

学位論文題名

ヒトの力感覚特性に基づくフォースディスプレイの研究

学位論文内容の要旨

次世紀に向けたコンピュータやロボットとのコミュニケーションのあり方のひとつに人工現実感やテレプレゼンスという新しい人間中心のマン・マシン・インタフェース技術がある。この新しい工学技術の応用分野は電子情報系やメカトロニクスのみならず、医療、福祉、教育、芸術などの人間生活に直接関係する諸分野にも及び、その社会的な要請は非常に高まってきている。

ところで、視覚ディスプレイを介して仮想空間に入ったとき、視覚情報だけでなく、その空間内に映し出された物体を手にすることができれば、より臨場感のある体験をすることができる。このように人工現実感やテレプレゼンスのマン・マシン・システムでは、視覚や聴覚と同様に力覚に関する感覚情報のフィードバックが不可欠である。したがって、本研究で対象としているフォース・ディスプレイの果たす役割はきわめて大きい。しかし、従来のフォース・ディスプレイは市販のアクチュエータを利用しているために、小型軽量化やコンプライアンス性に問題点を多く含み、人間への装着性や可搬性に適していない状況にある。つまり、実験室レベルで実現できても、既存のフォースディスプレイを日常生活環境のなかで利用することは難しい。

また、力情報をヒトに違和感なく呈示するためには、あらかじめヒトの力情報の知覚特性について把握しておくことが不可欠である。しかし、フォース・ディスプレイ設計に必要な力感覚の基礎的知見は他の感覚と比較して極めて乏しい状況にある。

本研究の目的は、ヒトへの装着性に優れたフォース・ディスプレイを開発することである。そのため、フォース・ディスプレイに適した新しいタイプのアクチュエータの開発と肘関節の力感覚特性を調べる心理物理的研究を並行して進め、これらの開発と研究で得られた成果に基づいてヒト上肢用フォース・ディスプレイを試作し、その評価を行っている。さらに、このフォースディスプレイの福祉工学分野への応用例として、肘関節機能障害者のための関節可動域訓練装置への利用を提案している。

本論文は、全5章から構成されている。以下に、本論文の概要を示す。

第1章では、まず、序論としての本論文の背景について述べ、従来のヒューマン・インタフェースやフォース・ディスプレイの現状と問題点を概観し、人工現実感やリハビリテーション分野におけるフォース・ディスプレイの社会的必要性を示した。また、フォース・ディスプレイを具体的に設計するにあたり、どのような特徴をもつアクチュエータが必要とされるのか、また、ヒトの力感覚については何を調べるべきかを明らかにした上で、フォース・ディスプレイの理想像を探った。

第2章では、ヒトへの装着性に優れたアクチュエータとして提案する水素吸蔵合金を利用したアクチュエータ(MHアクチュエータ)とその有用性について述べた。水素吸蔵合金は熱することにより大量の水素を放出し、冷却すること

により水素を吸収するという性質を持った合金である。この水素をベローズに封じこめることにより、ベローズが伸長したり収縮するため推力を発生させることができる。ただし、合金へ加える熱源としては電氣的に制御できるペルチエ素子を利用し、溶射技術により合金をペルチエ素子で挟むことにより効率よく熱を伝達できるように工夫した。

まず、このアクチュエータの中核となる水素吸蔵合金の特徴を明記した。水素吸蔵合金の種類は多数あるが、ここでは、ヒトへの装着時の安全性を考慮する上で、常温での平衡水素圧が1 atmであるCaNiMnAl系を選択した。さらに、アクチュエータの設計指針とアクチュエータの試作結果について述べた。MHアクチュエータは、熱から水素圧へのエネルギー交換によって生じた水素ガスを密封する容器とそのガス圧を推力に変換する金属ベローズで構成される。動作試験の結果から、MHアクチュエータは水素内圧を制御することによりその剛性すなわち堅さを調整でき、出力重量比は2700倍になることを確認した。この値は、例えば、10 gの合金があれば27 kgfの推力を発生できることを意味しており、現存するいずれのアクチュエータよりも出力重量比が大きい。5万回の連続使用などによって耐久性が十分補償されていること、および使用時に音がほとんど発生しないことも確認した。

以上のことを踏まえて、生体の筋-関節系の機構を参考に、2基のMHアクチュエータを利用した拮抗型MHアクチュエータ・システムを提案し、動作試験を行った。その結果、変位位置は2基のMHアクチュエータの内圧の差に比例し、剛性は内圧の和に比例することが分かった。また、この剛性の逆数であるコンプライアンスの可変範囲は、おおよそヒトの肘関節と同じであることを実験的に確認した。

第3章では、MHアクチュエータを利用した人工現実感のためのフォース・ディスプレイ・システムおよび上肢機能のリハビリテーション支援装置の設計指針を得るために行った上肢（肘関節）の力の感覚特性について述べた。まず、肘関節から20 cm遠位の前腕前面における力感覚を加重状態と抜重状態に分けて調べた。その結果、呈示力が2 kgf以上の場合には双方ともWeber比は一定となり、その値は約0.2であった。2 kgf以下ではWeber比は急激に上昇した。次に、フォース・ディスプレイと皮膚との接触面積の違いによる力感覚への影響を調べた。その結果、力感覚は接触面積の違いにはほとんど影響を受けないことが分かった。さらに、肘関節の剛性を変化させた場合の力感覚への影響を調べた結果、主動筋と拮抗筋の双方を活動させて剛性を高めた状態では、明らかに主動筋のみの活動時に比較して閾値の低下が見られた。以上の結果から、フォース・ディスプレイとその制御系を設計する上で要求される仕様を考察した。

第4章では、MHアクチュエータを利用して試作したフォースディスプレイの開発とその評価について述べた。まず、MHアクチュエータを利用したフォース・ディスプレイの設計指針を明確にした。次に、試作したフォース・ディスプレイの評価実験として、試作器とヒト肘関節のステップ加重負荷に対する変位応答特性を調べた。その結果、双方の応答パターンは類似しており、試作ディスプレイのヒト肘関節へ適合性は比較的良好であると推察した。他方、MHアクチュエータは第2章で確認したようにヒトへの装着性に優れていることに着目し、フォース・ディスプレイの福祉機器への応用として、肘関節機能障害者のリハビリ訓練機器であるCPM（Continuous Passive Motion）装置への展開を試みた。そこで、リハビリ療法士の手技の動作パターンの解析実験を行い、その結果をフォース・ディスプレイの制御プログラムに組み込む方式のMHアクチュエータ式CPM装置の提案を行った。以上より、MHアクチュエータを利用したフォース・ディスプレイは、人工現実感やリハビリテーションの分野に貢献する新規性と有用性を備えるものであることを確認した。

第5章では、本研究の成果を総括し、MHアクチュエータ式フォース・ディスプレイの残された課題と展望について述べた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 伊 福 部 達
副 査 教 授 清 水 孝 一
副 査 教 授 勇 田 敏 夫
副 査 教 授 和 田 充 雄

学位論文題名

ヒトの力感覚特性に基づくフォースディスプレイの研究

次世紀に向けたコンピュータやロボットとのコミュニケーションのあり方のひとつに人工現実感やテレグジスタンスという新しい人間中心のマン・マシン・インタフェース技術がある。この新しい工学技術の応用分野は電子情報系やメカトロニクスのみならず、医療、福祉、教育、芸術などの生活に直接関係する諸分野にも及び、その社会的な要請は非常に高まってきている。

人工現実感やテレグジスタンスのマン・マシン・システムにおいて、視覚ディスプレイを介して仮想空間に入ったとき、視覚情報だけでなく、その空間内に映し出された物体を手にする事ができれば、より臨場感のある体験をすることができる。このように本研究で対象としているフォース・ディスプレイの果たす役割はきわめて大きい。

また、力情報をヒトに違和感なく呈示するためには、あらかじめヒトの力情報の知覚特性について把握しておくことが不可欠である。しかし、フォース・ディスプレイ設計に必要な力感覚の基礎的知見は他の感覚と比較して極めて乏しい状況にある。

本研究の目的は、ヒトの感覚に適合するフォース・ディスプレイを開発することである。具体的には、フォース・ディスプレイに適した新しいタイプのアクチュエータの開発と肘関節の力感覚特性を調べる心理物理的研究を並行して進め、これらの開発と研究で得られた成果に基づいてヒト上肢用フォース・ディスプレイを試作し、その評価から有用性と今後の発展性を明確にしている。さらに、このフォースディスプレイの福祉工学分野への応用例として、肘関節機能障害者のための関節可動域訓練装置への利用を提案している。

本論文は、全5章から構成されている。

第1章では、本研究の背景として研究対象となるフォース・ディスプレイの現状と研究の目的について述べている。

第2章では、フォース・ディスプレイのアクチュエータとして、他のアクチュエータにない特徴を有する水素吸蔵合金(MH)アクチュエータを提案し、実験によりヒトの感覚への適合性について考察している。まず、このアクチュエータは、常温での平衡水素圧が1 atmであるCaNiMnAl系の合金を使用し、10 gの合金があれば27 kgfの推力を発生可能とし、5万回の連続使用などによって耐久性が十分補償されていること、および使用時に音をほとんど発生しないことも確認している。つぎに、生体の筋-関節系の機構を参考にした、2基のMHアクチュエータを利用した拮抗型MHアクチュエータ・システムを提案し、動作試験によって、変位位置は2基のMHアクチュエータの内圧の差に比例し、剛性は内圧の和に比例することを示している。また、この剛性の逆数であるコンプライアンスの可変範囲は、おおよそヒトの肘関節と同じであることを実験的に確認している。

第3章では、ヒトの力知覚に関する心理物理実験により得られた結果について述べ、それに基づきMHアクチュエータを利用したフォース・ディスプレイとその制御系の設計仕様を考察した。まず、肘関節から20 cm 遠位の前腕前面における力感覚を加重状態と抜重状態に分けて調べた結果、呈示力が2 kgf 以上の場合には双方とも Weber 比は一定となり、その値は約0.2であった。2 kgf 以下では Weber 比は急激に上昇することを確認している。次に、フォース・ディスプレイと皮膚との接触面積の違いにより力感覚はほとんど影響を受けないことが分かった。

第4章では、MHアクチュエータを利用して試作したフォースディスプレイの開発とその評価について述べた。まず、MHアクチュエータを利用したフォース・ディスプレイの設計指針を明確にしている。次に、試作したフォース・ディスプレイとヒト肘関節のステップ加重負荷に対する変位応答パターンは類似していることを示し、試作ディスプレイのヒト肘関節へ優れた適合性について述べている。また、リハビリテーションにおける療法士の手技の動作パターンの解析実験の結果から、フォース・ディスプレイの制御プログラムに組み込む方式のMHアクチュエータ式関節可動域訓練装置（CPM装置）を提案している。

第5章では、本研究の成果を総括し、MHアクチュエータを利用したフォース・ディスプレイが、人工現実感やリハビリテーションの分野に貢献する新規性と有用性を備えるものであることを述べている。

以上のように、本研究はヒトへの力情報の適切な呈示を可能とするフォースディスプレイを基礎研究に基づいて開発し、その有効性を評価したものであり、生体工学に寄与するところが大きい。

よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。