

氏 名 ( 本 籍 ) 久 富 茂 樹 ( 岐 阜 県 )  
学 位 の 種 類 博 士 ( 工 学 )  
学 位 記 号 番 号 甲 第 1 6 2 号  
学 位 授 与 年 月 日 平 成 1 4 年 3 月 2 5 日  
専 攻 生 産 開 発 シ ス テ ム 工 学 専 攻  
学 位 論 文 題 目 油 空 圧 式 力 覚 デ ィ ス プ レ イ の 開 発 と マ ス タ ・ ス レ ー ブ 制 御 系 へ の 適 用  
(Development of a Hydraulic or Pneumatic Type  
Force-display and its Application to a Bilateral  
Master-slave Control System)  
学 位 論 文 審 査 委 員 ( 主 査 ) 教 授 武 藤 高 義  
( 副 査 ) 教 授 堀 康 郎 教 授 川 崎 晴 久  
助 教 授 山 田 宏 尚

## 論 文 内 容 の 要 旨

近年、各種製造業の生産工程においては、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。一方、研磨、塗装、検査などの工程にあつては、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。またこれらの工程は、粉塵、高温、多湿など劣悪環境下での作業が多いことから、いわゆる 3 K (きつい、きたない、きけん) に関わる克服課題でもある。これらの諸課題を解決するには、作業者を作業現場から隔離する遠隔操作技術を導入するのが有効である。この遠隔操作を、作業者の力感覚が必要とされる作業 (例えば、研磨工程) に適用した場合、作業の視覚情報のみならず、作業反力 (力覚) の提示が必須となる。このような要請に応えるべく、作業者に力覚を提示するためのマスタ装置が、力覚ディスプレイとして各種開発されている。これまでに開発された力覚ディスプレイの場合、提示できる力が不十分、過負荷に弱い、構造が複雑かつ高価であるなどの問題点が存在し、生産現場での使用に適しているとは言い難い状況にある。また、これらディスプレイの駆動方式は、一部に空気圧式が存在するものの、多くは電動式が採用されている現状に鑑み、各方式の特長を活かした、より広範かつ多様なディスプレイの開発が望まれている。このような背景下に、本研究では油圧式ならびに空気圧式駆動方式による 2 種類のパラレルリンク型力覚ディスプレイを開発した。

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 (または空気圧) システムでは、制御弁の構造やピストンの摩擦等の理

由からバックドライバビリティ性（人の操作力によってはアクチュエータを自由に駆動するのが困難）の問題が生じる。この問題に対して本研究では、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ことによりバックドライバビリティ性を改善し、これを入力装置として用いることを可能とした。

まず、この方法を1自由度油圧式力覚ディスプレイに適用し、油圧サーボ系とでマスタ・スレーブシステムを構成した。既存の各種バイラテラル制御法との適合性について実験的に検討した結果、本提案システムに対しては並列型または力対称型が適合し、これらにより、マスタに対するスレーブの（力およびピストン変位の）追従性能ならびに力覚提示機能に関し、ほぼ良好な結果が得られた。

次に低価格化、安全性を実現するために駆動方式を油圧式から空気圧式に変更した空気圧式力覚ディスプレイについても同様の検討を行い、1自由度空気圧力覚ディスプレイと油圧サーボ系からなるマスタ・スレーブシステムでのばね負荷に対する接触実験を試みた。代表的な4種類の制御法（力帰還型、力対称S型、力対称M型、並列型）について、ばね負荷への接触作業による力覚提示機能を検討した。その結果、作業反力の提示機能、安定性、定位性、ゲイン調整の簡易性等の評価項目に対して、力対称M型が最も優れていることを確認した。

さらに、代表的な平行機構の一つであるスチュワートプラットフォームを採用した油圧式平行リンク型力覚ディスプレイを試作した。この平行機構を、油圧サーボ系と組み合わせることで、剛性が高く、コンパクトでありながら6自由度の動作が可能な力覚ディスプレイを実現することができた。また、各油圧シリンダの動特性が異なるため動作速度が同一ではないという問題や制御弁における中立点のずれのためピストンの位置が固定されないという問題に対し、(1) 外乱オブザーバによる外乱推定補償制御、(2) 位置目標値生成+位置フィードバック制御、の2つの制御法を適用した。その結果、両制御法とも各シリンダの動特性差や中立点ずれを補償することで、動作時における各シリンダ速度をほぼ同じにすることができ、静止時におけるピストン変位のドリフトを低減することができた。これにより、本力覚ディスプレイの操作性を改善することができた。最後に、油圧式平行リンク型力覚ディスプレイと同形状の油圧スレーブマニピュレータを用いて、マスタ・スレーブ制御系を構成し、負荷に対する接触実験を試みた。その結果、本力覚ディスプレイの力覚提示機能について、油圧駆動方式であることに伴い、既存の電気駆動方式に比べて、より大きな力提示を実現できることを確認した。

## 論文審査結果の要旨

近年、各種製造業の生産工程においては、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。一方、研磨、塗装、検査などの工程にあつては、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。

またこれらの工程は、粉塵、高温、多湿など劣悪環境下での作業が多いことから、いわゆる3K（きつい、きたない、きけん）に関わる克服課題でもある。これらの諸課題を解決するには、作業者を作業現場から隔離する遠隔操作技術を導入するのが有効である。この遠隔操作を、作業者の力感覚が必要とされる作業（例えば、研磨工程）に適用した場合、作業の視覚情報のみならず、作業反力（力覚）の提示が必須となる。このような要請に応えるべく、作業者に力覚を提示するためのマスタ装置が、力覚ディスプレイとして各種開発されている。これまでに開発された力覚ディスプレイの場合、提示できる力が不十分、過負荷に弱い、構造が複雑かつ高価であるなどの問題点が存在し、生産現場での使用に適しているとは言い難い状況にある。また、これらディスプレイの駆動方式は、一部に空気圧式が存在するものの、多くは電動式が採用されている現状に鑑み、各方式の特長を活かした、より広範かつ多様なディスプレイの開発が望まれている。このような背景下に、本研究では油圧式ならびに空気圧式駆動方式による2種類のパラレルリンク型力覚ディスプレイを開発した。

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（または空気圧）システムでは、制御弁の構造やピストンの摩擦等の理由からバックドライバビリティ性（人の操作力によってはアクチュエータを自由に駆動するのが困難）の問題が生じる。この問題に対して本研究では、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ことによりバックドライバビリティ性を改善し、これを入力装置として用いることを可能とした。

まず、この方法を1自由度油圧式力覚ディスプレイに適用し、油圧サーボ系とでマスタ・スレーブシステムを構成した。既存の各種バイラテラル制御法との適合性について実験的に検討した結果、本提案システムに対しては並列型または力対称型が適合し、これらにより、マスタに対するスレーブの（力およびピストン変位の）追従性能ならびに力覚提示機能に関し、ほぼ良好な結果が得られた。

次に低価格化、安全性を実現するために駆動方式を油圧式から空気圧式に変更した空気圧式力覚ディスプレイについても同様の検討を行い、1自由度空気圧力覚ディスプレイと油圧サーボ系からなるマスタ・スレーブシステムでのばね負荷に対する接触実験を試みた。代表的な4種類の制御法（力帰還型、力対称S型、力対称M型、並列型）について、ばね負荷への接触作業による力覚提示機能を検討した。その結果、作業反力の提示機能、安定性、定位性、ゲイン調整の簡易性等の評価項目に対して、力対称M型が最も優れていることを確認した。

さらに、代表的なパラレル機構の一つであるスチュワートプラットフォームを採用した油圧式パラレルリンク型力覚ディスプレイを試作した。このパラレル機構を、油圧サーボ系と組み合わせることで、剛性が高く、コンパクトでありながら6自由度の動作が可能な力覚ディスプレイを実現することができた。また、各油圧シリンダの動特性が異なるため動作速度が同一ではないという問題や制御弁における中立点のずれのためピストンの位置が固定されないという問題に対し、

(1) 外乱オブザーバによる外乱推定補償制御，(2) 位置目標値生成+位置フィードバック制御，の2つの制御法を適用した．その結果，両制御法とも各シリンダの動特性差や中立点ずれを補償することで，動作時における各シリンダ速度をほぼ同じにすることができ，静止時におけるピストン変位のドリフトを低減することができた．これにより，本力覚ディスプレイの操作性を改善することができた．最後に，油圧式パラレルリンク型力覚ディスプレイと同形状の油圧スレーブマニピュレータを用いて，マスタ・スレーブ制御系を構成し，負荷に対する接触実験を試みた．その結果，本力覚ディスプレイの力覚提示機能について，油圧駆動方式であることに伴い，既存の電気駆動方式に比べて，より大きな力提示を実現できることを確認した．

本論文によって得られた以上の知見と成果は，工学上および工業上，重要な貢献をするものであると判定された．

## 最終試験結果の要旨

武藤高義，堀 康郎，川崎晴久，山田宏尚で構成する審査委員会は，この論文および論文別刷の主要部分（下記 1～3 の論文）に対して，論文 3 編ともに第一著者として書かれており，その論文は学位論文として十分に完成された内容を有しているものと認め，最終試験（公聴会）を平成 14 年 2 月 14 日に開催して審査した．審査委員会において，学力，研究能力および外国語能力（英語）について口頭による試問を行い，審議の結果，合格と判定した．