慣性駆動型マイクロマニピュレータの機構と駆動方法

正員 光本直樹 ((株) デンソー) 正員 金山齊 ((株) デンソー)
正員 井戸垣孝治 ((株) デンソー) 正員 服部正 ((株) デンソー)

Mechanism and Driving Method of Inertial Driven Micromanipulator

Naoki MITSUMOTO, Hitoshi KANAYAMA, Takaharu IDOGAKI, Tadashi HATTORI
(DENSO CORPORATION)

This paper presents a mechanism and driving method of an Inertial Driven Micromanipulator. This micromanipulator utilizes our proposed Bending and Expanding Motion Actuator (BEMA). It provides both fine and coarse motion. Static bending and expanding motion of the BEMA realizes the flexible fine motion, and dynamic motion of the BEMA realizes the coarse motion. Thus, our micromanipulator has a wide dynamic range (± 90 degree) and a high resolution (less than 10nm) with a simple mechanism. And this paper proposes fundamental principle of driving method for high speed motion. That is, controlling the impact timing against vibration of ineratal mass realizes the high speed motion of micromanipulator. We tested this driving method by experiment and simulation of sawtooth wave drive and pulse wave drive. And the results of it, new sawtooth wave driving method with controll of impact timing gives 2.0 times of motion speed than conventional method(without control of impact timing). Furthermore, new pulse wave driving method with controll of impact timing gives 5 times motion speed than conventional method.

キーワード：マイクロマニピュレータ，マイクロマシン，慣性駆動，インパクト駆動，伸縮屈曲アクチュエータ，圧電素子，微動動作，粗動動作

1. まえがき

現在，メカトロニクスの分野では，システムの微小化，集積化，知能化が進められており，その実現に向けてアクチュエータ，センサ，プロセス，制御，解析の研究が総合的に行われている。メカトロニクスの高度化は，自動車，情報通信，家電に代表される産業分野の活性化，および医療，流通に代表される社会構造に革新をもたらすものとして期待されている。このような現状のもとマイクロマシン技術は，メカトロニクスの高度化を支える基盤技術として重要な役割を担っている。特にエレクトロニクス，メカニクスの微小化，集積化は重要な研究課題であり，その実現のためには，シリコンプロセスに代表されるプロセス技術と共に，微小部品の運搬，組付け，加工を行うマイクロマニピュレーション技術の重要性が高まることが予想される。

現在のマイクロマニピュレーション技術の研究は，主として医療，ライフサイエンス，材料科学，および微細形状の創成を主なターゲットとしており^{[1]~[7]}，ナノメートルあるいは，サブナノメートルの精度で微細作業ができるマイクロマニピュレータの設計，開発が進んでいる。このような分野においては正確に高精度操作ができるマイクロマニピュレータが第一に要求される。一方，メカトロニクス

の小型化，高度化のためには高い精度とともに，広可動範囲，高速，高トルクといった運動能力を合わせ持つマニピュレータが要求される。しかしながらこれまでは，高精度動作で可動範囲の広いマイクロマニピュレータの研究例はなかった。

この問題に対して本論文では図1に示すマイクロマニピュレータのための回転移動機構として『慣性駆動型マイクロマニピュレータ』を提案する。慣性駆動を用いた回転移動機構^{[8][9]}は，従来複数のアクチュエータから構成されていたため小型化に適さなかった。一方，本マニピュレータ

図1 慣性駆動型マイクロマニピュレータ
Fig.1 Inertial Driven Micromanipulator

では、我々が提案している「伸縮屈曲アクチュエータ (Bending and Expanding Motion Actuator: 以下BEMA)」¹¹⁰⁾を用いることにより、単一のアクチュエータのみで回転移動機構を構成している。本マニピュレータはBEMAの駆動モードを変えることにより、微動動作(分解能10nm以下)と粗動動作(可動範囲 $\pm 90^\circ$)が実現できる。そこで本論文では、提案する慣性駆動型マイクロマニピュレータの機構、動作特性とともに、その高速運動を実現するための駆動方法を述べる。

2. 慣性駆動型マイクロマニピュレータの構成

図2にマニピュレータの構成を示す。図のBEMAは、我々が以前より提案している伸縮屈曲アクチュエータである。マニピュレータは下から順にエンドエフェクタ、アクチュエータ(BEMA)、リンク、回転ジョイント、および回転ジョイントに摩擦力を印可するためのスプリングから構成される。質量は50.0gである。リンクの自由度は回転ジョイントの形状により決定されるが、本機構では制御が容易であるという理由から円筒形状を採用している。そのため、リンクは回転1自由度の運動が可能である。

本マニピュレータの構成において重要となるのがBEMAである。BEMAはバイモルフを多層積層した構造になっている。図3に各層の構造を示す。各層は図3左に示す3分割ユニモルフ(電極を3分割したPZTをメタルに張り付け

図2 慣性駆動型マイクロマニピュレータの構成
Fig.2 Structure of Inertial Driven Micromanipulator

図3 3分割ユニモルフとバイモルフの構造
Fig.3 Structure of 3-sectioned unimorph and bimorph

た構造)を、向かい合わせに張り付けたバイモルフ構造(図3右)になっている。3分割されたPZTには、それぞれ独立に電圧を印可できる構造になっている。そのため図3右のバイモルフ構造は印可電圧パターンにより伸縮動作、屈曲動作が可能である。さらに図4に示す積層構造は伸縮・屈曲動作の拡大機構として作用する。本慣性駆動型マイクロマニピュレータにおいては3層構造のBEMAを使っている。このBEMAの駆動方法を変化させることにより、マニピュレータの微動動作と粗動動作が実現できる。BEMAの静的変位は微動動作を実現し、BEMAの動的変位は粗動動作を実現する。粗動動作を実現する動作メカニズムを本論文では「慣性駆動機構」と呼ぶ。

3. 微動動作メカニズムと動作特性

加速を伴わないBEMAの静的な伸縮・屈曲動作は微動動作を実現する。BEMAの電極分割パターンとXY軸との関係を図5左のように設定したとき、電極1, 2, 3への電圧印可パターン(ON,OFFの組み合わせ)を様々に変えたときの、エンドエフェクタ先端位置の軌跡は図5右のようになる。このようにBEMAの伸縮・屈曲動作により、本マニピュレータは多自由度な微動動作を実現する。図6は印可電圧と屈曲角度 θ との関係を示す。このときのIDMの分解能は10nm以下であった。

図4 BEMA(伸縮屈曲アクチュエータ)の構造
Fig.4 Structure of BEMA

図5 微動動作時の運動軌跡
Fig.5 Trajectory of Fine Motion

図6 微動動作時の印過電圧一屈曲角度特性
Fig.6 Voltage vs. Bending Angle for Fine Motion

図7 直動型慣性移動機構の原理
Fig.7 Principle of Linear Motion Mechanism

図8 慣性駆動型マイクロマニピュレータの動作原理
Fig.8 Motion Principle of Inertial Driven Micromanipulator

4. 粗動動作

粗動動作は、BEMAの低速変形と急速変形を組み合わせた慣性駆動により実現できる。本章では、粗動動作の動作メカニズム、数学モデル、および各種駆動波形について行った動作特性の実験結果を示す。

<4.1> 粗動動作メカニズム 提案する回転移動機構は、図7の直動型の慣性移動機構をもとにしている。図7の構成は(1)アクチュエータ、(2)移動体M、(3)慣性体mからなり、アクチュエータはバネ弾性を持つ。本直動機構の基本的な駆動方法を図7に従い説明する。 F_f 、 F_i はそれぞれ、移動体Mに働く摩擦力、慣性体mに働く慣性力を表し、各状態における運動方向は2力のバランスで決定される。Normal Stateはaに電圧が印加されていない状態を表す。

状態1：初期状態を示す（電圧印加による静止伸び状態）

状態2：aの急速復帰により移動体Mが右に δ_1 移動する

状態3：低速伸ばしの間、mが振動運動をする

状態4：mの振動にタイミングを合わせた急速復帰により、移動体Mが右に δ_2 （ $\delta_1 < \delta_2$ ）移動する

本駆動法の特徴は、状態4に示したように、mの振動運動を利用した慣性駆動を行うことであり、これにより振動を利用しない通常の慣性駆動（状態2）よりも移動量を大きくすることを狙っている。また文献[6]記載のSudden Stopによる移動も可能であるが、本機構においてはその効果が小さいため、Sudden Stop動作は省いてある。

図8の回転移動機構は、図7の構成を応用することにより実現できる。これは直動型移動機構と同様に、(1)アクチュエータa（BEMA）、(2)移動体M（回転ジョイントとリンクから構成）、(3)慣性体m、から構成される。本構成の特徴は、バネ弾性を持つ伸縮屈曲アクチュエータBEMAを介して、慣性体と移動体を回転可能な構成に結合していることである。 F_f 、 F_i はそれぞれジョイント表面に働く静止摩擦力、慣性体mに働く慣性力 F_i を表し、各状態における運動方向は2力のバランスで決定される。図8に

従い、移動原理を説明する。

状態1：初期状態を示す（電圧印加による静止屈曲状態）

状態2：aの急速復帰により移動体Mが θ_1 回転する

状態3：低速屈曲の間、慣性体mが振動運動をする

状態4：mの振動にタイミングを合わせた急速復帰により、移動体Mが θ_2 ($\theta_1 < \theta_2$) 回転する

直動駆動機構の場合と同様に、本駆動法の特徴は、mの振動運動を利用した慣性駆動を行うことであり、これにより振動を利用しない通常の慣性駆動よりも移動量を大きくすることを狙っている。

<4.2> 粗動動作シミュレーション 前節の動作メカニズムの妥当性を検証するために、動作シミュレーションを行う。図9にマニピュレータの数学モデルを示す。アクチュエータ（BEMA）は簡単化のために、ヒンジを回転軸としバネ（バネ定数k）とダンパ（減衰係数 λ ）で上部と下部が結合されたモデルを仮定する。ここでアクチュエータは印可電圧に対して自由長（印可電圧のみにより変位させられたアクチュエータの長さ）が $\delta(t)$ だけ変化するバネとする。マニピュレータはヒンジにより2つの剛体Ue(Upper

Element)とLe(Lower Element)が結合されたモデルとして仮定する。回転ジョイントの軸中心はX,Y軸方向に固定されており、回転ジョイントはプレートから押しつけ力F(N)を受けるものとする。

このときマニピュレータの動力学方程式はラグランジュ方程式を用いて（1）（2）式のように導かれる。また（3）（4）式により、回転ジョイントとプレートとの間のスティ

$$A_1\ddot{\theta}_1 + A_2\ddot{\theta}_2 + A_3(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) + A_4(\theta_2 - \theta_1) + A_5 + A_6 = A_7 \quad \dots \dots (1)$$

$$D_1\ddot{\theta}_1 + D_2\ddot{\theta}_2 + D_3(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) + D_4(\theta_2 - \theta_1) + D_5 + D_6 = 0 \quad \dots \dots (2)$$

$$\text{if } \dot{\theta}_1 = 0 \text{ and } G \leq \mu_0 Fr \\ \text{then } \ddot{\theta}_1 = 0 \quad \dots \dots (3)$$

$$G = A_7 - A_2\ddot{\theta}_2 - A_3(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) - A_4(\theta_2 - \theta_1) - A_5 - A_6 \quad \dots \dots (4)$$

$$\begin{aligned} A_1 &= J_1 + m_2 s^2 & D_1 &= m_2 h_2 s \\ A_2 &= m_2 s h_2^2 & D_2 &= J_2 \\ A_3 &= -\lambda d^2 & D_3 &= -A_3 \\ A_4 &= -k d^2 & D_4 &= -A_4 \\ A_5 &= (m_1 h_1 + m_2 s) g \sin \theta_1 & D_5 &= m_2 g h_2 \sin \theta_2 \\ A_6 &= k d \delta(t) & D_6 &= -A_6 \\ A_7 &= -\text{sign}(\dot{\theta}_1) \mu Fr & & \dots \dots (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k &= 2.7 \times 10^3 \text{ [N/m]} & h_1 &= 5.67 \times 10^{-3} \text{ [m]} \\ \lambda &= 0.3 \text{ [N} \cdot \text{s/m]} & h_2 &= 6.65 \times 10^{-3} \text{ [m]} \\ g &= 9.8 \text{ [m/sec}^2\text{]} & m_1 &= 2.52 \times 10^{-3} \text{ [kg]} \\ F &= 0.3 \text{ [N]} & m_2 &= 0.7 \times 10^{-3} \text{ [kg]} \\ \mu &= 0.9 & \mu_0 &= 0.8 \\ J_1 &= 1.95 \times 10^{-7} \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]} & & \\ J_2 &= 0.81 \times 10^{-7} \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]} & & \dots \dots (6) \end{aligned}$$

rc_1 : Upper Element(Ue)の回転軸
 rc_2 : Lower Element(Le)の回転軸
 G_1 : Ue の重心
 G_2 : Le の重心
 h_1 : $rc_1 - G_1$ 間距離
 h_2 : $rc_2 - G_2$ 間距離
 s : $rc_1 - rc_2$ 間距離
 r : 回転ジョイントの半径
 d : 伸縮・屈曲アクチュエータ (BEMA) の直径
 F : 回転ジョイントが受ける鉛直下向き力
 μ, μ_0 : プレートと回転ジョイント間の動摩擦係数, 静止摩擦係数

I_1 : Ue の G_1 回りのイナーシャ
 I_2 : Le の G_2 回りのイナーシャ
 J_1 : Ue の rc_1 回りのイナーシャ
 J_2 : Le の rc_2 回りのイナーシャ
 m_1 : Ue の質量
 m_2 : Le の質量

図9 慣性駆動型マイクロマニピュレータの数学モデル
 Fig.9 Mathematical Model of the Inertial Driven Micromanipulator

図10 マニピュレータ運動シミュレーション
 Fig.10 Simulated Motion Trajectory of Manipulation

ックスリップ現象を記述するものとする。(5)式に(1)～(4)式の係数を示す。(6)式にパラメータの設定値を示す。各設定値は実機から得られた値を用いた。

図10にノコギリ波駆動(90Hz, 0～150V)によるシミュレーション結果を示す。グラフ中の曲線は図9に示したリンクの回転角 θ_1 と、エンドエフェクタの回転角 θ_2 の運動軌跡を示したものである。ただし時計回りを回転の正方向とする。この結果より、低速変形時にはエンドエフェクタのみが振動を伴いながら緩やかに屈曲動作を行い、その後の急速復帰動作ではリンクが大きく屈曲動作をしているのが分かる。これによりノコギリ波駆動による回転移動が可能であることを確認できた。

<4.3> ノコギリ波による粗動動作と高速化 ノコギリ波駆動によるマニピュレータの移動特性の把握と、高速移動実現のためのノコギリ波最適化を目的に、各種動作実験を行う。図11に計測システムを示す。エンドエフェクタ先端のA点、リンク先端のB点の水平方向の変位量をレーザ変位計で計測し、その値よりリンクの回転角 θ_1 と、エ

図11 計測システム
Fig.11 Measurement System

図12 駆動周波数一単位回転角
Fig.12 Frequency - Unit Rotation Angle

ンドエフェクタの回転角 θ_2 を導出する。アクチュエータの駆動波形にはノコギリ波(0～150V)を用いる。

図12に共振点(165Hz)以下の周波数vs.単位回転角(1周期あたりのリンクの回転量 θ_1)の関係を示す。90Hzで最大単位回転角を、140Hzで最小単位回転角を示している。

図13に上記90Hzと140Hzでの移動シーケンスの詳細計測結果を示す。図13左、図13右はそれぞれ駆動周波数90Hz、駆動周波数140Hz時の移動シーケンスを表す。グラフは上より順に、駆動電圧(V)、回転角 θ_1, θ_2 (rad)、リンクに対するエンドエフェクタの角速度(以下、相対角速度) $d(\theta_2 - \theta_1)/dt$ (rad/s)を示す。低速屈曲最中には相対角速度が振動していることが図13下段より分かる。このグラフは急速変形瞬間(破線部)の相対角速度が90Hzと140Hzでは異なる

図13 90Hz, 140Hzでの運動シーケンス
Fig.13 Motion Trajectory at 90, 140Hz

図14 急速変形時の相対角速度と回転モーメント
Fig.14 Relative Velocity and Momentum

ることを示す。図8に示したように急速変形時にエンドエフェクターが受ける回転モーメントは半時計回りである。このことより90Hz駆動では、急速変形瞬間の相対角速度と回転モーメントが逆向きであり、140Hz駆動では、急速変形瞬間のそれらが同方向である。この関係を図14に示す。

図15は急速変形後の相対角速度の大きさを示す。これは時間aで急速変形させた後で生ずる自由振動を計測したものである。G, gはノコギリ波の急速変形タイミングを示す。90Hz駆動では相対角速度が極大値をとるG2で急速変形が与えられ、逆に140Hz駆動では相対角速度が極小値をとるg1で急速変形が与えられている。

図16は図15の時間G1, G2, ..., および時間g1, g2, ...において急速変形を与えたときに得られる単位回転角を示す。黒色線は実験結果、灰色線は4.2節の数学モデルに基づくシミュレーション結果を示す。急速変形を与える瞬間の相対角速度が大きいほど単位回転角が大きくなっているのが分かる。またノコギリ波の周期を大きくし

ていくと極大点と極小点での相対角速度の差が小さくなり駆動法に差がなくなるため、単位回転角は 3.7×10^{-3} (rad/cyc)に収束している。

以上より最大単位回転角を与えるノコギリ波とは、相対角速度最大点のG1で急速変形を与えるものである。この時のノコギリ波の周波数は250Hz、マニピュレータの単位回転角は 9.2×10^{-3} (rad/cyc)である。この駆動法により、従来(収束値 3.7 rad/cyc)の約2.5倍の単位回転角が得られた。まとめると次のことが言える。

- (1) アクチュエータ急速変形時の相対角速度が大きいほど、単位回転角は大きくなる。
- (2) 高速動作を与える最適ノコギリ波は、周期を時間G1として設計することにより得られる。

<4.4> パルス波による粗動動作と高速化 本節ではパルス波による駆動実験を行う。パルス波駆動は2回の急速変形を与えることになるので、それをうまく利用することにより、ノコギリ波駆動よりも高速な運動の生成が期待できる。そこで図17に示すパルス波のT1幅、T2幅と単位回転角との関係を求め、それらの最適化を行う。

<4.4.1> 時間幅T1と単位回転角との関係 図18に立ち上がりインパクト印可後からの経過時間と振動速度との関係を示す。ノコギリ波の場合と違うのは、最初に時間aで極大値が現れることである。

図19にパルス幅T1と単位回転角の関係を示す。パルス幅T1は図18で相対角速度の極大値、極小値が現れるa1, a2, ..., b1, b2, ...に設定した。ノコギリ波駆動と

図15 相対角速度と急速変形タイミング
Fig.15 Rapid Restoration Timing and Relative Velocity

図16 急速変形タイミングと単位回転角
Fig.16 Rapid Restoration Timing vs. Unit Rotation Angle

図17 パルス波
Fig.17 Pulse Wave Voltage

図18 立ち上がりインパクト後の振動速度
Fig.18 Vibration Velocity after Upward Impact

同様に、急速変形時の相対角速度が大きいほど、単位回転角が大きくなっているのが分かる。相対角速度が最大値を示す時間a1で急速変形（立ち下げインパクト）を与えることで、最大単位回転角 14.0×10^{-3} (rad/cyc) が得られる。これは、ノコギリ波駆動での最大値と比較して約1.5倍である。また相対角速度が最小値を示すb1で急速変形（立ち下がりインパクト）を与えると、単位回転角は最小となる。

図20、図21はそれぞれ、パルス幅 $T1=a1$ 、パルス幅 $T1=b1$ のときのマニピュレータの運動を示す。 $\theta1$ 、 $\theta2$ は図11での設定に従う。 $T1=b1$ では変位後に大きく振動しているのが分かる。これは立ち下がりインパクトによる回転モーメントと相対角速度との位相関係に依存するもの

<4.4.2> 時間幅 $T2$ と単位回転角との関係 図22は時間aで立ち下がりインパクトを印可したときの、経過時間と振動速度の関係を示す。この場合は時間d1で最初に極小点が現れる。図23はパルス幅 $T2$ と単位回転角との関係を示す。パルス幅 $T2$ は図22の時間c1,c2,...及び、時間d1,d2,...に設定した。

図19 時間幅 $T1$ と単位回転角との関係
Fig.19 Relationship between $T1$ and Rotational Angle

図20 単位回転角最大の場合の運動軌跡 ($T1=a1$)
Fig.20 Trajectory at Max. Displacement ($T1=a1$)

図24は単位回転角が最大となる $T2=c1$ の場合のマニピュレータの運動軌跡を示す。また図25は単位回転角が最小となる $T2=d1$ の場合のマニピュレータの運動軌跡を示す。

図21 単位回転角最小の場合の運動軌跡 ($T1=b1$)
Fig.21 Trajectory at Min. Displacement ($T1=b1$)

図22 立ち下がりインパクト後の振動速度
Fig.22 Vibration Velocity after Falling Impact

図23 時間幅 $T2$ と単位回転角との関係
Fig.23 Relationship between $T2$ and Rotational Angle

図24 単位回転角最大の場合の運動軌跡 (T2=c1)
Fig.24 Trajectory at
Max. Displacement (T2=c1)

図25 単位回転角最小の場合の運動軌跡 (T2=d1)
Fig.24 Trajectory at
Min. Displacement (T2=C1)

<4.4.3> 最適パルス波の設計 前節までの結果より最適パルス波を設計する。ここでは表1に示すようにパルス波のT1幅, T2幅に対して4通りの組み合わせを考え, それぞれの場合での単位回転角を求める。その結果を図26に示すが, 比較のために4.3節で述べた従来結果と最適ノコギリ波での結果をあわせて示す。T1, T2を共に最適値に設定したパターン1のパルス波により単位回転角が最大になる。これは最適ノコギリ波駆動と比較して約2倍以上(従来比で約5倍以上)の移動量が得られている。

5 まとめ

本論文では伸縮屈曲アクチュエータ(BEMA)を用いた慣性駆動型マイクロマニピュレータの機構, 動作原理を提案した。本マニピュレータは微動動作, 粗動動作という2通りの運動が可能である。粗動動作は慣性駆動により実現している。この粗動動作に関してノコギリ波駆動, および

表1 パルス波形パターン
Table 1 Pattern of Pulse Wave

	Pattern 1	Pattern 2	Pattern 3	Pattern 4
T1	a1	a1	b1	b1
T2	c1	d1	c1	d1

図26 各パルス波形パターンと単位回転角との関係
Fig.26 Relationship between Pulse
Pattern and Unit Rotational Angle

パルス波駆動での動作特性を述べた。その結果, 急速変形による回転モーメントと相対角速度(リンクに対するエンドエフェクタの角速度)との位相がマニピュレータの回転量に大きく影響することが分かった。つまり回転モーメントと相対角速度が逆位相でかつ相対角速度が大きいとき, マニピュレータの回転量は大きくなる。この原理に基づくことによりノコギリ波, パルス波の最適設計は実現できる。最適ノコギリ波では従来比の約2.5倍の移動速度が得られ, また最適パルス波では従来比の約5倍以上の移動速度が得られた。このことによりマニピュレータの回転運動機構とその駆動方法を提案することができた。

今後は回転運動に関するサーボ機構とともに, エンドエフェクタ先端に取り付ける微小対象物把持機構を設計し, マニピュレータシステムの実現を目指していく。

謝辞

本研究の一部は, 通商産業省工業技術院産業科学技術研究開発に基づく「マイクロマシン技術の研究開発」の一環として, NEDOから委託を受けた(財)マイクロマシンセンターの再委託業務として, (株)デンソーが実施したものである。

(平成9年2月24日受付, 平成9年6月2日再受付)

文献

- (1) 新井 健生, "マイクロ/ナノ作業", ROBOMECH95講演論文集, Vol.B, pp.1494-1497 (1995)
- (2) "Microrobotic Systems for Minimal Invasive Surgery", Tutorial TS1, Tutorial Text on Int'l Conf. on Robotics and Automation, pp.4-118 (1996)
- (3) 特集号「細胞・DNA等のマニピュレーション」, 電学論E, Vol.116, No.5, pp.163-202 (1996)
- (4) 新井 史人, "マイクロ物理に基づくマイクロマニピュレーションの現状と将来", 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.801-802 (1995)
- (5) M.Washizu, "Manipulation of Biological Objects in Micromachined Structures", Proc. IEEE Micro Electro Mech. Syst., pp.196-202 (1992)
- (6) H.Miyazaki, T.Sato, "Fabrication of 3D Quantum Optical Devices by Pick-and-Place Forming", Proc. of IEEE MEMS'96, pp.318-324 (1996)
- (7) E.Higurashi, H.Ukita, et al., "Optically Induced Rotation of Micro-objects Fabricated by Surface Micromachining", Appl. Phys. Lett., 64, pp.2209-2215 (1994)
- (8) 樋口, 山形, "圧電素子の急速変形を利用したマイクロロボットアーム", 日本ロボット学会誌, 第8巻, 第4号, pp.103~106 (1990)
- (9) 磯部, 森口, 久曾 神, "平面3自由度インパクト駆動機構の開発", 精密工学会誌, 第62巻, 第4号, pp.574~578 (1996)
- (10) K.Senda et al., "Characteristics of Bending and Expanding Motion Actuators," Proc. of the International Symposium on Microsystems, Intelligent Materials and Robots, pp.83-86 (1995)

光本 直樹

(正員) 1967年2月25日生まれ。1991年3月三重大学工学部機械工学科卒業。1993年3月名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了。同年(株)日本電装(1996年10月,(株)デンソーに社名変更)入社。1996年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。群ロボット等の研究を経て,現在は(株)デンソーにおいてマイクロマシンの研究に従事。電気学会,日本機械学会,計測自動制御学会,日本ロボット学会,IEEEの会員。

金山 斎

(正員) 1960年10月1日生まれ。1983年3月慶應義塾大学工学部計測工学科卒業。同年(株)日本電装(1996年10月,(株)デンソーに社名変更)入社。センサ,アクチュエータの研究・開発を経て,現在はマイクロマシン,ディスプレイの研究に従事。日本機械学会,日本ロボット学会,電気学会の会員。

井戸垣 孝治

(正員) 1954年12月19日生まれ。1978年3月京都大学工学部電子工学科卒業。同年(株)日本電装(1996年10月,(株)デンソーに社名変更)入社。1992年マイクロマシンセンターに出向。センサ,アクチュエータの研究・開発を経て,現在はマイクロマシン,ディスプレイの研究に従事。日本機械学会,日本精密工学会,電気学会,自動車技術会の会員。

服部 正

(正員) 1945年8月13日生まれ。1968年3月名古屋工業大学計測工学科卒業。1970年5月(株)日本電装(1996年10月,(株)デンソーに社名変更)入社。1982年7月工学博士(東京大学)。1993年4月大阪大学極限物質センター客員教授。1995年名古屋大学工学部非常勤講師。現在,(株)デンソーフラットパネルプロジェクト部部長。流れの可視化,光学薄膜,各種センサの研究を経て,現在はマイクロマシン,半導体,ディスプレイの研究に従事,92年可視化情報学会論文技術賞受賞。マイクロマシン研究開発部会長,日本ロボット学会理事。応用物理学会,電子情報通信学会,電気学会,IEEEの会員。