人の直観的動作を利用する マイクロロボット群の遠隔操作システム

長谷川 公明^{*1} 佐藤 知正^{*2} 野原 健美^{*1} 松井 照幸^{*1}

Novel Teleoperation System for Multi-Micro Robots based on Intention Understanding through Operator's Intuitive Behaviors

Kimiaki Hasegawa^{*1}, Tomomasa Sato^{*2}, Takemi Nohara^{*1} and Teruyuki Matsui^{*1}

This paper proposes a novel teleoperation system for multi-micro mobile robots. The system issues teleoperation commands by recognizing such operator's intuitive behaviors as the operator wants to move multiple robots simultaneously or to move single robot incrementally through operator's object gathering behavior with hand or object sliding behavior with fingers respectively. It also controls the zoom ratio and viewing angle of camera by recognizing the operator's intuitive behaviors to monitor the robots closely from different view angle through the operator's head motion towards the monitor display. Utilization of operator's behavior in accordance with instinctive behavior framework of small objects handling realizes intuitive teleoperation system for multiple micro mobile robots. The effectiveness of the system is confirmed by teleoperation experiments of multiple 1 [cm³] cubic mobile robots driven by PZT-actuators.

Key Words: Multi-Micro Mobile Robots, Intention Understanding, Intuitive Behavior, Teleoperation System

1. はじめに

工場や発電施設内機器の補修分野, 医療分野等, 「狭隘空間」での作業におけるマイクロ移動ロボットの適用が期待されており, 単体のロボットの能力を複数ロボットの協調によって高めるアプローチが注目されている[1]~[4]. その際には, 複数台のロボットによる「群作業」を想定したテレオペレーション技術の確立が求められる。

これまでのロボットの遠隔操作に関する研究は, スーパーバイザリ制御[5], Shared Autonomy[6], VR技術の導入[7]等, 多様になされてきたが, そのほとんどが単体ロボットを対象としたものであり, 複数台ロボットを対象としたマンマシンインタフェースの研究は少なかった。

複数台ロボットの遠隔操作における指令入力では, 複数ロボットに対する全体的な指令と共に, 各ロボット状況に適合した指令も個別に入力しなければならないといった複雑さを有している。このような操作指令の複雑さを解消しようとする試みとしては, 抽象的指令を用いる研究[8][9]や, 操作ロボットの周囲のロボットに操作ロボットの作業を理解し補助させようとする研究[10]等が行われている。これらのアプローチは, シス

テムもしくはロボットの情報処理に重点を置き, 自律性を高めることによって操作負担を軽減しようとするものであり, 複雑な指令入力をいかに直観的に行うかといった操作手法, すなわちヒューマンインタフェースの側面に着目したものではない。システムやロボットの自律性の高低を問わず, 操作者の頻繁な介入が要求されるシステム系では, 的確かつ迅速な指令入力を可能とする直観的操作手法が不可欠となる。

一方, 複数台ロボット操作における状況判断のためには, 操作者は個々のロボットの局所的状況だけではなく, 大局的な状況までをも的確に把握する必要がある。しかしながら, これまで複数台ロボットの効率的監視という観点での研究は見あたらなかった。

そこで本論文では, 複数の微小対象物を扱う際の人間の直観的な動作から, 操縦意図や観察意図を認識し, それに見合った制御命令を発行してロボット群や監視スコープを制御するといった機能の特徴とする直観的なマイクロロボット群遠隔操作システムを提案する。さらに, 複数台の1[cm³]ロボットを遠隔操作する実験システムを構築し, 基礎的な実験によって本システムの有効性を検証したので報告する。

以下, 次章において, マイクロロボット群遠隔操作のための必要機能を整理し, 第3章では, 抽出された必要機能の実現方法を述べる。第4, 5章ではそれぞれ実験システム, 実験結果であり, 最終章は結論である。

原稿受付 1995年5月19日

^{*1}(株)メイテック研究開発センター

^{*2}東京大学工学部

^{*1}MEITEC

^{*2}Faculty of Engineering, University of Tokyo

2. マイクロロボット群遠隔操作のための必要機能

マイクロロボット群遠隔操作のための必要機能を抽出するために、Fig. 1 に示すような、人間が机上において複数の小さな虫を取り扱う様子を考察する。この動作の様子から、微小対象物のハンドリングに適した環境や、複数の対象物を取り扱うための機能が導ける。

2.1 微小対象物を扱う際の必要環境

Fig. 1 に示すように、人が微小対象物を扱う際は机の上で作業を行う。さらに、対象物を双腕の間において上からのぞき込む姿勢をとる。このような手仕事姿勢によって、人は対象物に対する広いアプローチ角からの観察や手のアクセスが可能となるばかりか、目を近づけたり離したりすることによる視野変更の自由度をも得ることができる。

つまり、微小対象物を扱う際には、手仕事姿勢で作業を実施できる環境を構築することが、直観的作業実施の観点から有効となる。

2.2 ロボット群操作における必要機能

マイクロロボット群の円滑な遠隔操作を実現するためには、(1)ロボット群への的確な命令入力を可能とするロボット群指令機能と、(2)作業領域内に広く分布するロボット群を効率よく監視するためのロボット群監視調整機能、が必要である。以下にこれらについて、必要機能の詳細を述べる。

(1) ロボット群指令機能

ロボット群を組織的に扱い、効率的に作業を遂行するためには、以下のようなロボット群指令機能が必要である。

A) 一斉指令、個別指令

Fig. 1 では、左手で複数の虫を一斉に誘導し、右手で一匹の虫の動きを止めている。このようにロボット群の操作には、複数対象に同時に命令を与える指令(「一斉指令」と呼ぶ)と、個々の対象に命令を与える指令(「個別指令」と呼ぶ)が必要である。一斉指令は多数のロボットに個々に命令を与える手間を解消するためにも不可欠であり、個別指令は任意の一台のロボットが引き起こす不具合に対処するために不可欠である。

B) 一括指令、逐次指令

ロボット群の遠隔操作システムには、目標等を一括して指定し、システムに制御の一部を肩代わりさせるバッチ処理的制御の指示や、作業状況を確認しながら操作者が直接携わる逐次的制御の指示といった、「制御方法の選択」に応じた指令系が重要

Fig. 1 Scene of multiple small insects handling

である。前者のバッチ処理的制御の指令を「一括指令」と呼び、操作者の負担を軽減させるために必要である。これは単一命令の集合体であって、実行時にはこれらの指令が連続的に展開される。一方、後者の逐次的指令を「逐次指令」と呼び、状況をフィードバックしながら慎重に作業を行いたい場合等に不可欠である。これは単一命令を即時的に実行する指令である。

C) ロボット間関係指令

Fig. 1 に示すような左手の動作では、手を操作面から離すまでの期間、掌の内側の虫達を、他の虫とは異なる対象(操作対象)として規定している。このように、ロボット群の操作には、ロボットの関係、立場を柔軟に規定する指令系が必要である。ロボット間関係指令には、設定等による恒常的關係指令と、一時的關係指令の二種類がある。恒常的關係は、一台のロボット操作で群れを動かす等というように、操作者負担を軽減するために有効である。一方、一時的關係は、変動的な作業環境に柔軟に対応するために必要である。ちなみに、Fig. 1 での左手内の虫達の関係は、掌の形状や動作によって一時的に決定される例である。

以上のように、ロボット群の遠隔操作では、単体ロボット操作に比べて複雑な命令系が必要とされる。従って、ロボット群への的確且つ迅速な指令入力を実現するためには、この複雑な命令系を直観的に使いこなすことを可能とする操作方法が必要となる。

(2) ロボット群監視調整機能

ロボット群の状況を的確に把握するために、監視調整機能には「映像倍率調整機能」と「撮像方向調整機能」が必要となる。

A) 映像倍率調整機能

Fig. 1 に示すような手仕事姿勢において、人が複数の微小物体を扱う際は作業状況に応じて視野範囲を適宜調整しながら観察を行う。これは、Fig. 2 に示すように、広い視野において細部の様子を窺うことは視野分解能的に不利であり、逆に狭い視野で全体の状況を把握することは不可能である等、観察の対象となる範囲に適したスコープを選択して、その範囲に適合した視覚情報の精度を得るためである。このように、ロボット群操作においては、観察範囲に合わせて監視スコープの倍率を任意に変更できる機能が求められる。

Fig. 2 Wide and narrow view of the target

Fig. 3 Multiple views of the target

B) 撮像方向調整機能

同様に、人が複数の微小物体を扱う場合、作業状況に応じて対象物に対して様々な方向から観察を行う。これは、Fig. 3に示すように、同一物体に対する異なった視野方向の映像から、物体間の空間的位置関係や物体の三次元形状を正確に把握するためである。このように、ロボット群操作には、観察対象物に対する視野方向を任意に変更できる機能が求められる。

以上のように、ロボット群の状況を正確に把握するために必要とされる映像倍率の調整や撮像方向の調整等の監視調整だけでも、かなりの操作量が要求される。しかも、群作業を円滑に遂行するためには、監視調整操作によってロボット操作の流れが中断され、操作者の集中力の持続が妨げられてはならない。つまり、ロボット群の遠隔操作では、操作者が目的作業に専念できるような、直観的な監視調整操作方法が求められる。

3. 直観的動作を利用した 操作システムの実現方法

本章では、前述した必要機能を満たすマイクロロボット群遠隔操作システムの実現方法を述べる。

3.1 手仕事姿勢操作環境

2.1節で述べた手仕事姿勢での作業を実現するために、Fig. 4に示すように、机中央にロボットの作業状況を投影するためのCRTモニタを表示面を上向きに設置し、その映像を直接操作できるような入力装置を準備する。この環境によって、広いアプローチ領域や視野変更の自由度が確保されると共に、操作点と効果点の一致から直観的な操作性が確保できる[11]。

3.2 操作者の直観的動作の利用

複数の微小物体を一つのところに集めるといった動作を考えてみる。人は何かをかき寄せようとする時、Fig. 1の左手に見られるような手の形状（対象物の方に手の内側を向け指先を揃える形）を、無意識的にかたちづくることが多い。本論文では、特定の事象を意図的に符号化するジェスチャーとは異なり、関節等の人体的構造にも起因し、習慣ともなっているような動作（一般性をもってモデル化できる動作）を「直観的動作」と称し、前章に述べたロボット群操作における必要機能を満たすために、このような直観的動作を利用することを提案する。

直観的動作には何らかの意図が含まれていることが多い。そこで、直観的な操作動作とその作業意図を結びつける意図モデルをシステム内に準備しておけば、システムは操作者動作を検出し、同モデルに基づいて作業意図を解釈した上で、意図に対

Fig. 4 Manual task execution posture

(a) gathering behavior of a group of objects at one time

(b) gathering behavior of a group of objects successively

(c) sliding behavior of one object at one time

(d) pushing behavior of one object successively

Fig. 5 Typical behaviors for small objects handling

応した各種指令を発行することができる。本論文では、このような一連の機能を「意図理解機能」と呼ぶ。

(1) 意図理解機能を適用したロボット群指令機能

Fig. 5(a)～(d)は、微小物体を取り扱う際の典型的な直観的動作の例である。(a)は人が掌を立てて複数の対象を一気に手元にかき寄せる動作であり、一斉に且つ一括的に回収したいという意図を含んでいる。(b)は複数対象を掌を立てて慎重にかき寄せる動作であり、一斉に且つ逐次的に誘導したいという意図を含んでいる。また、掌内の対象の関係を一時的に規定するといった意図も含まれる。(c)は単一の対象を指で押しつけてスライドさせる動作で、個別に一括的に移動させたいという意図を、(d)は指先でつつく動作で、個別に逐次的に誘導したいという意図を、それぞれ含む。

このように、微小物体を扱う直観的動作には、ロボット群の遠隔操作に必要な、複雑な命令系に適合する複合的な意図が含まれているため、これらの動作を直観的な指令入力方法として活用することにする。具体的には、システムがモニタ上に映し出されたマイクロロボット群に対する手指の動作パターンを検出して、その動作が含む意図に対応した制御指令を自動的に発行するといった情報処理を行うものとする。

Fig. 6は、本論文で採用するこれらの操作動作と、動作に含まれる意図、意図に基づいて生成されるロボット群制御指令との対応関係を示している。

(a)の動作は、ロボットを掻き出そうとして、手が動作を開

Fig. 6 Correspondence of operator's behavior with operator's intention and robot command

始してからモニタ画面外に出るまでの時間が150[msec]以内である場合に認識され、手のひらの内側にいるロボット群を自動的に誘導制御する一斉一括指令へと変換される。(b)のロボット群を少しずつかき寄せる動作は、手が動作を開始してから150[msec]以上、モニタ画面上にある場合に認識され、手の内側のロボット群を逐次的に操作可能とする一斉逐次指令へと変換される。(c)の動作は、ロボットへの指示位置すなわち指先押印位置がロボット上であった場合に認識され、指のスライド動作を追跡して指が離れた点を移動目標点として、押されたロボットのみを自動的に誘導制御する個別一括指令に変換される。(d)の動作は、ロボットへの指示位置がロボットの側面である場合に認識され、そのロボットのみを逐次的に操作可能とする個別逐次指令に変換される。

このように、手指の直観的動作を利用した指令機能の操作法によれば、操作者は命令系の複雑さを感じることなく、マイクロロボット群への直観的な指令入力が可能となる。

(2) 意図理解機能を適用したロボット群監視調整機能

ロボット群指令機能同様に、監視調整機能へ意図理解機能を適用する。

A) 映像倍率調整機能の実現

人が視野範囲を調整する場合、対象物に目を近づけて拡大映像を得たり、逆に遠ざけて全体像を得たりする。つまり、人の視点位置と対象物との距離は、その人がどのような倍率で観察したいのかという観察意図と対応させることができる。従って本システムでは、Fig. 4 に示したような手仕事姿勢操作環境において、頭部とモニタ間の距離を計測して、その距離に応じたズーム制御命令を発行し、ロボット群を映しているモニタスクープの拡大倍率を自動的に調整することにする。

B) 撮像方向調整機能の実現

人が微小物体に対する視野方向を調節する場合、対象物に注視点を固定したまま頭部を左右に動かすことによって、多角的な観察を行うことが多い。つまり、人の視点位置と対象物とがなす角度は、その人がどの角度から眺めたいのかという観察意図と対応させることができる。そこで本システムでは、モニタ表面に対する頭部の傾きを計測して、その角度に応じたカメラアングル制御命令を発行し、監視カメラの撮像方向を自動的に

Fig. 7 Schematic diagram of experimental system

調整することにする。

このように、頭部の直観的動作を利用した監視調整機能の操作法は、手指による操作を必要としないため、操作者は目的作業に専念することができる。

4. 実験システム

前章で述べた実現方法を具現化した以下のような実験システムを構築した。

4.1 システム構成

実験システムは、Fig. 7 に示すように、ヒューマンインタフェース部、スレーボット部、コンピュータ部から構成されている。

(1) ヒューマンインタフェース部

同部は、作業機と、操作者の動作を検出するための各種セン

Fig. 8 Photo of human interface section

Fig. 9 Photo of slave robots section

サ群から構成される。作業機の中央にはCRT モニタがモニタ面を上向きにして設置されており、ロボット群の状況が提示される。操作者を取りまくセンサ群は、モニタ面上での操作者の指先の位置を検出するタッチパネルセンサ、操作者の頭部姿勢(傾き角度)を検出する角度センサ、頭部及び手の三次元位置を検出する空間センサから構成されている。タッチパネルセンサは表面弾性波方式であり、 x, y 軸方向共に $1.53[\text{mm}]$ の分解能、 $58[\text{mm}/\text{sec}]$ の応答速度を有しており、上向きモニタの表面に装着されている。角度センサは頭部のロール、ピッチ方向の角度をポテンショメータにより検出するものであり、ヘッドフォン上に搭載されている。空間センサは超音波方式で、操作者周囲に配置されるユニットとターゲット上に搭載されるユニットから構成され、全方向軸に $5[\text{mm}]$ の分解能を有する。頭部用のターゲットユニットは、角度センサと同様にヘッドフォンに装着されている。操作者はヘッドフォンを装着してモニタに向かって遠隔操作を実施する。Fig. 8 はヒューマンインタフェース部での作業風景である。

(2) スレープロボット部

同部は、二台のマイクロロボット、監視用カメラ、作業エリアで構成される。マイクロロボットは、一辺が $10[\text{mm}]$ の正方形形状、質量 $2[\text{g}]$ の $1[\text{cm}^3]$ ロボットで、スタック型圧電素子が接着された二つの矩形型フレームを有し、前進及び左右旋回が、それぞれ、約 $0.5[\text{cm}]$ 、約 $20[\text{deg}]$ を単位として動作可能

となっている[12]。ズーム調整機構を有した監視用カメラは、 $40 \times 40[\text{cm}]$ の作業エリア上方に設置されており、画像処理により二台のマイクロロボットの位置や向きを検出する。マイクロロボットは、カメラからの映像情報を利用した位置フィードバックによって制御されている。Fig. 9 はスレープロボット部の風景である。

(3) コンピュータ部

コンピュータ部は、ホストコンピュータ (GWS「TITAN」) と、操作者の動作データを収集するための操作データ収集計算機 (PCH 98)、及びロボットの状況データの収集と制御を司るロボット制御計算機 (PC 9821) とから構成されている。ホストコンピュータは、操作者の手や頭の位置情報を取得する空間センサ座標系、指の位置情報を取得するタッチパネル座標系、及びロボット位置や向きを取得する画像座標系を整合した統一座標系を有しており、操作者の手指とモニタ画面内のロボットとの位置関係を認識することができる。尚、これらの計算機は、イーサネットでスター型に接続されており、非同期で各処理が行えるようになっている。

4.2 システムの情報処理

操作データ収集計算機は、空間センサやタッチパネル等から操作者の頭部や手指の動作を検出してホストコンピュータへデータを送る。ホストコンピュータは、その動作パターンをもとに意図モデルを参照して操作者の意図との対応付けをし、ロボット制御計算機から送られてくるロボット状況データを加味して意図に対応した制御を決定し、ロボット制御計算機へ指令を発行する。これらの一連の情報処理によって、ロボット群の走行制御や、カメラの撮像倍率及び方向の調整制御が実施される。

5. 実 験

以下に、ロボット群指令機能と監視調整機能の確認実験と、ロボット群指令機能を用いた協調作業実験について記す。

5.1 ロボット群指令機能確認実験

(a) 一斉一括指令実験

Fig. 5(a)のようにモニタ上でかき寄せる動作を行うことによって、二台のロボットを任意に設定した所定位置へと一斉に移動～停止させ得ることを確認した。

(b) 一斉逐次指令実験

Fig. 5(b)のようにモニタ内の二台のロボットを、右手のひらを使って少しずつかき寄せる動作を行うことによって、任意に設定した $\phi 40[\text{mm}]$ の円内に移動させ得ることを確認した。

(c) 個別一括指令実験

Fig. 5(c)のようにモニタ内の任意のロボットを指で押しつけそのままスライドし、 $\phi 15[\text{mm}]$ の移動目標上で指を離す一連の動作を行うことによって、ロボットを目標円内へと移動～停止させ得ることを確認した。

(d) 個別逐次指令実験

Fig. 5(d)のようにモニタ内の任意のロボットに対し、連続して尾部をつつく動作を行うことによって、幅 $20[\text{mm}]$ のゆるやかなS字曲線上を逸脱せずに走行させ得ることを確認した。

Fig. 10 Experimental situation

Fig. 11 Experimental results

以上のように、操作者の手指動作を検出することで、その動作が含む操縦意図に見合った制御命令が発行されることが確認され、直観的なマイクロロボット群操作が可能であることが確認された。

5.2 ロボット群監視調整機能確認実験

(a) 映像倍率調整実験

背筋を伸ばして腰掛け、その姿勢からモニタに頭部を近づける動作を行うことによって、スレーブロボット部のカメラズームを5.9[mm]から47.2[mm] (8倍) にリニアに変化させ得ることを確認した。

(b) 撮像方向調整実験

ここでは、表示出力映像としてグラフィックスを用いた。操作者が頭部の傾きをロール、ピッチ両方向とも0~±45°に変化させたところ、画像の視野方向を0~±45°までリニアに変化させ得ることを確認した。

以上のように、操作者の頭部動作を検出することで、その動作が含む観察意図に見合った制御命令が発行されることが確認され、柔軟な監視機能操作が可能であることが確認された。

5.3 連携運搬作業実験

次に、本システムの有効性を検証するために、連携運搬作業の遠隔操作実験を実施した。

実験の状況を Fig. 10 に記す。二台の1[cm³]ロボットを操作して、運搬対象物 (たばこ) をその姿勢をスタートラインに

対して±10[deg]以内に保ちながら、15[cm]前方のゴールまで運ぶという作業を実施した。この作業において、本論文で提案したロボットの尾部をつつく個別逐次指令を用いる場合と、制御対象切り替えキーと制御方向操作キーを割り付けたキーボード操作とで、作業実行時間について比較を行った。

9人の被験者で実験を行った結果を Fig. 11 に記す。本システムを使用した場合には、被験者全員が作業時間を25~40%程度短縮せしめており、優位性が認められた。作業時間短縮の主な要因として、①制御対象切り替え時間が省略されたこと、②対象選択ミスや方向制御ミスが減少したこと、が挙げられる。

6. 結 論

本論文では、手仕事姿勢操作環境下での直観的動作、すなわち微小対象物を扱う際の人の動作を操縦動作として利用した新しいマイクロロボット群遠隔操作システムを提案した。また、実験システムを構築し、その有効性を確認した。

上向きモニタを組み込んだ作業机上での人の直観的動作を検出するセンサ群、およびそれらの動作が含む意図と制御命令に対応づける意図理解機能を用意したことで、システムがマイクロロボット群に対する操縦意図や観察意図を含む操作者の直観的動作を検出し、その意図に対応した制御命令へと即時に自動変換するため、操作者はロボット群遠隔操作特有の指令入力の煩雑さを感じることなく、監視機能の調整やロボット群への指令入力を迅速且つ直観的に実施可能となった。また連携運搬作業実験では、二台のマイクロロボットを用いた遠隔作業において作業効率の向上が認められ、本システムの有効性が確認された。このことから、作業形態が複雑化する場合や制御台数がさらに増える場合には、本システムの有する直観的な操作機能の効果がより顕著になるものと考えられる。

今後は、ロボット間関係指令機能の強化による命令体系の完備が課題である。また、実験システムにおけるマイクロロボット数を増やし、ロボット間関係指令機能を付加した形態のもとで多様な作業形態を具現化し、本システムの汎用性を検証していきたいと考えている。

本研究の一部は、工技院産技プロジェクトの一環として、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、実施したものである。

謝 辞

最後に、本研究の推進にあたり有益な御助言を頂いた、東京大学先端科学技術センターの溝口博助教授に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- [1] T. Fukuda et al.: "Celluar Robotic and Micro Robotic Systems," World Scientific Series in Robotics and Automated Systems, vol. 10, 1994.
- [2] K. Singh and K. Fujimura: "Map Making by Cooperating Mobile Robots," Proc. of IEEE Conference on Robotics & Automation, pp. 254-259, 1993.
- [3] H. Asama et al.: "Functional Distribution among Multiple

- Mobile Robots in an Autonomous and Decentralized Robot System," Proc. of IEEE Conference on Robotics & Automation, pp. 1921-1926, 1991.
- [4] T. Yagyu et al.: "Multi-layered Inference with Possibility Distribution for Multiple Micro-machines Control," Proc. 5th MHS, pp. 55-60, 1994.
- [5] W. Ferrel et al.: "Supervisory Control of Remote Manipulator," IEEE Spectrum, October, pp. 81-88, 1967.
- [6] 平井: "Shared Autonomy の理論", 日本ロボット学会誌, vol. 11, no. 6, pp. 788-793, 1993.
- [7] 大山, 常本, 館, 井上: "仮想環境と実環境の重ね合わせの一手法", 日本ロボット学会誌, vol. 12, no. 2, pp. 272-281, 1994.
- [8] 森島, 平井: "マルチロボットによる作業計画", 日本ロボット学会第 12 回学術講演会予稿集, vol. 3, pp. 999-1000, 1994.
- [9] 横田他: "マルチロボット環境におけるヒューマン・インタフェース", ROBOMECH '94 講演論文集, vol. A, pp. 513-516, 1994.
- [10] 木村, 梶浦, 藤田: "人間が操縦するロボットとの協調-動作理解による補助-", 日本ロボット学会第 12 回学術講演会予稿集, vol. 3, pp. 851-852, 1994.
- [11] 佐藤, 市川, 光石, 畑村: "視覚力覚情報の手元集中提示と力帰還ペンをを用いた遠隔微細作業システム", 日本ロボット学会第 11 回学術講演会予稿集, vol. 3, pp. 1047-1050, 1993.
- [12] T. Matsuoka et al.: "Mechanical Analysis for Micro Machine with Piezoelectric Element," Proc. 1993 IROS '93, vol. 3, pp. 1685-1690, 1993.

長谷川公明 (Kimiaki Hasegawa)

1966 年 9 月 10 日生。1989 年横浜国立大学教育学部卒業。同年(株)メイテック入社。研究開発部に所属し現在に至る。マンマシンインタフェースの研究に従事。(日本ロボット学会正会員)

野原健美 (Takemi Nohara)

1964 年 12 月 18 日生。1988 年名古屋工業大学合成化学科卒業。同年(株)メイテック入社。研究開発部に所属し現在に至る。マンマシンインタフェースの研究に従事。

佐藤知正 (Tomomasa Sato)

1948 年 9 月 22 日生。1976 年東京大学大学院工学系研究科産業機械工学博士課程修了。同年電子技術総合研究所入所。超音波 3 次元水中撮像, 知的遠隔作業ロボット, 知能化ハンドアイシステムの研究に従事。この間, 1983 年から 1984 年米国ウツホール海洋学研究所に客員研究員として滞在。1992 年 10 月東京大学先端科学技術研究センターに移籍。現在同センター教授。知能ロボットによる微細作業の研究に従事。

(日本ロボット学会正会員)

松井照幸 (Teruyuki Matsui)

1945 年 9 月 3 日生。1984 年ハワイ大学大学院理学部地球物理学博士課程修了。1987 年(株)メイテック入社。現在に至る。ハワイ地球物理学研究所交換研究員として極限下の固体物性, リモートセンシング等の研究に従事。現在, 制御技術の研究に従事。応用物理学会, 精密工学会, IEEE, 電気情報通信学会等の会員。