

## 力覚提示機能を有する遠隔作業システムに関する研究 (第2報)

久富 茂樹 千原 健司 山田 宏尚\* 武藤 高義\*

## Research on a Force Feedback Remote Control System ( )

Shigeki KUDOMI Kenji CHIHARA Hironao YAMADA\* Takayoshi MUTO\*

あらまし 研磨、検査などの工程においては、作業者の高度な熟練と経験を必要とすることから、作業の自動化は遅々として進んでいないのが現状である。また、これらの作業は粉塵、高温、騒音など劣悪環境下での作業が多いことから作業環境の改善が望まれている。そこで、本研究では研磨作業をはじめとする作業者の力覚(力覚)が必要な作業を対象とした力覚提示機能を有する遠隔作業システムを開発することでこの課題の解決を試みる。本報では、まず、作業者に力覚を提示する装置である力覚ディスプレイ(2種類)について、その力覚提示機能を比較検討した。仮想ばねの硬さを識別する実験を行った結果、それぞれの特徴が明らかになった。次に力覚ディスプレイとパラレルリンク型油圧マニピュレータとでマスタ・スレーブ制御系を構成し、スレーブに研磨装置を取り付けた遠隔作業システムを構築した。本システムを用いて、作業者に力覚を提示しながら、実際に研磨作業を行うことができた。

キーワード 力覚ディスプレイ, 研磨, 遠隔操作, 弁別閾, 油圧, マスタ・スレーブ, パイラテラル制御

## 1. まえがき

近年、各種製造業においては、多様な自動機械が導入されたことにより、生産の合理化・効率化の進展が著しい。しかしながら、研磨、検査などの工程においては、作業者の高度な熟練と経験を必要とすることから、作業の自動化は遅々として進んでいないのが現状である。また、これらの作業は粉塵、高温、騒音など劣悪環境下での作業が多いことから作業環境の改善が望まれている。この課題の解決には、作業者を作業現場から隔離することが可能な遠隔操作技術の導入が有効であると考えられる。そこで、本研究では研磨作業をはじめとする作業者の力覚(力覚)が必要な作業を対象とした力覚提示機能を有する遠隔作業システムの開発を目的とする。また、このような実感伝送機能を有する遠隔操作は作業環境の改善に効果があるだけでなく、建設機械や工作機械の操作訓練、技能や技術の伝承においても有効であると考えられている<sup>[1]</sup>。

図1にシステム概念図を示す。本システムはマスタとスレーブの二つのマニピュレータによって構成されている。作業者はマスタを操作することでスレーブを駆動しワークに対して作業を行う。このときスレーブが受けた作業反力はマスタを介して作業者に提示される。このマスタのように人に力覚を提示することのできる装置

は力覚ディスプレイと呼ばれている。これまでに研究開発されている力覚ディスプレイの多くは、制御のしやすさ、比較的高い応答性などの理由から電動アクチュエータを用いている<sup>[2]</sup>。しかしながら、電動アクチュエータは過負荷に弱く、力/質量比が小さいため、作業者への大きな力の提示と装置の小型化を両立させることが難しい。そこで、著者らは比較的大きな力、高剛性を必要とする作業に適した力覚ディスプレイとして、油圧式力覚ディスプレイを開発してきた<sup>[3,4]</sup>。

本報では、開発した油圧式力覚ディスプレイと電動アクチュエータを用いた力覚ディスプレイの一つであるPHANTOM 1.5/6DOF (SensAble Technologies社製)を用い

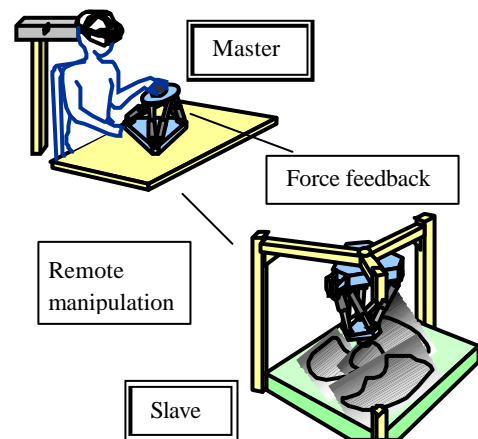


図1 遠隔作業システム

\* 岐阜大学工学部

て、作業者への力覚提示について比較検討する。また、スレーブに研磨装置を取り付けた遠隔研磨システムを構築し、本システムを用いて実際に研磨作業を行う。

## 2. 力覚ディスプレイ

以下に本研究で用いた2種類の力覚ディスプレイの概要を示す。

### 2.1 油圧式力覚ディスプレイ

図2に油圧式力覚ディスプレイの外観を示す。また、表1に主な仕様を示す。本力覚ディスプレイはエンドエフェクタとベースの間にボールジョイントを介して6本の油圧シリンダを配置したスチュワート型の平行リンク機構を採用している。この機構により、可動範囲は狭くなるものの、コンパクトでありながら6自由度の運動を実現できる。また、油圧シリンダを用いることで、剛性が高く、大きな力の提示が可能である。前報では、外乱オブザーバによる外乱推定補償制御あるいは位置目標値生成と位置フィードバック制御を行うことで、各シリンダの動特性差や制御弁の中立点ずれを補償し、操作性の改善を図った<sup>[4]</sup>。本報においてもこれらの補償制御を用いた。

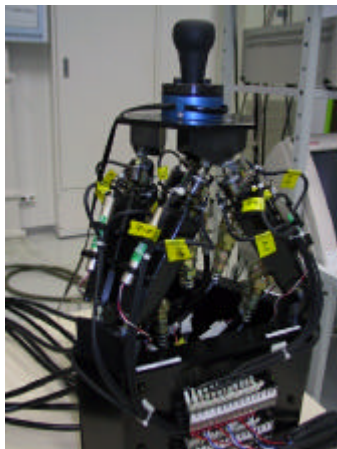


図2 油圧式力覚ディスプレイ

表1 油圧式力覚ディスプレイの主な仕様

位置入力自由度	6
力覚提示自由度	6
最大操作力	100 [N]
出力	各シリンダ 100[N]以上
可動範囲	
・ ロール	28 [deg]
・ ピッチ	27 [deg]
・ ヨー	70 [deg]
・ サージ	79.5 [mm]
・ スウェー	72 [mm]
・ ヒープ	46 [mm]

### 2.2 PHANTOM

PHANTOM 1.5/6DOF(SensAble Technologies社)はDCモータを用いた力覚ディスプレイであり、6自由度の入力と6自由度の出力を備えている。図3にその外観、表2に主な仕様を示す。操作者はペン型のグリップ部を自由に動かすことで位置・回転座標の入力を行うことができる。また、DCモータとワイヤを用いて、ペン型グリップ部に力とモーメントを発生させることで操作者へ力覚を提示することができる。PHANTOMの制御には専用の制御用ライブラリであるGHOST SDK (SensAble Technologies社)を用いた。

## 3. 力覚提示による仮想ばねの識別

それぞれの力覚ディスプレイの機械的特性は2章で述べたとおりであるが、作業者に対する力覚提示機能は心理物理実験を通してその能力を調べる必要がある。本研究では、各力覚ディスプレイを介してどの程度仮想ばねの硬さの違いを識別できるか調べることで、力覚提示機能の比較を行う。

### 3.1 実験手順

各力覚ディスプレイとも、原点から鉛直下向きに操作した場合に、式(1)で表される反力が発生するように仮想的なばねを設定した。



図3 PHANTOM

表2 PHANTOMの主な仕様

位置入力自由度	6
力覚提示自由度	6
最大提示力/トルク	
・ 各軸方向の並進	8.5 [N]
・ 各軸周りの回転	0.17 ~ 0.52 [Nm]
可動範囲	
・ ロール	335 [deg]
・ ピッチ	260 [deg]
・ ヨー	335 [deg]
・ サージ	195 [mm]
・ スウェー	375 [mm]
・ ヒープ	270 [mm]

$$f_r = k_s \cdot x_f \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 $f_r$ ：仮想ばねからの反力[N]、 $k_s$ ：仮想ばねのばね定数[kN/m]、 $x_f$ ：鉛直下向き方向の原点からの変位量[m]である。被験者は力覚ディスプレイを鉛直下向きに操作すると仮想ばねの硬さを知覚することができる。

最初に基準となる仮想ばねのばね定数を決めておき、被験者に提示する。次に比較する仮想ばねを提示し、基準の仮想ばねと比べて、「硬い」「同じ」「柔らかい」の3件法により回答してもらった。比較する仮想ばねのばね定数をある一定の間隔で変化させながら、この手順を繰り返した。実験は、比較する仮想ばねのばね定数を基準の仮想ばねと同じものから始めて徐々に大きくしていき、初めて「硬い」との回答が出現した時点で終了し、そのときのばね定数の差を記録する上昇系列と、比較する仮想ばねが明らかに「硬い」と知覚されるばね定数から徐々に小さくしていき、初めて「同じ」もしくは「柔らかい」と回答のあった時点で終了し、その1回前のばね定数の差を記録する下降系列を用いた。各系列を4回ずつランダムに計8回の測定を行った。基準となる仮想ばね定数は、0.2[kN/m]、1.0[kN/m]の2水準について測定を行った。下降系列の場合に最初に提示する比較の仮想ばね定数は、それぞれの場合で、0.4[kN/m]、1.5[kN/m]とした。また、比較する仮想ばね定数の変化量を常に一定にした場合、被験者が提示回数などから仮想ばねの硬さを推測し、データに作為性が紛れるおそれがあるため、変化量は実験毎に一定の範囲内でランダムに変えた。被験者は右利きの男性3名で、利き手で操作してもらった。

3.2 実験結果および考察

各実験において、全被験者の上昇系列と下降系列の結果を平均してばね定数の弁別閾(変化が知覚できる量)とした。図4に実験結果を示す。エラーバーは全データの標準偏差を示している。なお、基準の仮想ばね定数が1.0[kN/m]の場合、PHANTOMでは実験中にしばしばモータを保護するためにソフトウェア上で安全機構が作動し実験を遂行することができなかった。

基準ばね定数が0.2[kN/m]の場合、PHANTOM、油圧式力覚ディスプレイともに0.1[kN/m]程度の弁別閾であり、標準偏差も同程度であった。このことから、0.2[kN/m]という比較的柔らかいばねの提示は両力覚ディスプレイで同程度の硬さ感覚提示性能があることがわかった。しかしながら、PHANTOMは仮想ばねに接触した瞬間(ばねに当たった感覚)が比較的良く知覚できるのに対し、油圧式力覚ディスプレイでは、柔らかい仮想ばねに対して、徐々に力を加えていけば仮想ばねからの反力を知覚できるものの、ばねに接触した瞬間の知覚は困難であるとの意見があった。油圧式力覚ディスプレイはバックドライバビリティ性を補償するために力センサで検出した操作者の力信号に基づき駆動制御を行っているが<sup>[5]</sup>、接触時点において力覚ディスプレイを駆動するための力と

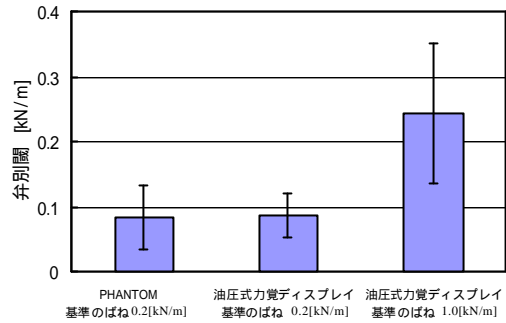


図4 仮想ばね定数に対する弁別閾

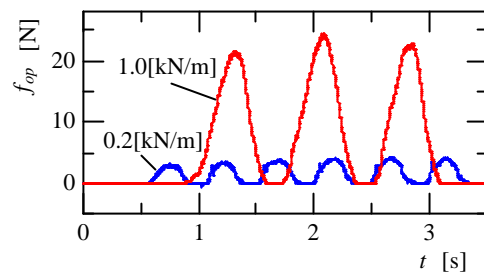


図5 実験中の被験者の操作力

ばねに接触したときの反力が混在しており、被験者がばねに接触した瞬間の知覚をすることは困難であると考えられる。

基準の仮想ばね定数が1.0[kN/m]の場合、油圧式力覚ディスプレイを用いた場合の弁別閾は、0.25[kN/m]程度であり、基準の仮想ばね定数が0.2[kN/m]の場合に比べて約2.5倍になっている。標準偏差も大きくなっており、人間の硬さに対する知覚は、硬い対象物であるほど曖昧になってくることが確認できた。この結果は、ウェーバー・フェヒナーの法則およびべき乗則<sup>[6]</sup>で知られているように、生体の感覚は刺激となる物理量の対数もしくはべき乗を知覚するという性質にあてはまるものであった。また、油圧式力覚ディスプレイを用いた実験中に被験者が加えている力の一例を図5に示す。被験者は、ばねの硬さを識別するためにばねを押す力を強めたり弱めたりしており、ばね定数が大きい場合ほど大きな力を加えていることがわかった。一方、PHANTOMを用いた場合も、被験者はばね定数が1.0[kN/m]の比較的硬いばねに対しては大きな力を加えて硬さを識別しようとしていることが推察できる。しかしながら、PHANTOMの最大提示力を越えるような大きな力に対しては、モータを保護するための安全機構が作動し、その時点でシステムが停止してしまった。そのため、被験者に大きな力を加えすぎないように指示したが、小さな力では、比較の仮想ばね定数を1.5[kN/m]以上にしても基準の仮想ばねとの差を識別することは困難であり、1.0[kN/m]以上のばね定数では

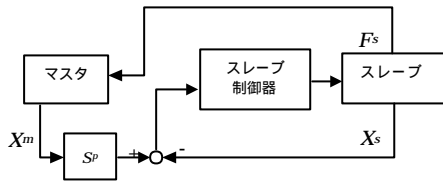


図6 力逆送型バイラテラル制御ブロック図

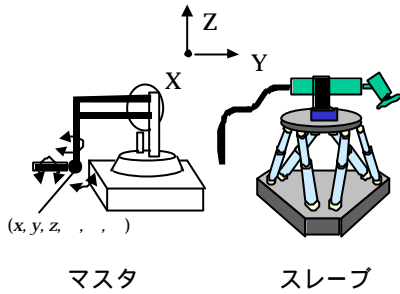


図7 座標系

すべて剛体に接触しているように感じているようであった。

以上の結果より、ばねの硬さを識別しようとした場合、比較的柔らかいばねに対してはPHANTOMが、比較的硬いばねに対しては油圧力覚ディスプレイが有効であることが確認できた。

#### 4. 遠隔研磨システム

小型研磨装置による研磨作業を対象として、力覚ディスプレイをマスタ、作業用マニピュレータをスレーブとするマスタ・スレーブ制御系を構成し、これらをバイラテラル制御（位置と力による双方向の制御）することで遠隔研磨システムを実現する。これまでに、油圧式力覚ディスプレイとそれと同形状の油圧マニピュレータを用いたマスタ・スレーブ制御系を構築してきたが<sup>[3]</sup>、小型研磨装置による作業は、大きな力は必要としないことと、研磨装置がワークに接触したときの接触感覚が重要であるので、本システムでは、3章での検討結果に基づき、マスタにはPHANTOMを用いて、マスタ・スレーブ制御系を構成する。そして、ばね負荷での操作実験および小型研磨装置による研磨実験を行うことでシステムの操作性を確認する。

##### 4.1 PHANTOMを用いたマスタ・スレーブ制御

バイラテラル制御法はこれまでにいくつかの方法が提案されているが、マスタとして用いるPHANTOMには操作者の加えた力を検出する力センサが取り付けられていないため、マスタに力センサが無くても構成できる力逆送型を採用した。図6にブロック図を示す。スレーブはマスタの変位に追従するように位置のサーボ系が構成され、マスタはスレーブの力センサで検出された反力を発生させ操作者に提示を行う。また、運動伝達比（ $S_p$ ）を

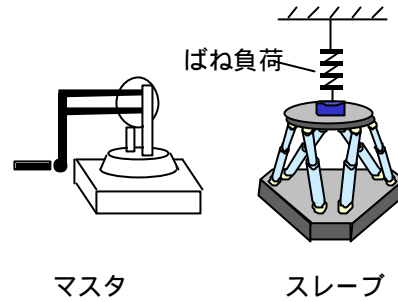


図8 ばね負荷での操作実験

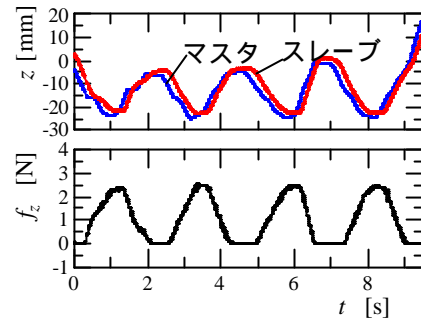


図9 ばね負荷での操作実験結果

導入することでシステムの安定性を図った。本システムではマスタとスレーブのリンク機構が異なるため、以下の方法で位置指令値の変換を行った。なお、座標系は図7に示すように設定した。マスタからはグリッパ回転中心部の位置（ $x, y, z$ ）とグリッパ回転角（ $\theta, \phi$ ）が得られる。この位置・姿勢の情報とスレーブの幾何学的モデルからパラレルリンク機構の逆運動学計算を行うことでスレーブの各油圧シリンダへの位置指令値を算出した。また、スレーブ制御器にはPD制御則を採用した。マスタであるPHANTOMに対しては、GHOSTを介してスレーブの力センサで検出された力/モーメントを指令することで、力覚提示プロセスが実行され、操作者に力覚を提示することができる。

##### 4.2 ばね負荷での操作実験

図8にばね負荷での操作実験システムを示す。スレーブの力センサにばね負荷（ばね定数：0.2[kN/m]）の一端を取り付け、もう一端を上部のフレームに固定した。バイラテラル制御における運動伝達比（ $S_p$ ）は1に設定した。また、マスタへの反力提示はZ軸方向のみとした。マスタをZ軸方向に操作し、ばね負荷に対して操作を行ったときのマスタおよびスレーブのZ軸方向の変位量およびZ軸方向の力を図9に示す。力に関しては、マスタで実際に発生している力を取得することはできないので、スレーブの力センサで検出した力（マスタへの指令値）のみを図示した。マスタからの位置指令値におおむねスレーブが追従して動作しており、力もばねの伸び量に比例して検出されている。本実験により、ばねが伸びることによって生じる反力をマスタによって操作者に提示することができた。

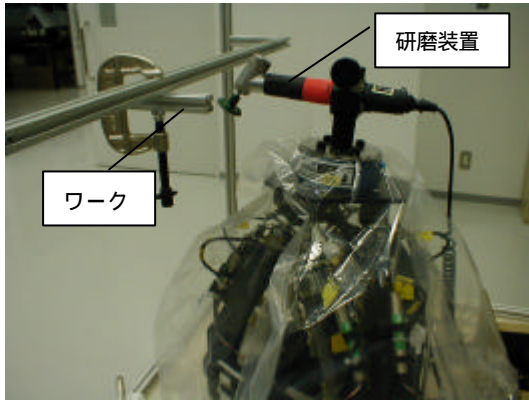


図10 研磨作業実験

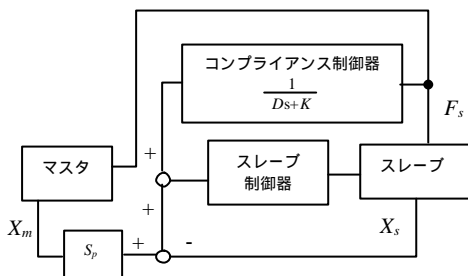
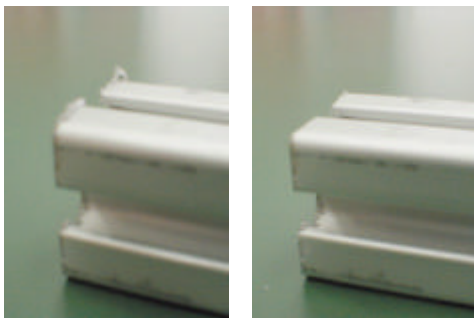


図11 コンプライアンス制御を加えた力逆送型パラレル制御ブロック図



研磨前 研磨後

図12 遠隔研磨システムによる研磨

#### 4.3 研磨作業の実験

図10に示すようにスレーブの6軸力センサ上に小型研磨装置(M11GA:モニター株)を取り付け、研磨作業が行えるようにした。ワークにはアルミのフレーム材を用い、切断面のバリ取り研磨を行う。このような接触作業にはコンプライアンス制御が有効であるとされており<sup>[7]</sup>、本研究においても、力逆送型パラレル制御系にコンプライアンス制御系を加えることにする。図11に制御ブロック図を示す。この方法は、接触によって生じた反力を変位に変換することで、ばねおよびダンパ的な効

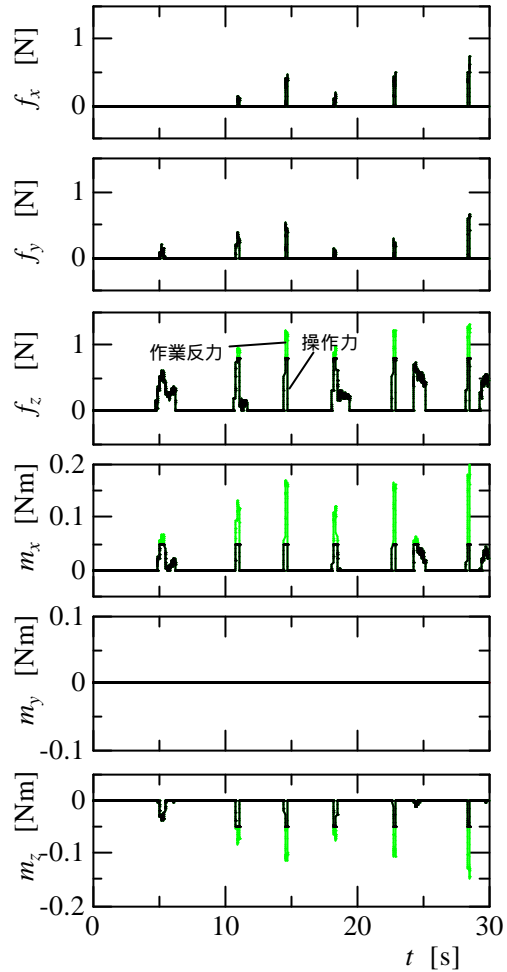


図13 研磨作業時の作業反力と操作者への提示力

果を持たせ、安定した接触作業を実現しようとするものである。運動伝達比は操作のしやすさとシステムの安定性を考慮して0.5とした。また、マスタで必要以上に大きな反力が発生すると操作の妨げとなることから、提示力は0.8[N]、提示モーメントは0.05[N・m]の上限を設定した。さらに、6軸力センサで検出した高い周波数成分を提示しようとするマスタで振動が生じ、操作性を損なったため、ローパスフィルタ(カットオフ周波数31.25[Hz])を通した後の力をマスタで提示することにした。

以上のシステム構成および制御法を用いて研磨作業を行った。図12にバリ取り研磨を行った結果を示す。また、図13に研磨作業時の操作者への提示力およびスレーブの力センサで検出された作業反力を示す。マスタへの指令値を操作者への提示力として図示しているので多くの部分で作業反力と提示力は重なって描かれているが、設定した上限を超える作業反力については上限の力が操作者に提示されている。今回行った作業は、研磨装置を上方からワークに対して押し当てる動作であったため、Z軸方向の力( $f_z$ )、X軸周りのモーメント( $m_x$ )およびZ軸周りのモーメント( $m_z$ )に大きく力が発生していた。図14に

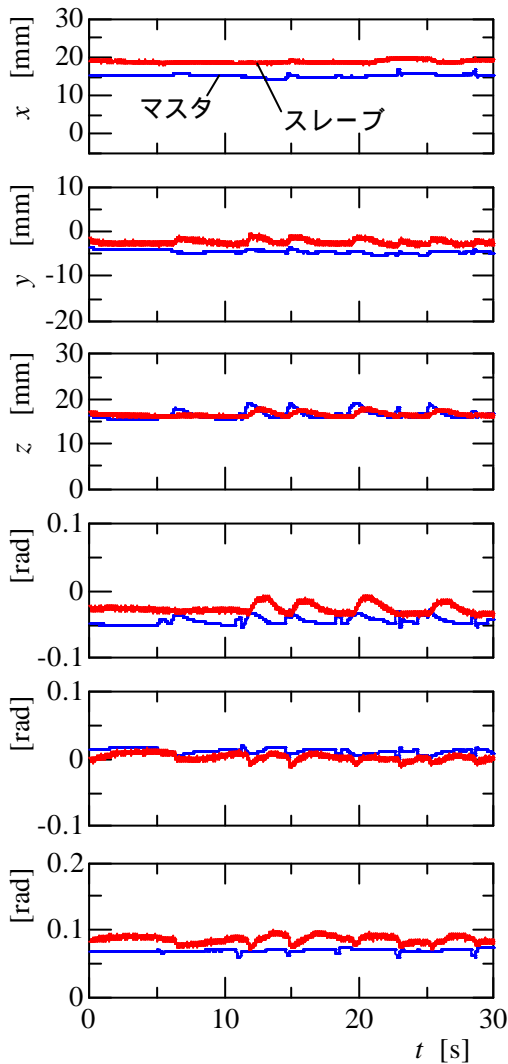


図14 研磨作業時のマスタおよびスレーブの位置・姿勢

マスタおよびスレーブの位置・姿勢を示す。なお、マスタに関しては、運動伝達比を掛けた後の位置・姿勢を明示している。接触時のシステムの安定性を考慮し、スレーブ制御器のゲインを小さく設定したため、位置追従性はあまり良好ではなかった。実際に操作してみた感覚は、操作には慣れが必要で、ゆっくりとした速度で作業を行えば接触時の反力を感じ取れるが、操作速度を大きくすると、現在のコンプライアンス制御の設計では、ワークへの接触と同時に振動して系が不安定になり操作が困難であった。直接作業を行う場合に比べて、より慎重な操作が必要であり、実用的なシステムの構築に課題を残すことになった。また、評価は行っていないが、今回の作業においては、6自由度すべての力・モーメントを提示するよりも、Z軸方向の力のみを作業者に提示したほうが操作しやすく感じた。作業に応じた適切な力覚提示の方法について評価していくことも必要である。

## 5. まとめ

本研究では、力覚提示機能を有する遠隔作業システムの開発を目的として、まず、著者らがこれまでに開発した油圧式力覚ディスプレイと市販の力覚ディスプレイであるPHANTOMを用いて、仮想ばねによる力覚提示機能を心理物理実験により比較検討した。ばねの硬さを識別しようとした場合、比較的柔らかいばねに対してはPHANTOMが、比較的硬いばねに対しては油圧力覚ディスプレイがそれぞれ有効であることが確認できた。次に、PHANTOMをマスタ、平行リンク型油圧マニピュレータをスレーブとするマスタ・スレーブ制御系を構成し、スレーブに研磨装置を取り付け、実際に研磨を行った。ゆっくりとした速度で作業を行えば力感覚を感じ取ることができたが、操作には慣れが必要であり、直接作業に比べて十分であるとは言えない。実用的なシステムを構成するためには安定したシステム動作を行う制御手法とシステム設計が必要である。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、機械設備購入のため補助金を頂いた日本自転車振興会に深く感謝いたします。

## 文 献

- [1] 光石衛, 畑村洋太郎, “ S C Sを用いた操作実感伝送による遠隔操作と技術伝送システムの構築”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'97, pp.1001-1002, 1997.
- [2] G.C.Burdea, "Force and Touch Feedback for Virtual Reality", Wiley-Interscience, 1996.
- [3] 光井輝彰, 久富茂樹, 飯田佳弘, “ 力覚ディスプレイによるマスタスレーブシステムの開発”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告, No.1, pp.53-58, 2000.
- [4] 久富茂樹, 千原健司, 山田宏尚, 武藤高義, “ 力覚提示機能を有する遠隔作業システムに関する研究(第1報)”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告, No.2, pp.25-28, 2001.
- [5] 久富茂樹, 丹羽義典, 山田宏尚, 武藤高義, “ 平行リンク型力覚ディスプレイの開発(油圧または空気圧サーボ系による力覚ディスプレイの基礎的検討)”, 平成11年春季フルイドパワーシステム講演会講演論文集, pp.37-39, 1999.
- [6] 大山正, 今井省吾, 和氣典二, “ 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック”, 誠信書房, 1994.
- [7] 日本ロボット学会編, “ ロボット工学ハンドブック”, コロナ社, 1990.