

並列リンク型力覚ディスプレイの研究

久富 茂樹* 光井 輝彰* 飯田 佳弘*
山田 宏尚** 武藤 高義**

Development of a Parallel Link Type Force Display

Shigeki Kudomi*, Teruaki Mitsui*, Yoshihiro Iida*,
Hironao Yamada** and Takayoshi Muto**

あらまし パーチャルリアリティや遠隔作業システムなど様々な分野において、操作者に作業反力(力覚)を提示することが重要となってきている。本研究では、大パワー、高剛性といった特徴を有する油圧アクチュエータを用いて、操作者に力覚の提示を可能とする力覚ディスプレイを開発する。本装置は力覚提示デバイスであると同時に操作者からの操作・指令装置としても機能しなければならないが、通常、油圧システムでは操作者からの力によって油圧ピストンを駆動させることは困難である。本研究ではこの問題に対し、力覚センサで検出した操作者の力信号をもとにピストンを駆動させる方法を提案し、操作・指令装置として用いることを可能にした。さらに本方式を、1自由度力覚ディスプレイ及び6自由度(並列リンク型)力覚ディスプレイに適用し、その力覚提示機能を実験により確認した。

キーワード 油圧システム、力覚、パラレルリンク、バックドライバビリティ、バイラテラル制御

1. まえがき

バーチャルリアリティ(VR)空間において仮想物体を操作するとき、または作業者の微妙な力感覚を必要とする遠隔作業等においては、作業状態の視覚的な提示だけでなく、作業反力(力覚)を提示することが要求される。この課題の解決に向けて、作業者に力覚を提示するための種々のデバイスが、力覚ディスプレイとして開発されている[1]。しかしながら、これまでに開発された力覚ディスプレイでは、提示できる力が不十分、または構造が複雑であるなどの問題点が存在する。

図1に、力覚ディスプレイに基づく遠隔作業の一応用例を示す。図では、マスタマニピュレータとスレーブマニピュレータの両者が、並列(パラレル)型の6軸アクチュエータ(シリンダ)から成っており、スレーブマニピュレータのエンドエフェクタには作業用の工具が取り付けられている。マスタマニピュレータは(操作者からの)操作・指令装置であると同時に、(操作者へ)スレーブマニピュレータの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も機能する。本研究では、図

示のような研磨作業を始め、研削、塗装、彫刻など、比較的高速・大パワー・高剛性を要する作業を考察の対象とする。このようなシステムでは、大パワー、高剛性、

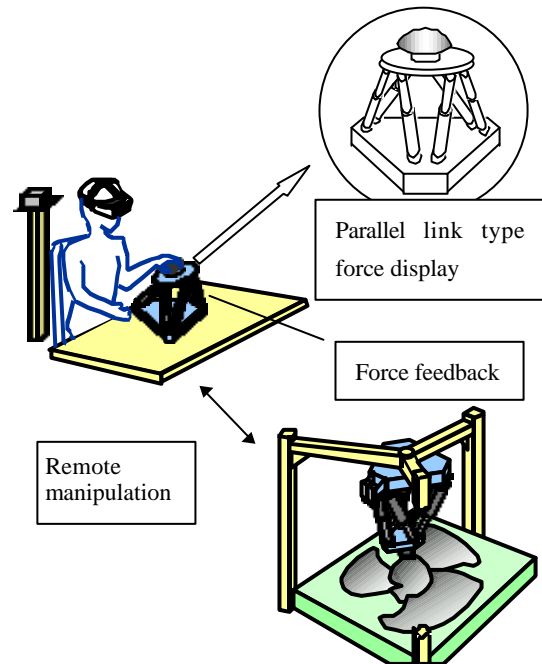


図1 マスタスレーブを用いた遠隔操作システム

Fig.1 Master-slave system for remote control

*メカトロ応用部
Mechatronics Division

**岐阜大学工学部機械システム工学科
Department of Mechanical and Systems Engineering,
Gifu University

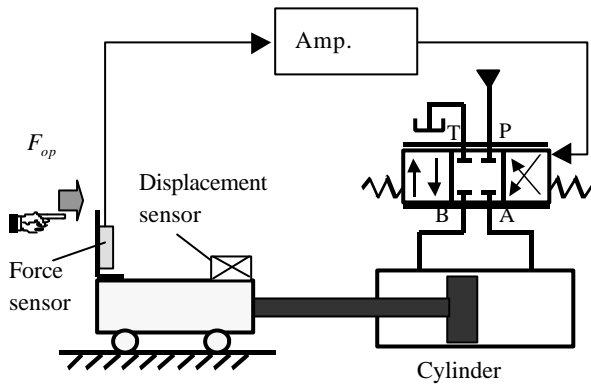


図2 カセンサに基づくシリンダ駆動
Fig.2 Hydraulic servo system
(Driving method by manual force)

高応答性といった特徴を有する油圧式のアクチュエータが望ましいことから、以下では、アクチュエータ部のパラレルリンク機構を油圧シリンダによって構成したマスタスレーブシステムを想定する。これにより比較的簡単な構造で、しかも提示できる力が大きく、応答性に優れた遠隔作業システムが実現できる。

ところで、油圧サーボ系を力覚ディスプレイとして用いる場合、制御弁の特性やピストンの摩擦等に起因して、バックドライバビリティ（操作者からの力によって油圧ピストンを駆動し得るか否か）の問題が生じる。すなわち、通常の油圧サーボ系の場合、それを構成する一要素（例えば制御弁）に操作者が手で触れ、その力によってシリンダを駆動することは困難である。この問題の克服なくしては、図1のような力覚ディスプレイは実現し得ない。それを可能とする一手法として本報では、カセンサによって検出された操作者の力信号に基づくピストンの駆動法を提案する。さらに、本提案の方法を、油圧式の1自由度力覚ディスプレイ及び6自由度（並列リンク型）力覚ディスプレイに適用し、その力覚提示機能について実験的に検討する。

2. カセンサに基づくシリンダの駆動法

本研究では、油圧サーボ系におけるバックドライバビリティの問題を解決するために、図2に示すようなシステムの駆動法を提案する。本システムは、通常の油圧サーボ系（正重合を有するサーボ弁とシリンダ）を基本構成としつつ、ピストンの先端部には板ばねを介してカセンサ（歪みゲージ）が設置されている。このセンサを入力部として用いれば、操作者の手による次のようなシリンダの駆動法が実現される。

操作者による系への力入力は、図示の板ばね（以下、操作板と呼ぶ）に手で触れることによって与えるものとする。まず、操作板に取り付けられた歪みゲージによって操作者の力が検出される。次に、この信号によりサーボ弁を駆動させれば、操作者からの力の方向へピストンを動かすことができる。この方法によれば、操作者のわ

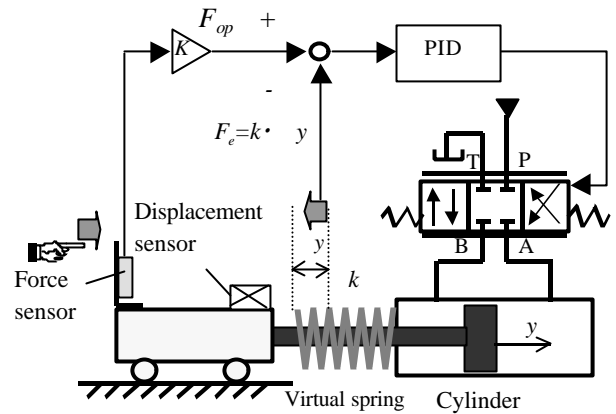
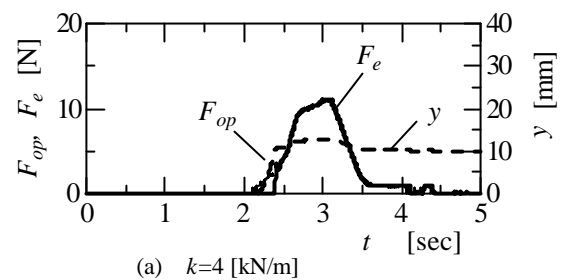
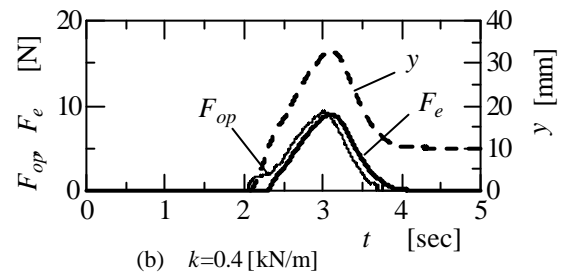


図3 油圧1自由度力覚ディスプレイ
Fig.3 Hydraulic force-display



(a) $k=4$ [kN/m]



(b) $k=0.4$ [kN/m]

図4 力覚提示実験結果

Fig.4 Experimental results of hydraulic force-display

ずかな力によってピストンを操作できることから、油圧サーボ系におけるバックドライバビリティの問題を解決し得る。以下に、本提案の方法を油圧式の力覚ディスプレイに適用した場合について検討する。

3. 1自由度力覚ディスプレイ

まず1自由度力覚ディスプレイを対象として、その力覚提示機能について実験的に検討する。実験のシステム構成を図3に示す。本実験における操作対象として、中立位置から10[mm]だけピストンを押し込んだ位置に仮想的なばねを設定した。操作者への力覚提示は次のように行う。操作者の力 F_{op} によってピストンが動き、ピストン変位が10[mm]になったところで仮想のばねと接触する。このときピストン変位 y と仮想ばねのばね定数 k によって決まる反力 F_e が生じる。この F_e が F_{op} に追従するように制御すれば、操作者に仮想ばねからの反力を提示

することができる．コントローラの制御則は PID とし，サンプリング時間は 1[ms]，供給圧力 3.5[MPa]で実験を行った．

実験結果を図 4 に示す．まず図 4 (a)は，仮想ばねのばね定数を $k=4$ [kN/m]に設定したときの結果である．操作者が力を加えても，ピストンは仮想ばねに接触した 10[mm]の位置からさらに押し込まれることはなく，硬いばねに接触したように感じる事ができた．次に図 4 (b)は， $k=0.4$ [kN/m]に設定したときの結果であり，このときピストン変位は，仮想ばねに接触した位置から加えた力に応じてさらに大きく変位しており，操作者には柔らかいばねに接触したように感じる事ができた．これらの結果から，本システムが 1 自由度力覚ディスプレイとして機能することを確認できた．

4. 1 自由度力覚ディスプレイを用いた マスタスレーブシステム

図 1 のような遠隔作業を行うためには，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 マスタスレーブシステムを構成し，それらをパラレル制御する必要がある．本節では，実際のばねを操作対象として，マスタスレーブシステムによるばねへの接触実験により本システムの力覚提示機能について検討する．

4. 1 システム構成

図 5 に実験システムの構成図を示す．マスタ側で操作者の力 F_{op} が力センサによって検出され，この信号によってピストンが駆動される．また，スレーブ側にも板ばねを介して力センサがピストン先端部に取り付けられている．マスタとスレーブのピストン変位信号 (X_m, X_s)，

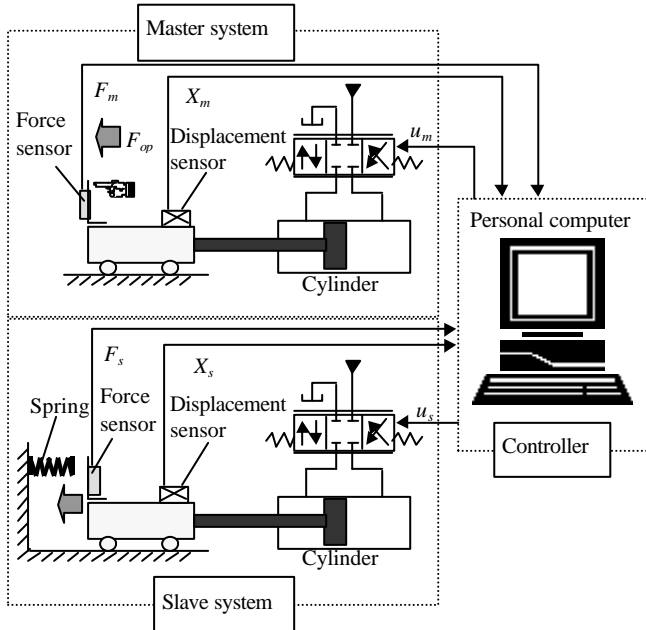
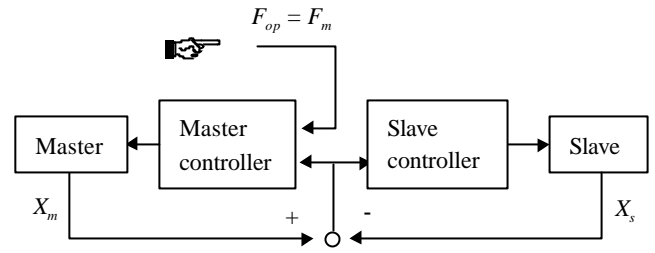
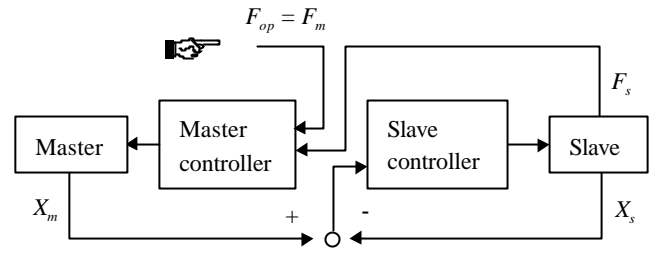


図 5 実験システムの構成

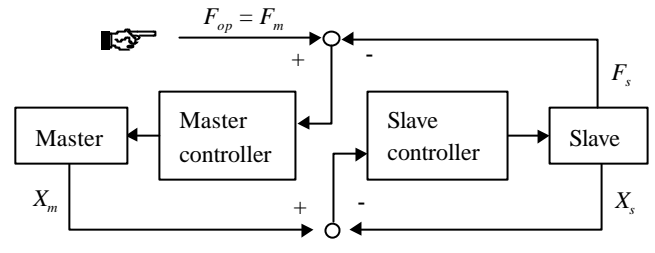
Fig.5 Diagram of experimental apparatus



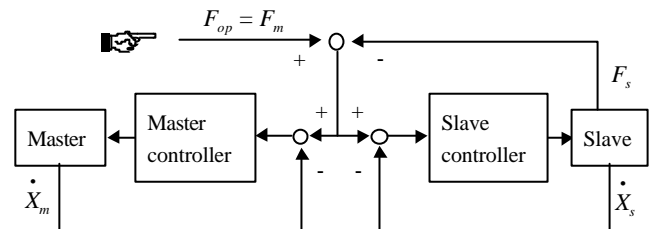
(a) Symmetric position servo type



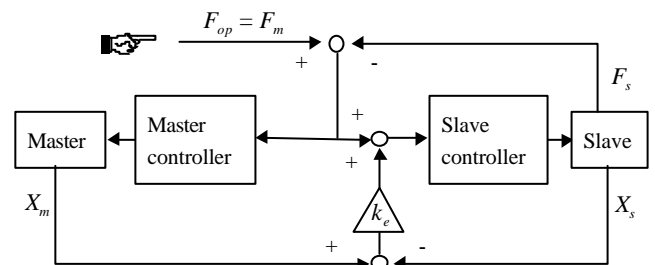
(b) Force reflection type



(c) Force reflecting servo type



(d) Parallel control method



(e) Improved parallel control method

図 6 バイラテラル制御法

Fig.6 Bilateral control methods applied for hydraulic force-display

力センサ信号 ($F_{op}=F_m, F_s$) は PC に取り込まれ、バイラテラル制御則により計算された駆動信号がマスタ、スレーブにそれぞれ出力される。マスタ及びスレーブの各コントローラは比例制御とし、サンプリング時間は 1[ms] で行った。また、作業対象として、硬さの異なる 2 種類のばね (ばね定数 $k=0.4, 1$ [kN/m]) を用意し、ばねへの接触感を操作者に伝えることにした。なお、油圧サーボ系の構成要素 (サーボ弁, シリンダ, 管路等) はマスタとスレーブで異種のものを使用したことから、おのずとその動特性も異なっている。

4. 2 バイラテラル制御の検討

システムの制御はバイラテラル制御を用いて行うが、従来からよく知られているバイラテラル制御のシステム構成法として、対称型、力逆送型、力帰還型、並列型がある[3]。図 6 に、これら 4 種の基本型 (図 6 (a)~(d)) に加えて、本報で新たに提案する制御法 (図 6 (e)) の各ブロック図を示す。

図 6 (a)の対称型はマスタとスレーブの位置誤差を測定してこれを修正する方向へ駆動力を与えるものである。油圧式力覚ディスプレイをマスタとして用いる場合、通常の対称型の構成に加えて、マスタを駆動するための操作者の力信号要素 F_{op} をマスタに付加する必要がある。この方法はスレーブの力情報を用いないため、スレーブ変位に影響を及ぼす程度に作業反力が生じないと力覚をマスタに伝えることができない。つまり、スレーブの油圧の力に比べて作業反力が小さい場合、操作者に対してほとんど力覚を提示することができない。したがって、本報で対象とするような微妙な力感覚作業システムには適していない。

図 6 (b)の力逆送型は、スレーブを通常的位置サーボ系で構成し、スレーブで検出した反力をマスタに伝達するものである。この方法を油圧式力覚ディスプレイに適用した場合、対称型のときと同様に操作者の力信号 F_{op} をマスタに入力する必要がある。しかしながら、この F_{op} はマスタに加えらる力 F_m にほかならず、マスタとスレーブの力信号の符号を考慮すれば、マスタに力のサーボ系を構成した力帰還型 (図 6 (c)) に等価となる (力帰還型の実験的な検討については後述する)。

マスタとスレーブを並列的に構成する図 6 (d)の並列型は、直列的な構成の力帰還型に比べ安定性が向上するといわれている。しかしながら、位置フィードバックではなく、速度フィードバックを行っているため、マスタとスレーブの動特性が異なる場合、マスタとスレーブの位置追従性は補償され難い。また、この位置誤差が累積すると、操作性に支障をきたすことが予想される。そこで、この欠点を補う手法として、図 6 (e)の構成法 (以下、改良並列型という) を提案する。この方法は、並列型を基本としながらも、マスタとスレーブの位置偏差をスレーブにのみフィードバックしている。位置サーボ系をスレーブ側において構成することの効果として、マスタの

位置にスレーブが良好に追従するものと期待される。

以上の考察に基づき、本研究では、力帰還型 (図 6 (c)) と改良並列型 (図 6 (e)) の 2 種類のバイラテラル制御法を対象として、ばね (負荷) への接触作業に対する力覚ディスプレイの力覚提示機能について比較実験を行った。

4. 3 実験結果

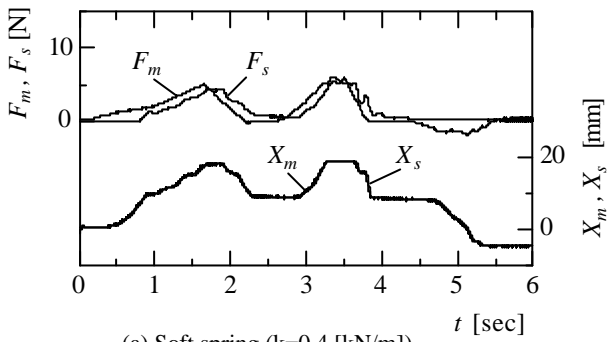
バイラテラル制御則として力帰還型、提案する改良並列型を用いたときの実験結果をそれぞれ図 7, 図 8 に示す。いずれも図中(a)は柔らかいばね ($k=0.4$ [kN/m]), 図中(b)は硬いばね ($k=1$ [kN/m]) の場合を示している。

まず力帰還型では、柔らかいばねの場合、スレーブがばねへ接触すると同時にその力が検出され、マスタに加えた力に等しくなるように制御されている。また、マスタとスレーブの両ピストン変位波形もほぼ良好に一致している。操作者には力覚ディスプレイ (マスタ装置部) を介して柔らかいばねに接触したことを感じる事ができた。しかしながら、硬いばねへの接触時には力、ピストン変位ともに激しく振動し、安定に制御することができなかった。

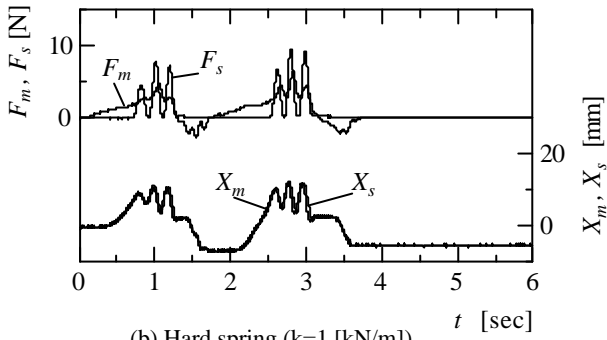
提案する改良並列型では、柔らかいばねの場合、力帰還型とほぼ同様な結果が得られ、操作者へ柔らかいばね感覚の提示ができた。マスタとスレーブの動特性が異なるにもかかわらず、マスタとスレーブの両ピストン変位波形もほぼ良好に一致している。また、力帰還型の場合にシステムが不安定となった硬いばねへの接触作業も、改良並列型では安定な制御が実現された。図 8 (a)に比べ図 8 (b)では、より大きな力を加えているにもかかわらずピストン変位は小さくなっており、操作者に対して硬いばねへの接触感を提示することができた。以上の検討結果に基づき、提案した改良並列型バイラテラル制御法の有効性ならびに本システムの力覚提示機能が確認された。

5. 並列リンク型力覚ディスプレイ

ベースとエンドエフェクタの間に 6 本の油圧シリンダを配置した並列リンク型 (Stewart 型) の力覚ディスプレイを試作した。図 9 にシステム構成を示す。本装置は、力覚ディスプレイ本体、パーソナルコンピュータ (PC), A/D および D/A 変換器, アンブユニット, バルブユニット (比例電磁弁), ポンプユニットから構成されている。各シリンダのピストンロッドとエンドエフェクタ側のボールジョイントとの間には力覚センサ (歪みゲージ式) が取り付けられており、グリップから与えられた操作者の力はこの力覚センサによって検知される。この信号 F は A/D 変換器を介して PC に入力され制御弁への制御入力信号が演算される。演算された信号は D/A 変換器を介して電圧信号 u としてアンブに与えられる。アンブはこの電圧信号を電流信号 i に変換して比例電磁弁を駆動する。これに伴い、油圧源から圧油がシリンダに流入しピストンが移動する。また、ピストンの移動量 X はポテン



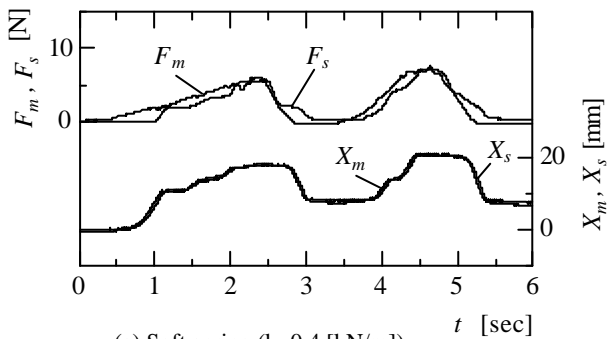
(a) Soft spring ($k=0.4$ [kN/m])



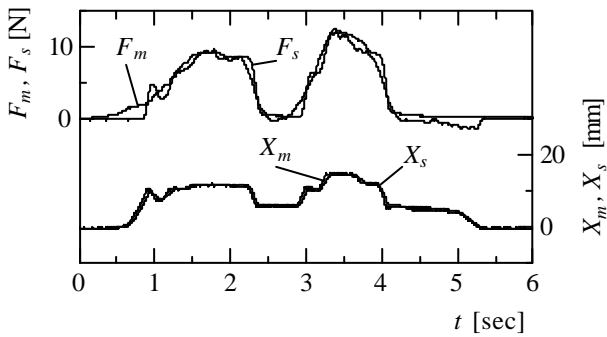
(b) Hard spring ($k=1$ [kN/m])

図7 力帰還型の実験結果

Fig.7 Experimental results of force reflecting servo type



(a) Soft spring ($k=0.4$ [kN/m])



(b) Hard spring ($k=1$ [kN/m])

図8 改良並列型の実験結果

Fig.8 Experimental results of improved parallel control method

シヨメータによって検出され、アンプを介して電圧信号に変換された後、A/D変換器を介してPCに入力される。6本の油圧シリンダをそれぞれこの方法により駆動させることで6自由度の入力デバイスとして用いることが可能となる。表1に本力覚ディスプレイの揺動範囲(機械的最大値)を示す。

表1 力覚ディスプレイの揺動範囲

Table.1 Motion range

Roll	± 14 (deg)
Pitch	$-13 \sim 14$ (deg)
Yaw	± 35 (deg)
Surge	$-44.0 \sim 35.5$ (mm)
Sway	± 36.0 (mm)
Heave	$-23.5 \sim 22.5$ (mm)

本力覚ディスプレイの力覚提示機能を確認するために、図10で示すように仮想ばねを6本のシリンダにそれぞれ設定した。仮想ばねによる力覚提示の方法は先に述べた1自由度力覚ディスプレイの場合と同様に行った。ただし、各シリンダの最大ストロークは40mmであり、その中間位置を原点と定め、伸び方向を負、縮み方向を正とした。仮想ばねは各ピストン変位の原点位置に設定し、ピストン変位が原点位置からさらに縮む方向に変位すると、仮想ばねのばね定数 k と変位量 y によって決まる反力 F_e が計算される。この F_e が操作者からの力 F_o に追従するように制御することで操作者への力覚提示を実現する。コントローラの制御則はPD制御とし、サンプリング時間は1[ms]、供給圧力2.0[MPa]で実験を行った。

図11に実験結果を示す。図11(a)は仮想ばねのばね定数を $k=0.5$ [kN/m]に設定した場合、図11(b)は $k=5$ [kN/m]に設定した場合の結果をそれぞれ示す。図には1本のシリンダの結果のみを代表して示した。この実験では、6本のシリンダがすべて最伸($y=20$ [mm])である状態が

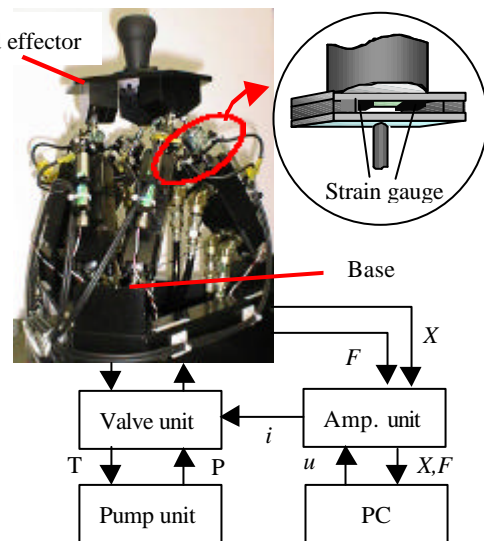


図9 並列リンク型力覚ディスプレイ

Fig.9 Parallel link type hydraulic force-display

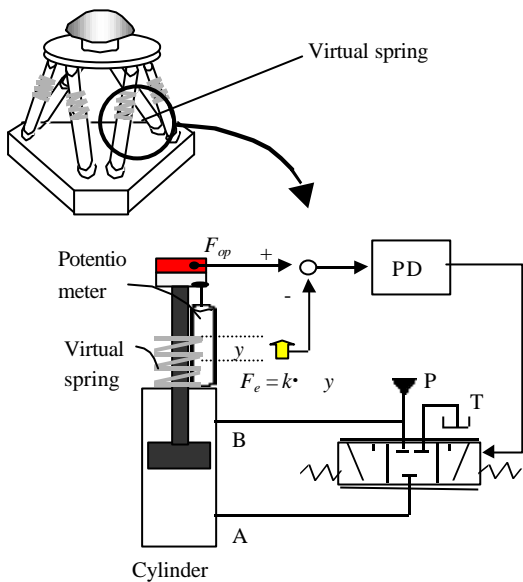


図 10 仮想ばねを用いた力覚提示

Fig.10 Schematic diagram of force feedback from a virtual spring

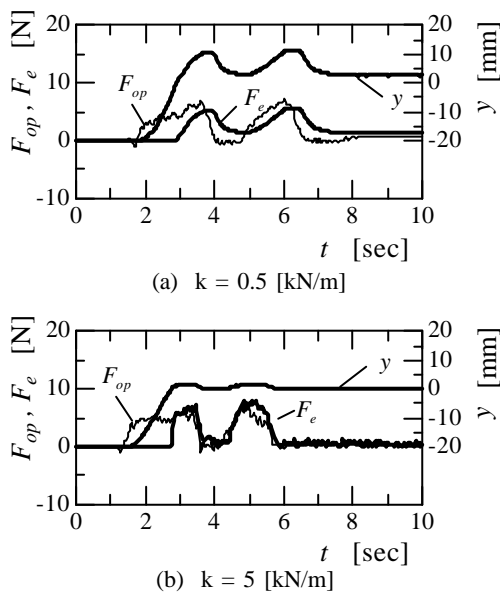


図 11 並列リンク型力覚ディスプレイ実験結果

Fig.11 Experimental results of parallel link type force-display

ら、操作者はグリップを握り垂直下向きに力を加えた。この場合、6本のシリンダにはほぼ均等に力が加わるため、先に述べた駆動原理によって6本のシリンダはほぼ同じ速度で押し込まれ、操作者はエンドエフェクタを垂直下向きに動かすことができる。ピストンが原点位置になったところで仮想ばねに接触し、仮想ばねのばね定数 k によって求まる反力 F_e が操作力 F_{op} に追従するように制御することで操作者にばねの硬さを提示することができた。図 11(a)では仮想ばねに接触した後もピストンが大きく変位しているのに対し、図 11(b)では接触位置からほとんど変位することなく、仮想ばねが大きな抵抗となっ

ていることがわかる。しかしながら、図 11(b)において F_e の波形がやや振動的になっていることからわかるように、硬い物体を提示する場合、システムが不安定化する傾向となる。したがって、より安定化するための制御手法の検討が今後の課題である。また、力センサはシリンダの軸方向に加わる力のみが検出されるため、操作者が操作した場合、ロール、ピッチの動きは容易であるが、その他の動きを行う場合は抵抗が大きくなる（より大きな力が必要）といった問題点がある。今後は、力のセンシングの方法も含めて、どの動きもスムーズに行えるように補償していく必要がある。

6. まとめ

本研究では、力センサの信号を用いてピストン駆動することによる油圧式力覚ディスプレイ（1自由度および6自由度）を提案した。

1自由度力覚ディスプレイでは仮想ばねおよび実際のばねへの接触作業により、力覚提示機能を実験的に検討した。その結果、操作者に対してばねの硬さの違いを提示することができ、本力覚ディスプレイの力覚提示機能を確認することができた。また、本システムに適した新しいパラレル制御法を提案し、システムの安定性と位置追従性の両立を図ることができた。

また、6本の油圧シリンダを並列に配置した並列リンク型力覚ディスプレイを試作し、力センサ信号を用いて各シリンダを駆動することにより6自由度の入力デバイスとして用いることが可能となった。仮想ばねを用いた実験により、本力覚ディスプレイの力覚提示機能を確認した。

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の意を表します。

文献

- [1] Burdea, "Force and Touch Feedback for Virtual Reality", Wiley-Interscience, 1996
- [2] 久富茂樹, 丹羽義典, 山田宏尚, 武藤高義, "パラレル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年春期フルイドパワーシステム講演会論文集, pp.37-39, 1999
- [3] 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
- [4] 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 (油圧式1軸力覚ディスプレイのカフィードバックに関する検討)", 第17回流体計測第14回流体制御合同シンポジウム講演論文集, pp.17-20, 1999