}_{Md}$, $\dot{\boldsymbol{\theta}}_{Md}$ は手先軌道制御を実現させるのに適当なマクロ部の各関節に対する目標値、目標速度で、マクロ・マイクロシステムの可補償性極大化などの指針に沿って、軌道計画により $\mathbf{p}$, $\dot{\mathbf{p}}$ から計算されるものである[12]、これにより制御則自体の簡便さに加え、各軸のフィードバック情報は各々の軸自体にのみ返されるのでノンコローケーションフィードバックを避けることになり安定性が増すと考えられる。

これに対しマイクロ部には、手先に生じた誤差を補償するような制御則を適用する。式(8)より、

$$\text{rank}(\mathbf{N}_m) = n \quad (10)$$

であるときには新たな入力を $\mathbf{u}_m$ として、マイクロ部に対する駆動入力 $\boldsymbol{\tau}_m$ を

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_m &= \mathbf{N}_m^+(\mathbf{u}_m - \mathbf{N}_M \boldsymbol{\tau}_M + \mathbf{J} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{h} - \mathbf{a}) \\ &\quad + (\mathbf{E}_\lambda - \mathbf{N}_m + \mathbf{N}_m) \mathbf{k} \end{aligned} \quad (11)$$

ととることにより、閉ループ系を

$$\ddot{\mathbf{p}} = \mathbf{u}_m \quad (12)$$

という線形非干渉な系にすることができる。ここで、 $\mathbf{A}^+$ は行列 $\mathbf{A}$ の一般化逆行列を表し、 $\mathbf{k}$ は冗長性を表す任意ベクトルである。一般にはマイクロ部の自由度 λ は手先作業座標系のそれ n と同じであり、この場合 $\mathbf{N}_m^+ = \mathbf{N}_m^{-1}$ であるから式(11)より、

Fig. 1 Dynamic trajectory tracking controller for macro-micro system

$$\tau_m = N_m^{-1}(u_m - N_m \tau_m + J M^{-1} h - a) \quad (13)$$

となる。マイクロアー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作業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、作業座標系でのサーボ系を構成する。

$$u_m = \ddot{p}_d + K_{vm}(\dot{p}_d - \dot{p}) + K_{pm}(p_d - p) \quad (14)$$

ここで K_{pm} , K_{vm} はそれぞれ手先作業座標系での位置速度に関するフィードバックゲインである。式(9)(13)(14)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 (Fig. 1)。

3. 実験

本章では前章で求めたマクロ・マイクロシステムの動的軌道制御系の有効性を検証するために実験を行う。

3.1 対象とするロボット

実験の対象として Fig. 2 に示すようなマクロ・マイクロシステムを取り扱う。このシステムは、マクロ部として柔軟な2つのリンクを持つ2自由度のフレキシブルアームを、またマイクロ部として回転1軸と直動1軸を持つ2自由度アームを持つ。各関節変位と弾性変位、弾性変位角を図中のように定める。このシステムのパラメータを Table 1 に示す。マクロ部の各関節はDCサーボモータをハーモニックドライブ減速したものを用い、減速比は第M1関節、第M2関節共に1:100となっている。また、マイクロ部の各関節はDCモータで駆動され、ギヤにより減速されている。減速比は第m1軸について1:2、第m2軸について1:3であり、これを差動機構を用いることにより回転と直動の運動に変換している。

このシステムに対する制御装置の構成を Fig. 3 に示す。各関節には光学式エンコーダが装備されており、その信号をカウンタを通してホストコンピュータに取り込むことにより各関節変位を測定できる。文献[13]で、柔軟リンクの手先の負荷がリンクの自重に比べて大きいときの加速度センサによる弾性変位の測定について述べている。これを用いると各柔軟リンクの先端に取り付けた加速度センサによって、その信号をA/Dボードを介して取り込むことにより各リンクの柔軟変位を測定することができる。関節変位速度、弾性変位速度は、変位をサン

Table 1 Parameters of links

item	link 1	link 2
length [m]	0.724	0.725
diameter [m]	0.013	0.010
bending rigidity [N·m ²]	289	101
mass of end-tip [Kg]	4.10	1.50
inertia of end-tip [Kg·m ²]	1.73×10^{-2}	2.22×10^{-3}

(a) Parameters of Macro Manipulator

item	link 3	link 4
length [m]	0.100	0.100
mass [Kg]	0.100	0.100
center of gravity [m]	0.050	0.050

(b) Parameters of Micro Manipulator

(a) Photo of macro-micro system

(b) Variables of the system

Fig. 2 Macro-micro manipulator system used for experiment

Fig. 3 Construction of controller

リング時間ごとに差分することにより得る。また、ホストコンピュータにより計算された各関節への駆動力は D/A ボードを介してアンプに供給され、各関節を駆動する。ホストコンピュータとして日本電気製 PC-9801 DA に数値演算プロセッサ 80387 を搭載したものをを用い、また中部電機製 DSP ボード (CPU: TMS 320 C 30) を計算支援用に用いている。

3.2 実験計画及び実験結果

目標軌道 p は始点を $[0.947, -0.153]$ として 3.5 秒で中心 $[0.947, -0.003]$ 、直径 $0.30[m]$ の円を描くような軌道を与える。軌道は速度台形則に従って与えるものとし、1.05 秒加速した後 1.4 秒等速運動をし、1.05 秒減速するものとする。

式 (9) に与えるマクロ部関節の目標軌道 θ_{Md} を手先軌道から求めなければならない。この関節軌道の目標値については文献 [12] に基づいて可補償度を大きくするような軌道を計画することにする。計画された軌道を Fig. 4 に示す。図は 0.4 秒ごとのロボットのコンフィギュレーションを示し、目標軌道は円軌道上を反時計回りに回転する。

以下のような実験を行い、その結果を比較する。

- (I) マクロ・マイクロシステムによる動的軌道制御を適用した場合。
- (II) マクロ・マイクロシステムによる準静的軌道制御を適用した場合 [12]。
- (III) マイクロ部を取り外して等価な質量を持つ先端負荷を付け、マクロ部のみの構造としてその各軸に PD 制御を適用した場合。

マクロ部のフレキシブルアームの各軸 PD 制御のゲインは第 1 関節について $K_{pM1}=7.0 \times 10^3 [N \cdot m / rad]$, $K_{vM1}=4.0 \times 10 [N \cdot m \cdot sec / rad]$, 第 2 関節について $K_{pM2}=6.0 \times 10^3 [N \cdot m / rad]$, $K_{vM2}=4.0 \times 10 [N \cdot m \cdot sec / rad]$ とし、これは制御則 (I) (II) (III) に共通であるとしている。制御則 (I) において式 (14) で示されている手先サーボのゲインは、各ゲイン行列を対角行列とし、 x 軸方向について、位置ゲインを $K_{pmx} =$

Fig. 4 Planned trajectory

(I) Dynamic control by macro-micro system

(II) Quasi-static control by macro-micro system

(III) PD control by macro manipulator

Fig. 5 Experimental result

$2.0 \times 10^{-3} [\text{sec}^{-2}]$, 速度ゲインを $K_{v_{mx}} = 1.5 \times 10 [\text{sec}^{-1}]$ と与え, y 軸方向については位置ゲインを $K_{p_{my}} = 1.8 \times 10^3 [\text{sec}^{-2}]$, 速度ゲインを $K_{v_{my}} = 1.5 \times 10 [\text{sec}^{-1}]$ と与えた. また制御則 (I) に用いるフレキシブルアームの動特性のモデルとしては, ばね質量モデル [13] を用いた. 制御則 (II) でのマイクロアームに関する各軸 PD フィードバックゲインは第 3 関節の位置ゲインを $6.0 \times 10^{-1} [\text{N} \cdot \text{m/rad}]$, 速度ゲインを $2.0 \times 10^{-3} [\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{sec/rad}]$ と, 第 4 関節の位置ゲインを $2.0 \times 10^{-1} [\text{N} \cdot \text{m/rad}]$, 速度ゲインを $7.0 \times 10^{-4} [\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{sec/rad}]$ と与えた. なお, サンプルングタイムは各制御ともに 3 msec とした.

結果を Fig. 5 に示す. Fig. 5 は 3.5 秒後までの手先軌道の目標値からの偏差 $p - p_d$ を図示したものである. ケース (I) (II) (III) の順に誤差が大きくなっていることが分かる. ケース (II) はケース (I) に比べ, アームの動特性を考慮に入れていないために, マイクロ部が補償動作を行ったことによる反力が予期せぬ外乱となり, そのために精度が落ちるものと考えられる. またケース (III) は, マイクロ部を取り外し, 等価な質量を持つ負荷を取り付けた場合の結果を示すことによって, マイクロ部を取り付けたことによる補償動作の有効性を示している. 以上より, マクロ・マイクロシステムによる動的軌道制御の有効性が示された.

4. お わ り に

本論文ではフレキシブルアームの軌道制御を実現するためにマクロ・マイクロシステムを用い, その制御系としてアームの動特性を考慮にいたれた動的軌道制御系を提案した. システムの運動学的関係と運動方程式より作業座標系において与えられた軌道に対し, それを実現する駆動トルクが求められることを示し, これに基づいて動的軌道制御系を構成した. 最後に提案した方法の有効性を実験により検証した.

参 考 文 献

- [1] 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. 20-30, 1988.
- [2] 浅田, 馬: “フレキシブルアームの軌道制御と逆動力学”, 日本ロボット学会誌, vol. 6, no. 5, pp. 448-454, 1988.
- [3] B. Siciliano and W. J. Book: “A singular perturbation approach to control of lightweight flexible manipulators,” Int. J. of Robotics Research, vol. 7, no. 4, pp. 79-90, 1988.
- [4] E. Bayo et al: “Inverse dynamics and kinematics of multilink elastic robots: an interactive frequency domain approach,” Int. J. of Robotics Research, vol. 8 no. 6, pp. 49-62, 1989.
- [5] A. De Luca, P. Lucibello and G. Ulivi: “Inversion techniques for trajectory control of flexible robot arms,” J. of Robotic Systems, vol. 6 no. 4, pp. 325-344, 1989.
- [6] F. Matsuno and Y. Sakawa: “A Simple model of flexible manipulators with six axes and vibration control by using accelerometers,” J. of Robotic Systems, vol. 7 no. 4, pp. 575-597, 1990.
- [7] 細田, 吉川, “n 自由度フレキシブルアームの逆動力学”, 日本ロボット学会第 9 回学術講演会予稿集, pp. 435-438, 1991.
- [8] O. Khatib, “Reduced effective inertia in macro-/mini-manipulator systems,” 1989 Japan-U. S. A. Symposium on Flexible Automation, pp. 329-334, 1989.
- [9] N. Hogan, A. Sharon and E. D. Hardt, “High band-width force regulation and inertia reduction using a macro/micro manipulator system,” IEEE Proc. Robotics and Automation, pp. 126-132, 1988.
- [10] 倉岡他: “日本実験モジュールマニピュレータ系のシステム検討”, 第 3 回宇宙ステーション講演会 (日本航空宇宙学会), 1987.
- [11] 小山, 浅田: “高速高精度デュアルアクチュエーションシステムの設計と制御”, 日本ロボット学会第 9 回学術講演会予稿集, pp. 31-32, 1991.
- [12] 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.
- [13] 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) ロボット工学およ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, IEEE などの会員.

(日本ロボット学会正会員)

土井利次 (Toshitsugu Doi)

1966 年 11 月 7 日生. 1990 年京都大学工学部精密工学科卒業. 1992 年京都大学工学研究科応用システム科学専攻修士課程修了. 同年東芝 (株) 入社, 現在に至る. 存学中マクロ・マイクロシステムの研究に従事.

(日本ロボット学会正会員)

細田 耕 (Koh Hosoda)

1965 年 11 月 9 日. 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)

村上弘記 (Hiroki Murakami)

1961 年 8 月 1 日生. 1985 年京都大学工学部精密工学科卒業. 1987 年京都大学工学研究科精密工学専攻修士課程修了. 同年石川島播磨重工業 (株) 入社, 現在に至る. この間 (1988~9) 京都大学受託研究員. ロボット工学の研究に従事. システム制御情報学会, 計測自動制御学会の会員.

(日本ロボット学会正会員)