

研究解説

ハプティックインターフェースを用いた微細作業支援システム

Micro Tele-Operation Systems with Haptic Interfaces

安藤 慶昭*・太田 昌宏*・権田 晃平*・尹 康燮*・橋本 秀紀*

Noriaki ANDO, Masahiro OHTA, Kouhei GONDA, Kangsup YOON and Hideki HASHIMOTO

1. はじめに

近年、モバイル機器や小型 AV 機器の小型化、省電力化に伴い、基盤や部品はより微細なものとなりつつある。一方で、特に高度な判断を要する部品のアラインメント等の作業は、未だに人間が行っている場合が多い。これは、同様の作業を行うロボットを開発し、学習を行わせるよりも、人間が行った方が安価で早く作業を遂行でき、部品の仕様変更等にも柔軟に対応できるためである。しかしながら、このような作業は、作業者各々の感覚による品質のばらつきもさることながら、人間にとって非常にストレスフルな作業である。このようなストレスフルな作業は、人間と対象物のスケールの違いから生じているにほかならない。対象物は対象物でそのスケールに合ったマニピュレータ等で作業を行い、人間は人間のスケールで作業できるような環境が提供されれば、作業効率が高まると考えられる。本研究ではこのような状況を、人間の作業空間と微細作業空間を結ぶテレオペレーションとして捉え、人間と対象物のスケール問題を解決し、作業時のストレスの緩和と作業効率の向上を目指す。

操縦されるロボットが対象物と接触した際に、その力情報をオペレータ側にフィードバックし、操作性を向上させる技術をバイラテラル制御と呼び、マスタ・スレーブマニピュレータの基本技術として古くから研究されてきた^{1),2)}。これを用いると、視覚情報だけでは得ることのできない、対象物の質感などの情報をオペレータに伝えることができ、作業効率を高めることができる。本研究ではマイクロロボットの製作や微細部品の加工・検査を目的とした微細作業支援システムを想定している。このシステムは、人間の指の入り込めないほど微細な環境で人間の作業の能力を越えた繊細な作業を行う際に用いる、人間の手先を負のスケールに拡張するツールとして考えることができる。

2. 微細作業支援システム

本研究で構築した微細作業支援システムの構成を図1に示す。オペレータが操作する側のハプティック・インターフェース¹をマスタ・デバイス、作業を行う側のマニピュレータをスレーブ・マニピュレータと呼ぶ。マスタ・デバイスには、本研究で開発したハプティック・インターフェースを用い、スレーブとのバイラテラル・テレオペレーションを実現する。スレーブ・マニピュレータには、本研究で開発した独自の機構を持つパラレルリンク型マニピュレータを用いている。マスタとスレーブは互いに Ethernet で接続され、ネットワークを介したテレオペレーションを行うことができる。また、スレーブ・システムは PHANTOM 等の市販されている汎用的なハプティック・インターフェースとの接続も可能である。

3. スレーブ・マニピュレータ

本研究では、スレーブ・マニピュレータとしてパラレルリンク機構^{3),4)}のマニピュレータを用いている。一般的にロボットアーム等のシリアルリンク機構のマニピュレータは、ワークスペースが広く機構が簡単であるため制御が

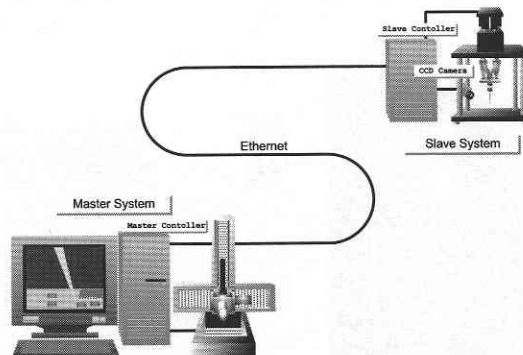


図1 微細作業支援システムの構成

*東京大学生産技術研究所 情報・システム大部門

容易である。その一方で、精度、剛性が低く応答も遅い傾向がある。パラレルリンク機構は、ワークスペースが狭く特異点も生じやすいが、シリアルリンク機構にくらべ、高精度、高速度、高負荷の作業に適しているといわれている⁵⁾。本研究で対象とするマイクロマシンの組立や微細部品の取り扱いなどの微細作業においては、数mm～数十 μ mオーダーの精度を必要とするため、精度、剛性の高いものが望まれる。したがって、後者のパラレルリンク機構が適しているとの判断からこの機構を採用した。

なお、本研究で開発したパラレルリンク型スレーブ・マニピュレータは、一般的なパラレルリンク機構とは多少異なる機構を有している。

図2に示すように、ベース部分から出ている6本の伸縮リンクが2本結合し、エンドエフェクタを支えるテーブルを3点で支持する独自の構造となっている。このような機構を採用することで、従来に比べ省スペースを実現できる。その反面、運動学や静力学が難解となる。また、一般的なパラレルリンク機構はこれまで多くの解析が行われており、ワークスペース等が分かっているが、本パラレル・マニピュレータのワークスペースは未知である。

設計する上での大まかな仕様としては、ワークスペースを位置3自由度について最大30mm×30mm×30mm、回転3自由度についてはすべて ± 15 度の範囲で動作可能なマニピュレータとした。しかしながら、今後シミュレータにより正確なワークスペースと特異点を解析する必要がある。

微小な対象物に接触し実際に作業を行う部分であるエンドエフェクタは、テーブルの中心に取り付けられた6自由度力覚センサ (BL オートテック製 NANO センサ) から伸びている。現時点ではプロトタイプとして針型のエンドエフェクタが取り付けられている。今後は、ピッキング、はんだ付け、穴開けなどのタスクに応じ付け替え可能な各種エンドエフェクタを搭載する。

3.1 スレーブ・マニピュレータ

スレーブ・マニピュレータのシステム構成を図3に示す。モータ制御を2.5kHzの制御ループで行うために、OS

には Real Time Linux (RT-Linux) を用いている。モータ、ロータリーエンコーダ、力センサ等との入出力は、拡張バスに接続されたAD、DA、カウンタ、DIOの各ボードにより行われる。アクチュエータはいずれも同型のACサーボモータが6個搭載されており、各モータの先にはピッチが1mmのボールネジが接続されている。

3.1.1 逆運動学

運動学解析のための座標系を図4のように設定した。ベース座標系を基準座標として、O点をその原点とした。O点から6本のリンクまでの距離を a とし、伸縮するリンク部分の長さを l_i ($i=1 \dots 6$) とする。位置指令として、エンドエフェクタの先端F点の座標 (x, y, z) と、ベース座標系から見たテーブルの姿勢を (ϕ, θ, ψ) とする。テーブルの姿勢はオイラー角 (ϕ, θ, ψ) 、あるいはロールピッチヨー角 (ϕ, θ, ψ) から求められる回転行列 ${}^B R_T$ によって表現することができる⁶⁾。

スレーブ・マニピュレータに与えられる指令値はエンドエフェクタの先端F点のベース座標系から見た座標 (x, y, z) と、テーブルの姿勢 (ϕ, θ, ψ) である。逆運動学はこの指令値である (x, y, z) と (ϕ, θ, ψ) から、そのとき必要な各リンクの長さ l_i ($i=1 \dots 6$) を求める計算である。

ここでF点のベース座標系から見た座標 (x, y, z) をベ

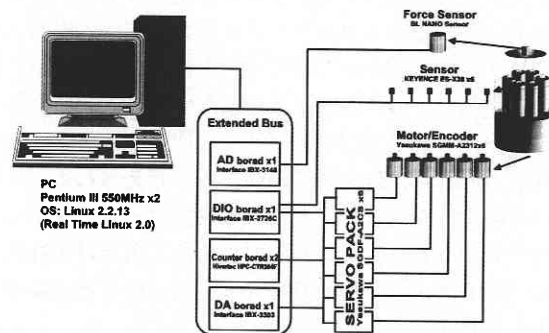


図3 スレーブ・マニピュレータシステム

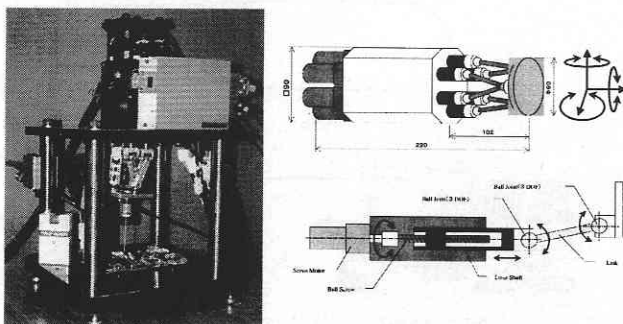


図2 スレーブ・マニピュレータの外観と構造

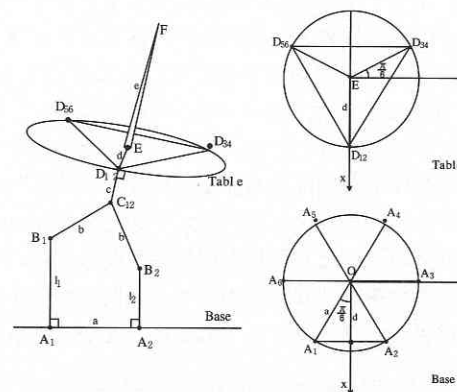


図4 パラレルリンク座標系

クトル ${}^B P_F$ で表すと、ベース座標系から見た C_{12} 点の座標を示すベクトル ${}^B C_{12} = (x_{C_{12}}, y_{C_{12}}, z_{C_{12}})$ は

$$C_{12} = {}^B P_F - {}^B E F + {}^B E D_{12} - {}^B C_{12} D_{12}, \dots \dots \dots (1)$$

で表される。 ${}^B E F$, ${}^B E D_{12}$, ${}^B C_{12} D_{12}$ はいずれもベース座標系から見たベクトルであり、テーブルの姿勢を表す回転行列 ${}^B R_T$ を用いて、

$$C_{12} = {}^B P_F - {}^B R_T ({}^T E F - {}^T E D_{12} + {}^T C_{12} D_{12}), \dots \dots \dots (2)$$

と表すことができ、ベース座標系から見た C_{12} 点の座標を示すベクトル ${}^B C_{12}$ を計算することができる。 C_{12} , C_{34} , C_{56} についてそれぞれ解くと、

$$\begin{aligned} C_{12} &= \begin{bmatrix} x_r + R_{11}d - R_{13}(e+c) \\ y_r + R_{21}d - R_{23}(e+c) \\ z_r + R_{31}d - R_{33}(e+c) \end{bmatrix} \\ C_{34} &= \begin{bmatrix} x_r - R_{11}d \sin \frac{\pi}{6} + R_{12}d \cos \frac{\pi}{6} - R_{13}(e+c) \\ y_r - R_{21}d \sin \frac{\pi}{6} + R_{22}d \cos \frac{\pi}{6} - R_{23}(e+c) \\ z_r - R_{31}d \sin \frac{\pi}{6} + R_{32}d \cos \frac{\pi}{6} - R_{33}(e+c) \end{bmatrix} \\ C_{56} &= \begin{bmatrix} x_r - R_{11}d \sin \frac{\pi}{6} - R_{12}d \cos \frac{\pi}{6} - R_{13}(e+c) \\ y_r - R_{21}d \sin \frac{\pi}{6} - R_{22}d \cos \frac{\pi}{6} - R_{23}(e+c) \\ z_r - R_{31}d \sin \frac{\pi}{6} - R_{32}d \cos \frac{\pi}{6} - R_{33}(e+c) \end{bmatrix} \dots \dots (3) \end{aligned}$$

一方、ベース座標系における B_1 点の座標はリンク長 l_1 を用いて $B_1 = (x_{B_1}, y_{B_1}, z_{B_1}) = (a \cos \frac{\pi}{6}, -a \sin \frac{\pi}{6}, l_1)$ と表すことができる。ここでベクトル ${}^B B_1 C_1$ について考えると、このベクトルの大きさはサブリンクの長さ b であり、一定であるため、

$$|{}^B B_1 C_1|^2 = (x_{C_{12}} - x_{B_1})^2 + (y_{C_{12}} - y_{B_1})^2 + (z_{C_{12}} - z_{B_1})^2 \dots (4)$$

が成立し、リンクとサブリンクの位置関係を考慮すると、

$$l_1 = z_{C_{12}} - \sqrt{b^2 - \left(x_{C_{12}} - a \cos \frac{\pi}{6}\right)^2 - \left(y_{C_{12}} - a \sin \frac{\pi}{6}\right)^2} \dots (5)$$

が得られる。これにより、リンク長 l_1 を、指令値であるエンドエフェクタの先端 F 点の座標 (x, y, z) 及び姿勢 (ϕ, θ, ψ) によって表すことができ、

$$\begin{cases} l_1 = z_{C_{12}} - \sqrt{b^2 - \left(x_{C_{12}} - a \cos \frac{\pi}{6}\right)^2 - \left(y_{C_{12}} - a \sin \frac{\pi}{6}\right)^2} \\ l_2 = z_{C_{12}} - \sqrt{b^2 - \left(x_{C_{12}} - a \cos \frac{\pi}{6}\right)^2 - \left(y_{C_{12}} - a \sin \frac{\pi}{6}\right)^2} \\ l_3 = z_{C_{34}} - \sqrt{b^2 - x_{C_{34}}^2 - \left(y_{C_{34}} - a\right)^2} \\ l_4 = z_{C_{34}} - \sqrt{b^2 - \left(x_{C_{34}} - a \cos \frac{\pi}{6}\right)^2 - \left(y_{C_{34}} - a \sin \frac{\pi}{6}\right)^2} \\ l_5 = z_{C_{56}} - \sqrt{b^2 - \left(x_{C_{56}} + a \cos \frac{\pi}{6}\right)^2 - \left(y_{C_{56}} + a \sin \frac{\pi}{6}\right)^2} \\ l_6 = z_{C_{56}} - \sqrt{b^2 - x_{C_{56}}^2 - \left(y_{C_{56}} + a\right)^2} \end{cases} (6)$$

となり、 $l_{1\sim 6}$ 、即ちエンドエフェクタ先端位置が与えられたときの直動リンクの目標値が求められる。

3.2 位置制御実験

本パラレル・マニピュレータは、リンクの長さ l に対してフィードバックによる位置制御を行っている。

パラレル・マニピュレータのリンク 1 本を用い、リンク位置制御実験を行った。位置制御の制御器は PID 制御を用い、パラメータはマニュアルで調整し、 $K_p = 85.3$, $K_I = 21.2$, $K_D = 0.0106$ とした。他の 5 本のリンクは静止させ、1 mm のステップ状の位置指令を与えた結果を図 5 に示す。

約 10 msec まで定格速度が出力され、約 40 msec で目標位置に達した。今回は PID パラメータはマニュアルで調整したが、現在でも十分な制御特性が得られていることが分かる。

微細作業を行う上で重要なのは速度よりも精度であるため、精度に関して、実験と計算によるシミュレーションを行った。モータの回転分解能はモータのロータリーエンコーダおよび直動リンクのネジピッチから、リンク換算分解能が $0.122 \mu\text{m}$ であることが分かっている。また、上述の

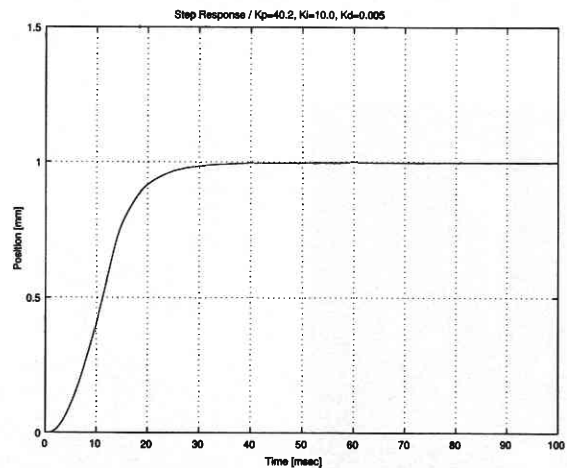


図 5 リンク位置制御実験

リンク位置制御実験から、エンコーダの読みで2パルス、リンク長に換算して誤差0.244 μm以内で制御可能であることが明らかになった。

この結果から、逆運動学計算を行い、エンドエフェクタの先端の位置を $(x, y, z, \phi, \theta, \psi) = (0[\text{mm}], 0[\text{mm}], 50[\text{mm}], 0[\text{rad}], 0[\text{rad}], 0[\text{rad}])$ を初期状態として、各変位方向に平行移動させたときのリンクの変位を計算した。この結果を表1に示す。

リンクが約0.244 μmの誤差で制御可能であることを考えると、目標精度を10 μmとした場合には誤差が約10%以内で制御可能であることが分かる。また、パラレル・マニピュレータ本体の機構は、仕様により繰り返し精度が1 μmである。したがって、本パラレル・マニピュレータは、モーションレベルで10 μmの精度で制御可能なシステムであるといえる。

4. マスタデバイス

本研究ではマスタデバイスとしてシリアルリンク機構の6自由度ハプティック・デバイスを開発した(図6)。スレーブマニピュレータは精度や剛性の点から、パラレルリンク機構を採用している。これに対し、マスタデバイスはコンパクトながら広いワークスペースを得るため、シリアルリンク機構を採用した。XYZの並進運動にリニアサーボモータを用い、X軸リニアモータの上に直接Y軸リニアモータを、Y軸リニアモータの上に直接Z軸リニアモータ

表1 エンドエフェクタ変位-リンク変位[μm]

Typ	link1	link2	link3	link4	link5	link6
1.0 (x)	0.000	0.000	0.272	0.273	0.273	0.272
1.0 (y)	0.315	-0.314	-0.157	0.157	-0.157	0.157
1.0 (z)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
10.0 (x)	0.001	0.001	2.722	2.725	2.725	2.722
10.0 (y)	3.146	-3.144	-1.571	1.574	-1.571	1.574
10.0 (z)	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00

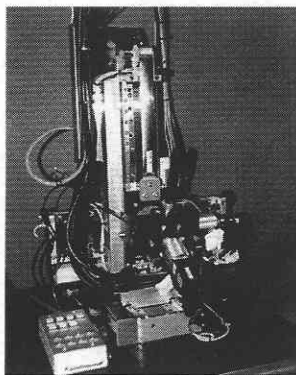


図6 マスタデバイスの外観図とリンク構造

を設置することで、コンパクトながら広いワークスペースを得るとともに無駄な摩擦やヒステリシスを排除し、応答速度を高める構造となっている。また回転3自由度についても、Z軸のリニアモータから3個のACサーボモータを接続している。6番目のモータの先に力覚センサを設置し、さらにその先は棒状の把持部分になっている。オペレータはこの棒をジョイスティックのように把持し操作する。可動範囲は平行移動のX軸、Y軸、Z軸ともに20 cm、回転はX軸、Y軸、Z軸についてそれぞれ±15 degである。

4.1 マスタデバイスシステム

制御PCおよびI/Oシステム構成はほぼスレーブ・マニピュレータと同様のハードウェアを用いている(図7)。OSはスレーブと同様にReal Time Linuxであり、制御ループはモータの仕様から2.5 kHzとした。

4.2 運動学

マスタデバイスの運動学はその構造から非常に簡単となり、XYZの並進方向はそのままリニアモータの変位であり、回転方向も姿勢をロール・ピッチ・ヨー角 (ϕ, θ, ψ) で表すと、そのままモータの回転角度となる。

4.3 フリーモーション実験

ハプティック・デバイスは、スレーブからのフォースフィードバックがない場合、即ち反力が0の場合、オペレータの動きに追従してできる限り軽く動かなければならない。したがって、その基本的特性を測定するためにフリーモーション実験を行った。以下に平行移動のX軸、Y軸、Z軸の3つのリニアモータを用い、オペレータがジョイスティック型の把持部分を握り、螺旋状に操作したフリーモーション実験結果を示す。

力のPD制御器のパラメータはマニュアルで調整し、X軸については $K_p = 12.5$, $K_D = 0.0125$, Y軸については $K_p = 15.6$, $K_D = 0.0625$, Z軸については $K_p = 4.06$, $K_D = 0$ とした。

表2から、非制御時には手で動かすことが困難である

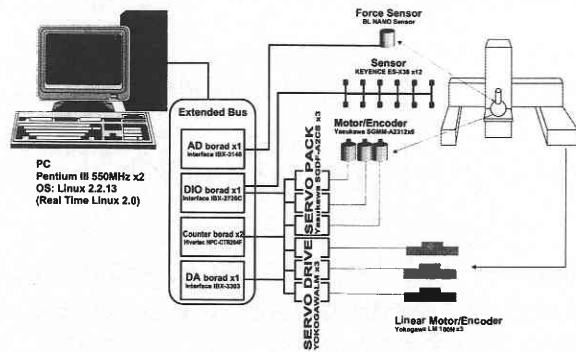


図7 マスタデバイスのシステム構成

が、制御時には比較的軽く操作できることが分かる。

デバイスの軌跡を図8に示す。軌跡はほぼ螺旋を描いているが、XY平面で軌跡をみると、滑らかな円を描いておらず、一部X方向に直線部分が見られる。これはY軸にくらべ、X軸がより軽い力で動くためである。すなわち、X軸、Y軸、Z軸に等しい大きさの力指令が入力されても、それぞれの軸によってアクチュエータの性能や摩擦、慣性などの条件が異なるため、その応答が異なっているためであると考えられる。今回の制御器は、各モータの制御特性を最が良くなるように調整を行った。しかし、今後、それぞれのモータの対力制御特性が等しくなるような制御器の設計を行う必要がある。

5. テレオペレーション

5.1 制御系

マスタデバイスと、スレーブマニピュレータをEthernetで接続し、力帰還型のバイラテラル制御系を構築した。本力帰還型バイラテラル・テレオペレーションの制御ブロック図を図9に示す。

5.2 フリーモーション実験

まず、スレーブの追従特性を調べるため、フリーモーション実験を行った。力帰還型バイラテラル・テレオペレーションシステムではスレーブ・マニピュレータはマスタ・デバイスの位置を指令値として位置制御を行い、マスタ・デバイスはスレーブ・マニピュレータの力覚センサの値を指令値として力制御を行う。

マスタ・デバイスの力に関するPD制御器のパラメータは、X軸については $K_p = 4.7$ 、 $K_D = 0.0047$ 、Y軸について

表2 デバイス操作時の力覚センサの値

モータ番号	1	2	3
制御なし [N]	10	32	14
フリーモーション制御あり [N]	1.2	1.8	2.8

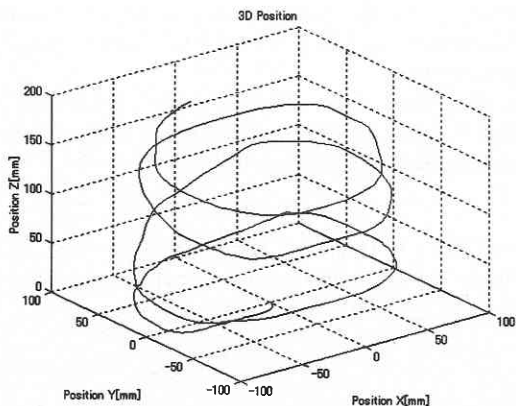


図8 マスタデバイスの変位 (3D表示)

は $K_p = 6.6$ 、 $K_D = 0.0066$ 、Z軸については $K_p = 3.0$ 、 $K_D = 0$ とした。スレーブ・マニピュレータの位置に関するPID制御器のパラメータは $K_p = 85.3$ 、 $K_I = 21.2$ 、 $K_D = 0.0106$ とした。また、位置に関するスケールングファクタ A_p を20とした。フリーモーション実験の結果を図10に示す。ここで実線がスレーブ・マニピュレータのエンドエフェクタの先端位置、破線がマスタデバイスの位置である。スレーブ・マニピュレータの位置は実際の値にスケールングファクタの20倍を乗じた値である。図10から分かるように、スレーブ・マニピュレータはマスタ・デバイスにほぼ正確に追従している一方、通信によるわずかな遅延も観測できる。

5.3 環境接触実験

スレーブ・マニピュレータをテレオペレーションによって実際の壁と接触させる実験を行った。制御系はフリーモーション実験時と同様である。また、力に関するスケールングファクタ A_f を0.6とした。接触させる物体として、硬い物体を用いることは制御系にとって非常にハイゲインの力入力と等価になり不安定になりやすい。したがって、金

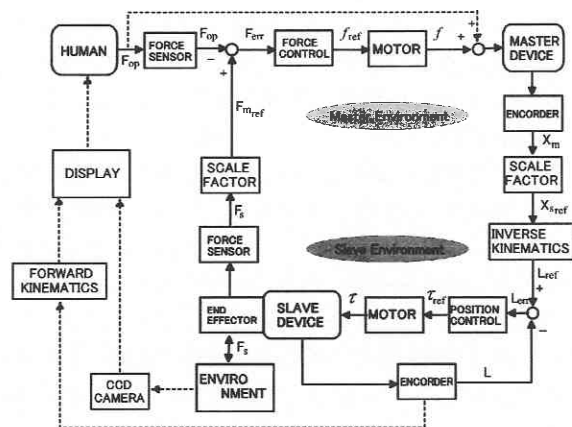


図9 テレオペレーションの制御ブロック図

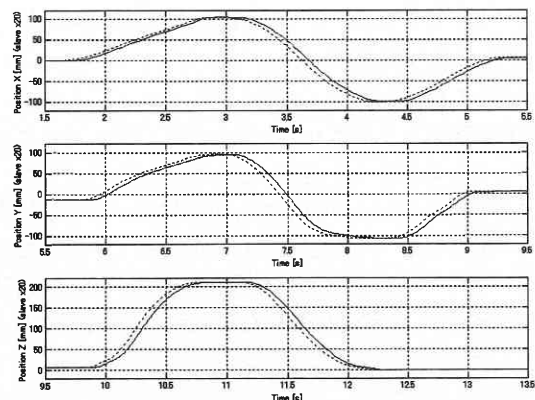


図10 テレオペレーションによるフリーモーション実験

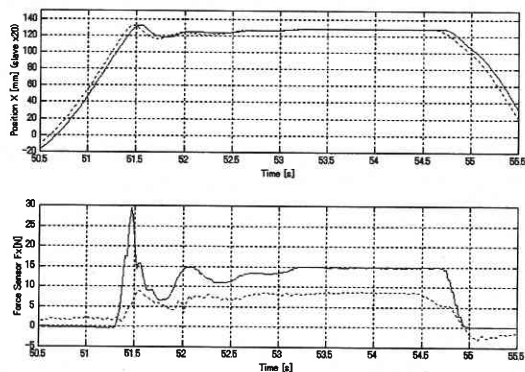


図 11 テレオペレーションによる壁接触実験

属塊表面に厚さ約 5 mm の固いスポンジを緩衝材として張り付けたものを接触物体として用いた。壁が YZ 平面に平行になるように金属の塊を置き、X マイナス方向からテレオペレーションによってスレーブ・マニピュレータを接触させた。その結果を図 11 に示す。上段が各デバイスの位置、下段が力覚センサの値である。ともに実線がスレーブ・マニピュレータ、破線がマスタデバイスの値を示している。

スレーブ・マニピュレータの力センサの値が 51.3 sec 付近から急激に大きな値を示しており、この時点でスレーブ・マニピュレータが壁に接触し始めたことを示している。この力情報がマスタ・デバイスにフィードバックされ、オペレータに接触を伝えていることが分かる。実際の操作感でも、マスタ・デバイスを通して、スレーブ側の物体の感触を得ることができ、さらに、物体表面をなぞる、物体を押すと言った感触も感じることができた。しかしながら、マスタ・デバイスを速く動かすスレーブマニピュレータを勢い良く物体に接触させると、通信の遅延により非常に大きな力がフィードバックされ振動的になることも確認された。

6. ま と め

本稿では、マイクロロボットの製作や微細部品の加工・検査を目的とした微細作業支援システムの開発について、第一段階としてのマスタ・スレーブ・マニピュレータの運動学解析、制御およびこれらをネットワークを通して接続したテレオペレーション実験について述べた。マスタ・スレーブともに、当初の目的である微細作業を行うのに十分な特性が得られた。しかしながら、本研究で開発した独自のスレーブマニピュレータは今後、ワークスペース解析、動力学解析を行い、最適な制御系の設計を行う必要がある。

また、マスタデバイスは摩擦補償、重力補償等を制御系に組み込み、オペレータにとってより自然な操作感を提供できるハプティック・インターフェースを構築する必要がある。

今回はテレオペレーションの制御系に関しては単純な力帰還型バイラテラル・テレオペレーションを行い、本システムにおけるマイクロテレオペレーションの実現可能性を示すに留まった。しかしながら今後は、ネットワークにおける遅延を考慮した微細作業に適したテレオペレーション制御系を設計する必要がある。力帰還型バイラテラル・テレオペレーションの安定性を高める制御方式には、エネルギーの流れを考慮した制御系⁷⁾や、フィードフォワードを付加する方法⁸⁾などがあり、今後これらを検討した上で、マイクロテレオペレーション特有のスケーリングファクタによる影響も考慮にいった制御系を導入する。

(2000年3月30日受理)

参 考 文 献

- 1) Kazuhiro Kosuge, Tomotaka Itoh, Toshio Fukuda, and Manabu Otsuka, "Tele-manipulation System Based on Task-oriented Virtual Tool", IEEE International Conference on Robot and Automation, pp. 351-356, 1995.
- 2) B. Hannoford, R. Anderson, "Experimental and Simulation Studies of Hard Contact in Force Reflecting Teleoperation", Proceedings of 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 584-589, 1988.
- 3) E. F. Fichter, "A Stewart Platform-Based Manipulator: General Theory and Practical Construction", The International journal of Robotics Research, Vol. 5-2, pp. 157-182, 1986.
- 4) Kevin Cleary, Tatsuo Arai, "A Prototype Parallel Manipulator: Kinematics, Construction, Software, Workspace Results, and Singularity Analysis", Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 566-571, 1991.
- 5) 武田, 舟橋, "パラレルマニピュレータにおける運動伝達特性", 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 59, No. 560, pp. 1142-1147, 1993.
- 6) 吉川, "ロボット制御基礎論", コロナ社, 1988.
- 7) Mark W. Spong, "Communication Delay and Control in Telerobotics", 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 6, pp. 803-810, 1993.
- 8) 松日楽, 浅倉, 番場, "フィードフォワードを付加した力帰還型バイラテラル制御", 平成2年日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 229-230, 1990.

¹ ハプティック (haptic): 「触覚 (に基づく)」の意。ハプティックインターフェース: 使用者に対して力覚をフィードバックすることのできるインターフェース