

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

光井 輝彰* 久富 茂樹* 飯田 佳弘*

Development of Master Slave Manipulator using Force Display

Teruaki Mitsui*, Shigeki Kudomi* and Yoshihiro Iida*

あらまし 本研究では、独自の力覚検出機構を備え、6本の油圧アクチュエータ(シリンダ)によりパラレルリンクを構成する力覚ディスプレイ(マニピュレータ)を製作した。このマニピュレータでは、エンドエフェクタに発生する力から各シリンダに必要な駆動力を計算により求めるのではなく、6本のシリンダに取り付けた力覚センサにより求めた情報を利用して、マニピュレータの制御を行うことができる。この力覚センサの情報を利用して、操作者の加えた力情報に従いマニピュレータを動作させるマスタマニピュレータとしての利用の他、作業中の力情報を検出可能なスレーブマニピュレータとしての利用方法が可能である。本研究ではこのマニピュレータを2台制作し、ネットワークで接続することで力覚提示型のマスタスレーブシステムを製作した。システムの制御はRT-linuxを採用してPCからリアルタイムで行った。制御の結果から、マスタマニピュレータの操作を比較的小さな力で行うことができたが、シリンダ特性の調整方法や制御手法について検討課題が考えられた。

キーワード 力覚, 油圧, パラレルリンク, マスタスレーブ, RT-linux

1. はじめに

製造業の生産工程では、各工程に適した自動機械の開発、利用が進み、生産効率を上げてきたが、自動化が困難な作業は、手作業で行っている。また、生産現場以外でも、災害復旧や原子力発電所などにおける人の入り込めない環境や危険な場所での作業において、ロボットを利用した遠隔操作の試みがなされている[1]。本研究ではこのような遠隔操作において、作業反力(力覚)を操作者に返すことで、微妙な力加減を可能にし、高い操作性を実現するための手法として、パラレルリンク型力覚ディスプレイ[2]の遠隔操作への応用を試みた。

図1にパラレルリンク型力覚ディスプレイを応用した遠隔操作の概念図を示す。操作者は作業現場から離れた環境で、作業環境の状態を確認しながら、マスタマニピュレータの操作を行う。マスタマニピュレータはスレーブマニピュレータへの指示装置であると同時に、スレーブマニピュレータの受ける作業反力をフィードバックする力覚ディスプレイとして機能する。スレーブマニピュレータは作業用の工具が取り付けられ、マスタマニピュレータの動きに追従して作業を行い、作業中に受ける反力の検出を行う。

本稿では図1と同様な6軸パラレルリンク機構の油圧

アクチュエータ(シリンダ)で構成した同形状のマニピュレータを2台製作し、それらをネットワークを介して接続することで遠隔操作が可能な力覚提示型のマスタスレーブシステムを製作する。

2章では今回製作した油圧マニピュレータの詳細について述べる。3章では試作した遠隔操作システムについて述べ、4章では各マニピュレータのバイラテラル制御について、5章ではその結果を示すととも今後の課題とシステムの改良点を考察する。

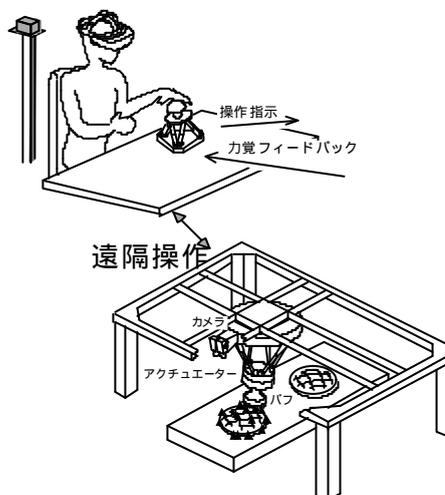


図1 力覚提示型遠隔操作

Fig.1 Remote Manipulation using Force Display

*メカトロ応用部

Mechatronics Division

2. 油圧マニピュレータ

2.1 マニピュレータ部

油圧マニピュレータの外観と構成を図2に示す。

マニピュレータの機構は、スチュワートプラットホーム型[3]パラレルリンクを採用した。この機構により可動範囲は狭くなるものの、コンパクトなメカニズムでありながら高い精度と剛性を実現することができる。本マニピュレータではエンドエフェクタとBASEの間を、ボールジョイントを介して6本の油圧シリンダ（カヤバ工業株式会社製：ストローク40mm，最大使用圧力5MPa）で接続しリンク機構を構成した。表1に可動範囲を示す。

各シリンダの変位は、シリンダに取り付けたポテンシオメータ（株）緑測器）によりシリンダロッド先端までの長さを測長して求める。また、シリンダロッド先端とボールジョイントの間にはひずみゲージを用いた力覚センサを取り付け、シリンダに加わる軸方向の力の検出を可能にする。

エンドエフェクタはマニピュレータを入力装置としても出力装置としても使用することを考慮し、グリップ部分を脱着式にする。また、この部分に加わる力の検出用に6軸力センサ（ニッタ株式会社）を使用する。

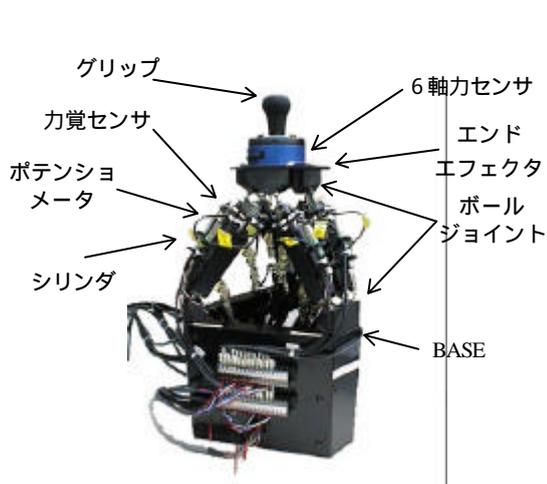


図2 油圧マニピュレータ

Fig.2 Hydraulic Manipulator

表1 可動範囲

Table 1 Motion Range

| 動揺名 | 可動範囲 |
|------|----------------------------|
| ロール | $\pm 14^\circ$ |
| ピッチ | $-13^\circ \sim +14^\circ$ |
| ヨー | $\pm 35^\circ$ |
| サージ | $-44.0 \sim 35.5\text{mm}$ |
| スウェー | $\pm 36\text{mm}$ |
| ヒープ | $-23.5 \sim 22.5\text{mm}$ |

2.2 油圧回路

油圧回路図を図3に示す。油圧ユニット（カヤバ工業株式会社製：最高使用圧力13.7MPa，最大流量25.5 l/min）から供給される油（一般鉱物油 ISOVG46 相当）は減圧弁で設定圧力まで減圧されたのち、比例電磁弁によりシリンダに供給される。比例電磁弁では電流指示により指示した圧力差を、シリンダの各ポート間に生じるように油の流れを制御する。このシリンダの各ポート圧力の検出には圧力センサ（カヤバ工業株式会社製：対ノイズ型 SPAN-5）を使用する。

2.3 油圧マニピュレータシステム

油圧マニピュレータの制御をPCから行えるように、図4に示すようなシステムの構成を用いた。

マニピュレータの制御は6本のシリンダの伸縮を調整する比例弁の制御により行なう。PCからD/Aボード（CONTEC: DA12-6LC(PC)）を介してアンプユニットに入力された電圧信号はここで電流値に変換されて比例弁に出力される。

マニピュレータの姿勢や加わる力を検出するための各センサの情報はA/Dボード（CONTEC: AD12-16U(PCI)E）および専用のレシーバボード（6軸力センサ用）を介してPC上に取り込まれる。

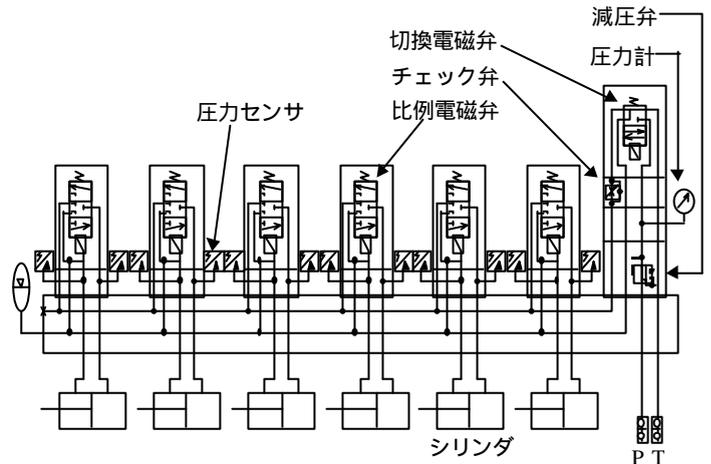


図3 油圧回路

Fig.3 Hydraulic Circuit

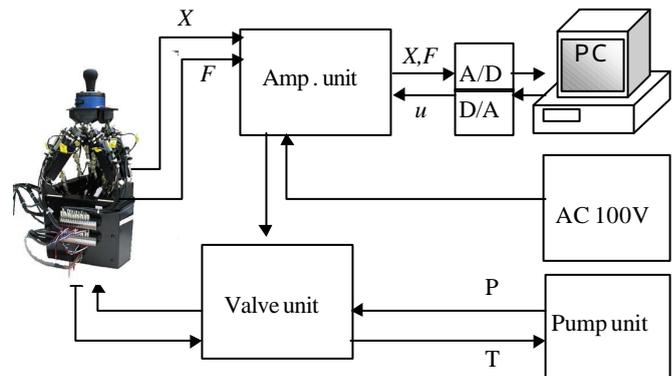


図4 油圧マニピュレータ制御システム

Fig.4 Diagram of Hydraulic Manipulator System

3. マスタスレーブシステム

3.1 システム構成

図5に遠隔操作システムの構成を示す。

それぞれのマニピュレータは PC (CONPAQ:DESKPRO pentium 600MHz) 上のプログラムにより制御され、単独での動作、あるいはネットワークを介した遠隔操作を可能にする。ここでは汎用性を持たせるためにサーバプロセスとして通信を行っている。これによって、ネットワーク上の任意位置から接続し、入力装置あるいは出力装置として利用することが可能となる。マスタスレーブマニピュレータとして利用する場合には、間にクライアントプロセスを用意して両マニピュレータを接続する必要があるが、今回はこれを中継ステーションで行う。ここではデータを中継するだけでなく、各マニピュレータの状態表示や制御データの保存などを行っている。また、将来的に画像提示プロセスを行うことを考えている。

3.2 システムのリアルタイム制御

システムのリアルタイム制御を行うために、リアルタイム OS (RT-Linux Version 0.9 Release9F) 上で制御プログラムを開発した。図6にプログラムの構成を示す。図に示すように、制御プログラムの構成は一つのリアルタイムタスク (RT_TASK) とそのハンドラ、および二つのユーザプロセス (App1, App2) から成っている。

RT_TASK は 1ms 周期でマニピュレータの各種センサの情報を取り込み、各シリンダに必要な入出力を行う。App1 とは FIFO を介して通信し、取り込んだセンサ情報を書き込み、シリンダへの出力データを読み取っている。

App1 では RT_TASK の START, SUSPEND のコマンドをハンドラに渡すほか、制御に必要な計算を行う。中継ステーションとの通信で得た相手のマニピュレータの情報と FIFO から読み取った制御対象であるマニピュレータの情報を利用して、各シリンダを駆動するためのデータを計算し、FIFO に書き込む。App1 での処理の流れを図7に示す。PC の計算量やネットワーク負荷が増加すると RT_TASK に対して App1 での処理が遅れことになるが、この場合 App1 ではそれまでに FIFO に貯まったデータを読み飛ばすことで最新のマニピュレータの情報を得る。また、その間 RT_TASK では App1 からのデータが更新さ

れるまで同じデータを出力する事になる。今回は同じ研究室内にシステムを構築して移動試験を試みたので、ネットワーク通信の送れがほとんどなく、1ms の間にすべての処理が収まっている。

App2 は制御プログラムの GUI であり、センサ情報の表示や制御プログラムの操作を行うためのものであり、App1 とは共有メモリを介して通信する。

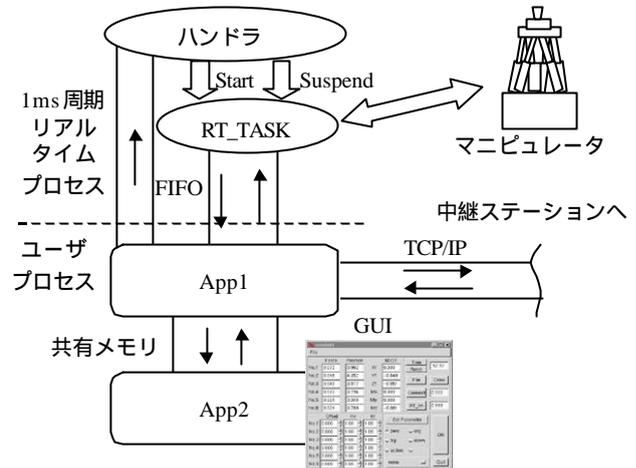


図6 プログラム構成

Fig.6 Diagram of RT Process

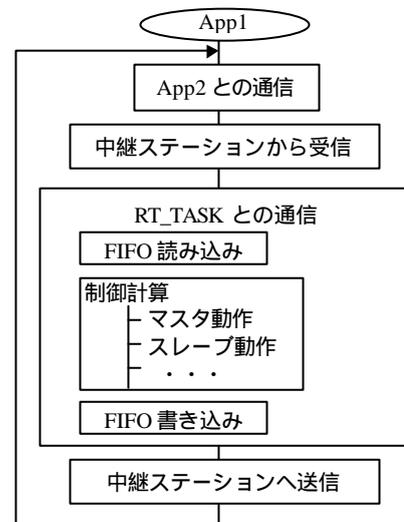


図7 プログラムフロー

Fig.7 Procedure of App1

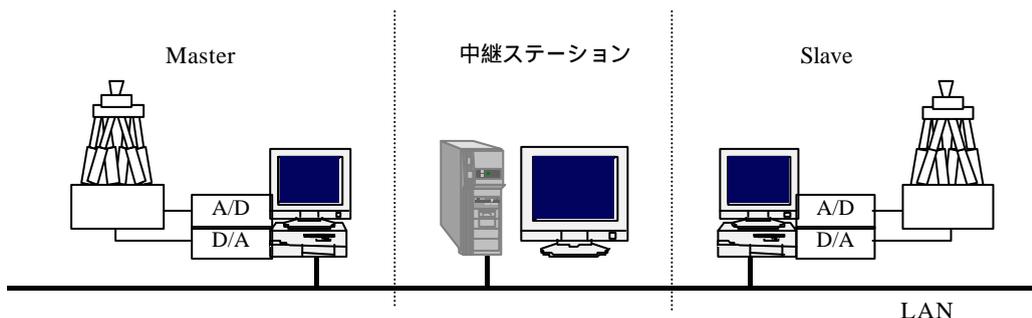


図5 遠隔操作システム

Fig.5 Remote Manipulation System

4. システムのバイラテラル制御

4.1 マニピュレータの力覚提示手法

入力装置として使用するマスタマニピュレータは、ピストンの摩擦などにより、操作者の力そのもので動かすことは困難である。そこで図8に示すように操作者がマニピュレータを動かそうとする力 F_m を検出して、その力に基づいてマニピュレータを駆動させる方法を考える。また、スレーブマニピュレータが作業対象に加える力 F_s の反力をマスタ側で再現するために、マスタマニピュレータを $k \times (F_m - S \times F_s)$ に基づいて駆動させることにより、力覚が再現できると考える。

しかし、これらの力は平行リンクのエンドエフェクタに作用する力であるため、この力に相当する各シリンダの駆動力を計算する必要がある、この計算方法についての有効な手法が提案されている[4][5]。

本稿ではこれらの計算を用いて、エンドエフェクタに作用する力から各シリンダの駆動力を計算するのではなく、力が作用したときに実際に各シリンダに発生する力情報を利用する方法を考えた。この力を検出するために、マニピュレータの各シリンダには、軸方向の力を検出できる力センサを取り付けている。この方法により、 F_m のかわりに各シリンダに加わる力 $f_{m1} \sim f_{m6}$ を、 F_s のかわりに各シリンダが発生する力 $f_{s1} \sim f_{s6}$ を用いて、各シリンダを独立して、 $k \times (f_{mi} - S \times f_{si})$ という力に基づき駆動させている。

4.2 マスタスレーブのバイラテラル制御

本稿では試作したマニピュレータを入力装置として自由に動かすことを第一に考え、マスタの操作性がもっとも優れている力帰還形の構成法を基本にしたバイラテラル制御を適用した。図9に構成を示す。マスタ側では操作者の力により各シリンダに加わる力と、スレーブが作業対象に力を加えたときに各シリンダで検出された力を用いてピストンの駆動を行ない、入力装置としての動作とスレーブ側の力のフィードバックを行う。スレーブ側ではマスタとの位置偏差 ($x_{mi} - x_{si}$) をフィードバックすることにより、マスタの位置へ追従して動作を行う。

5. 実験と考察

製作したマスタスレーブシステムを操作してみたところ、ハンドルを傾ける操作は小さな力でできるが、ハンドルを平行移動する操作に対しては大きな力が必要であった。マスタマニピュレータの操作を違和感無く軽い力で行うためには、この操作感の違いを克服する必要があるが、この点に関しては今後の検討課題とする。本稿では比較的良好的な操作感を得られたハンドルを傾ける操作を以下の2つの場合について行い、各シリンダで検出される軸方向の力と、その時の各シリンダの動作について考察する。

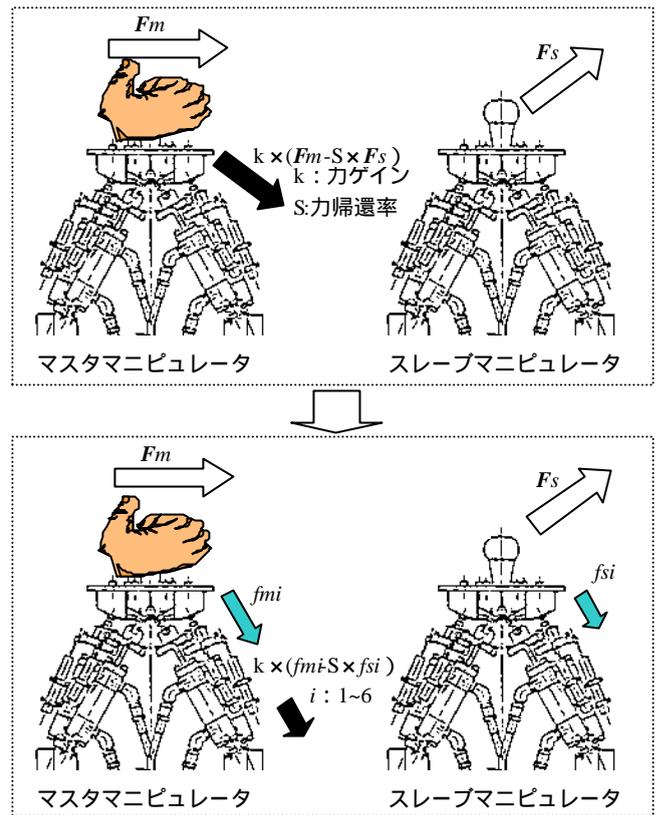


図8 マニピュレータの駆動
Fig.8 Driving Method of Manipulator

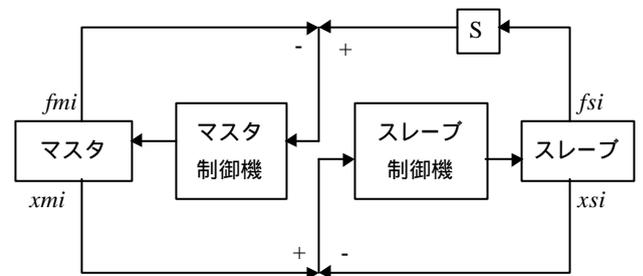


図9 バイラテラル制御法
Fig.9 Bilateral Control Method

5.1 負荷の無い状態での操作

マスタマニピュレータのエンドエフェクタに取り付けられたハンドルを操作したときの、マスタマニピュレータの各シリンダで検出された力 f_{mi} とシリンダ変位 x_{mi} およびスレーブマニピュレータのシリンダ変位 x_{si} を図10に示す。操作は1番のシリンダ付近からハンドルを傾けて、その傾きが左回りに1周するようにハンドルを動かしたもので、その傾きは人の感覚でおおよそ一定に保つようになっている。

グラフからは検出された力の方向にマスタマニピュレータのシリンダが動作し、それにスレーブマニピュレータのシリンダが追従している様子がうかがえる。しかし、力が検出されて

いるにもかかわらずその方向にシリンダが動作していない部分や、力が検出されてからシリンダが駆動するまでの時間にばらつきが見られる。これはマニピュレータの構造上の精度や摩擦などの要因から、不必要な力が検出される。各シリンダの特性を調整しきれておらず、動作の立ち上がりにばらつきがあるなどの要因から各シリンダが干渉合っていることが理由と考えられる。この場合、各シリンダを駆動しようとする力全体が釣り合う方向にエンドエフェクタは動作するため、各シリンダで検出された力にそのままシリンダが追従して動作することは不可能である。マスタマニピュレータのシリンダとスレーブマニピュレータのシリンダの動作に若干違いが見られるのも同じ理由が考えられる。

5.2 負荷をかけた状態での操作

5.1と同じ操作を、スレーブマニピュレータのハンドルを握り、動きを止める方向に力を加えた状況で行なった様子を図11に示す。ここでの力はマスタマニピュレータで検出された力から、スレーブマニピュレータで検出された力にパラメータSを掛けて差し引いた値 $f_{mi} - S \times f_{s_i}$ を示している。

力とマスタマニピュレータのシリンダの動作は5.1と同様な関係が見られるが、スレーブマニピュレータのシリンダはマスタマニピュレータのシリンダの動きに追従できておらず、シリンダの動きに大きな違いが見られる。これは今回の制御ではスレーブ側で各シリンダを駆動するマスタ側との位置変位に応じた力と、ハンドルから伝わる負荷が釣り合う位置でスレー

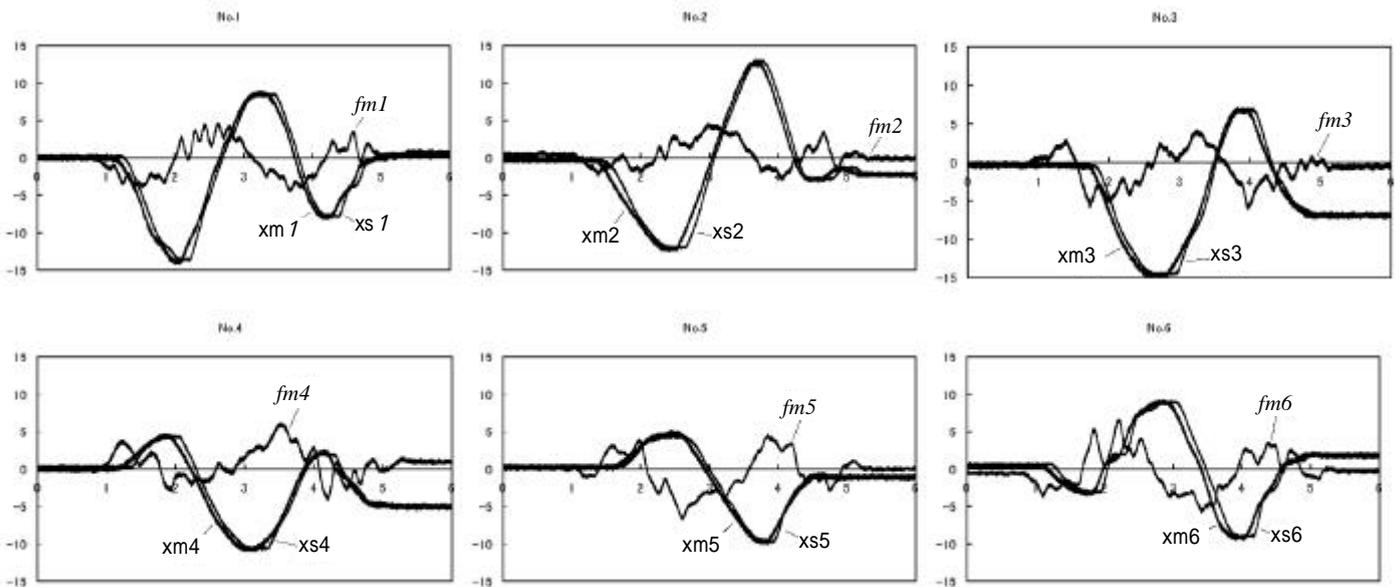


図10 各シリンダの動作

Fig.10 Motion of Cylinder

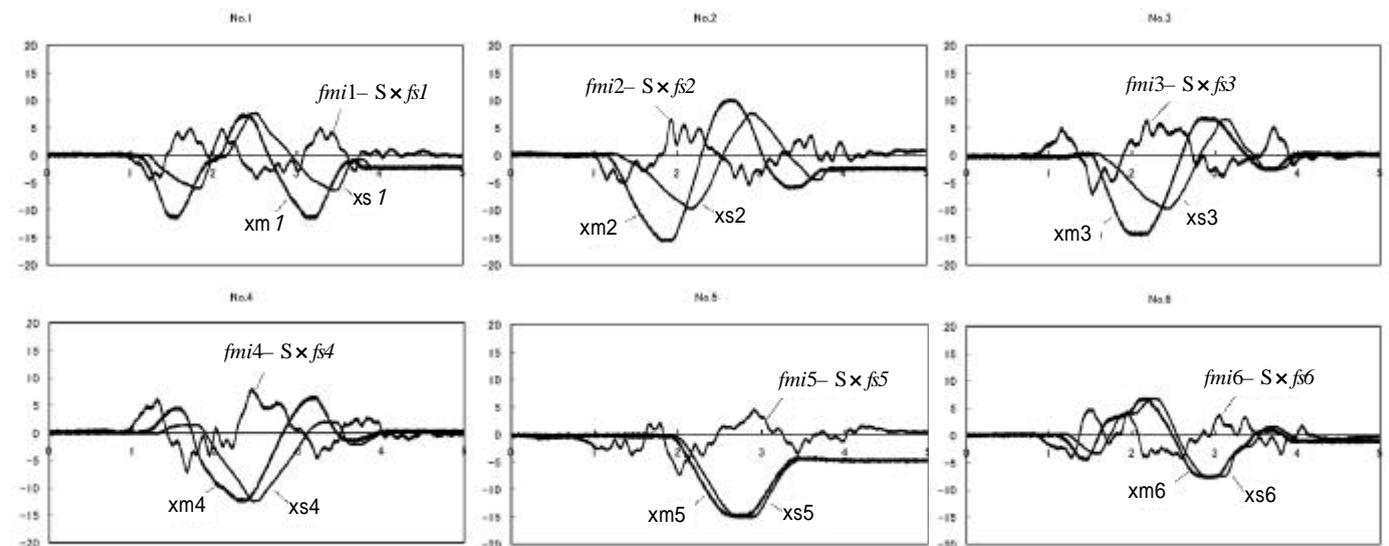


図11 各シリンダの動作（負荷有り）

Fig.11 Motion of Cylinder (loaded)

ブ側は制御されるため、このような位置のずれと後れが生ずることが考えられる。これを改善するためには、変位差に対するゲインの調整や、制御則の再検討が必用である。また、5・1でも同じ事だが、今回製作したシリンダの駆動を調節する比例弁は、応答性を向上させるために不感帯を極力小さくしていることから、オフセットの調整が整っていないと、入力値が小さい時の動作が不安定になりやすいため、シリンダ特性の調節が非常に重要と考えられる。また、油の温度や稼働圧力によって特性が変化することから、比例弁の出力値や圧力値を監視するなどして、動的なパラメータを用いるなどの微妙な調整が必要かと考えられる。

6. まとめ

本稿ではパラレルリンク型力覚ディスプレイを応用して、遠隔操作が可能な力覚提示型のマスタスレーブシステムの製作を行った。このシステムでは、マスタスレーブマニピュレータに力覚ディスプレイを適用することで、マスタマニピュレータに操作者が加える力、およびスレーブマニピュレータの受ける作業中の反力を、シリンダに取り付けた力覚センサにより直接求めている。この各シリンダで検出される力情報を利用して、多くの計算を行わずに、マニピュレータの制御を各シリンダ毎に独立して行う制御方法を試みた。

実際にシステムを稼働させた結果からは、力の検出手法やシリンダ特性の調整方法、制御手法の再検討など多くの検討課題が考えられた。さらに、今後の検討課題としてハンドルの操作方向による操作感の違いを克服する

必要がある。今後の研究では、マニピュレータの改良と制御手法の検討を重ね、力覚提示型遠隔操作作業へ応用することを考えていきたい。

なお、本研究は来年度より「力覚提示型遠隔操作システムの開発」として引き継がれる予定である。

謝辞 本研究を遂行するにあたり、機械設備購入のための補助金を頂きました日本自転車振興会に深く感謝の意を表します。

文 献

- [1] 河野誠, 吉見卓, 安部朗, “遠隔グライндаロボットの研究” 日本ロボット学会誌, vol.10, pp.224-244, 1992
- [2] 久富茂樹, 山田宏尚, 武藤高義, 光井輝彰, 飯田佳弘 “パラレルリンク型力覚ディスプレイの開発”, SICE, 第14回流体制御合同シンポジウム講演論文集, pp.17-20, Dec.1999
- [3] Stewert, D., “A platform with 6 degrees of freedom”, Proc. IMech E., 180(Part 1, 15), pp.371-386, 1966
- [4] 小菅一弘, 奥田実, 川俣裕行, 福田敏男, 小塚敏紀, 水野智夫 “パラレルリンクマニピュレータの力解析” 機学論, vol.60, pp.2338-2344, Jul, 1994
- [5] 小菅一弘, 竹尾光治, 福田敏男, 北山仁志, 竹内暢人, 村上弘記 “油圧アクチュエータを用いたパラレルリンクマニピュレータの力制御” 機学論, vol.62, pp.3536-3542, Sep, 1996