

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

主論文の要旨

論文題目 力・触覚・疑似力触覚の融合による人工現実感の高度化

氏名 坪井 諭之

論文内容の要旨

現代の情報化社会では、家庭の情報家電、電車の自動券売機、銀行の自動窓口機などあらゆるものが情報システムに支えられている。本研究では、誰もが容易に情報システムを利用できるようにすることを目指して新しいハプティック・インタフェースの開発と感覚呈示の演出方法に関する標記の研究を進める。

情報機器の操作では、現前しない仮想のボタンやカーソルに触れ、作業を行い、人間と情報システムとのインタラクションが生じる。したがって、情報システムは、いわば一種のバーチャルリアリティ（VR）システムであると言える。すなわち、VR技術は、私たちの日常生活で自然に触れている馴染み深いものとなっており、生活を支える必要不可欠なものとなっている。しかし、現状として、情報機器の操作は、年齢・性別を問わず誰もが利用できるまでには至っていない。これには、主に二つの要因が考えられる。第一に、利用者がシステムおよび機器についての予備知識と経験が必要であることが挙げられる。システムおよび機器の開発には、人間の知覚に適した設計が必要である。第二に、電子技術および情報技術の発達による多機能化・高機能化に伴い、機器の操作がより複雑になったことが挙げられる。現代の日本では、少子高齢化が進んでおり、あらゆるユーザが簡単に操作をすることのできる機器の需要が高まっている。

以上のような問題を解決するためには、人間とシステムを結び付けるヒューマン・インタフェースが人間にやさしいものとなる必要があり、本研究のハプティック・インタフェースの開発もこの方針に従う。すなわち、物体操作を伴うVRでは、対象物体の位置・姿勢および形状を認識し、把持や移動・回転などの反復動作を行うため、視覚、力覚、触覚に適合した刺激を呈示することで操作者を支援するヒューマンフレンドリー・インタフェースが求められる。しかし、現状として、これらの感覚を融合したマルチモーダル・インタフェースについてはあまり議論されていない。また、これまでのハプティック・インタフェースでは、操作者に拘束感や疲労感を与えてしまうとともに、直観的な操作についても実現できないという問題もある。そこで、本研究では、低拘束かつ低疲労であり、直観的な操作ができる人間にやさしいインタフェースを開発する。力・触覚・疑似力触覚を融合呈示可能な複合ディスプレイを開発して、これにより演出できるモダリティ間相互作用により、認識および操作の両面における精度を向上する。

本研究の第一の目的として、低拘束かつ低疲労であり、力・触覚・疑似力触覚を融合呈示可能な複合ディスプレイを開発する。低疲労の3次元操作を可能とするために、「2.5次元操作」という新たな概念を提案する。腕の重量が影響する鉛直方向の運動を指先の接触力による位置制御に置き換える手法を提案することで、最小限のエネルギーでの操作を実現する。さらに、操作部をマウスと類似した形状とすることで、前提知識を要しない直感的な操作を可能とする。

第二の目的として、多自由度での接触を可能とすることで、操作者に3次元形状を知覚させるための制御方法を確立する。一般的な力触覚ディスプレイでは、物体との接触が点接触となっており、より自然な方法である面接触による触診の実現が課題となっている。そこで、本研究では、3次元VR空間内でより直観的な作業を可能にするために、VR空間内において操作者の指先位置を表すVR呈示面の姿勢を力感覚によって制御する手法を提案する。これによれば、接触面を調整できるので、操作者は曲率や表面の凹凸情報についてより微細な変化の知覚を可能とする。

第三の目的として、硬軟感を表現するために、触覚ディスプレイによる触刺激と疑似力触覚を同時に呈示する方法を提案し、有効性を検証する。現在の触覚呈示における研究では、表面テクスチャ感について扱ったものが格段に多く、その他の触覚要素に関してはほとんど議論されていない。そこで、触錯覚現象を利用することにより脳を騙すことで現実感を生じさせる戦略をとる。本研究では、触覚情報と視覚情報を変化させることによって硬さ感覚を呈示する。触知ピンによる触刺激と疑似力触覚を組み合わせることで、双方の呈示能力を補完し、強調することを可能とする。

第四の目的として、本研究で開発するディスプレイを評価するとともに、力触覚ディスプレイに対する評価方法の確立に向けて、心理物理実験を利用した方法を提案する。第一に、VRにおける力覚・触覚呈示の有効性を検証するために、VR物体の整列精度に関する比較実験を行う。第二に、3次元空間における直感的な操作の達成度を評価するために、直方体の高さの識別精度を調査し、弁別閾を求める実験を実施する。第三に、多自由度での接触によって呈示可能なVR物体の曲率の限界を調査するために、2つのVR球の直径の識別精度を求める。なお、物体形状を呈示する上で、触り方による認識精度の違いについて調査し、適した触診方法を検討する。第四に、硬軟感の呈示性能を評価するために、シェッフェの対比較法、浦の変法を用いた球の硬さ識別に対する官能評価実験を行う。

本研究で得られた結果を以下に要約する。

第一に、人間にやさしい革新的なヒューマン・インタフェースの確立を目指して、皮膚と筋・腱の感覚器官に刺激を与えることのできる力覚・触覚融合形2.5次元ディスプレイを開発した。本装置は、平面3リンクマニピュレータおよび先端に搭載した4x12のピン・アレイ形触覚ディスプレイから構成される。触覚ディスプレイの呈示面は十分大きいので、指三本で対象を触ることができる。それに加えて、接触力を鉛直方向変位に置き換えることによる物体操作の実現と力触覚呈示が物体操作の精度に与える影響について検討するために評価実験を行った。力覚のみの呈示と力覚・触覚融合呈示の2条件におけるVR物体の整列精度を比較した。実験において、力覚のみの呈示よりも力覚・触覚融合呈示の方が高い整列精度を得ることを確認した。

第二に、高さ方向の位置制御に対して、適切な接触力-位置の関係を求めるとともに、モーメントを回転角度情報に置き換えることによる触知方式を提案した。まず、VR呈示面の姿勢の安定した操作を実現するために、推定値の誤差を計測し、重心位置推定の精度を評価した。実験結果から、ディスプレイ面の中心付近における重心位置推定の安定性を確

認した。したがって、VR 提示面の姿勢を自然に制御できるので、VR 空間において直観的な操作を可能とした。次に、2つのVR 直方体の高さの識別精度を調査し、弁別閾を求める実験を実施した。そして、ディスプレイ面に対する接触力とVR 提示面の高さ位置の関係を表す適切な比例定数は $3.5[\text{mm}/\text{N}]$ であることが分かった。また、指の重心位置の移動情報を利用し、VR 提示面の回転に関する自由度を増加させる手法によって提示可能なVR 物体の曲率の限界を調査した。それに加えて、本装置に適した触診方法について検討するために、球を撫で回す方法と球の表面を反復するように軽く触れる方法による球識別精度を比較した。実験結果から、各被験者の弁別閾が小さいことから、本装置は触覚による物体の認識に有効であることを確認した。したがって、操作者は本装置によって微細な球の曲率を表現することを可能とした。なお、提示するVR 球の直径が比較的小さい場合または大きい場合における球識別に対して、球の表面を反復するように軽く触れる方法は、球を撫で回す方法よりも有効であることを確認した。

第三に、疑似力触覚と分布圧覚提示が硬さ知覚へ及ぼす影響について検証した。触覚情報と視覚情報を変化させることによって硬さ感覚を提示する手法を提案した。まず、触知ピンの最大ストロークを変化させる。それに加えて、VR 物体にVR 提示面が接触した後に、ディスプレイ面への接触力と高さ位置の関係を表す比例定数を変化させた。提案手法の有効性を検証するために、シェッフエの一対比較法、浦の変法を用いてVR 球の硬さに対する官能評価実験を行った。被験者は、試料のVR 物体に対して硬さを評価した。被験者は、触覚提示の感じ方によって2つのグループに分類された。しかし、接触力と高さ位置の関係を表す比例定数が小さくなるにつれて、VR 球をより硬くなるとすべての被験者が評価した。そのため、提案手法によって硬さを表現可能であることを確認した。

今後の予定としては、本装置を用いたシステムの応用を行い、人間の支援を行うことから実用的なシステムへと発展させることを目指す。本装置の有する広い触覚提示面を活用することで、VR 表面上に配置された凹凸形状の相互関係を理解することが容易になると考えられる。したがって、VR 表面をなぞって理解したり、表面上に配置された物体を操作する作業に適している。対象を触って操作する作業は、手の機能を回復するためのリハビリテーションに役立つことが期待できる。

なお、球の直径や直方体の高さ識別実験では、被験者にVR 空間に関する視覚情報を与えないにも関わらず、被験者はVR 空間の微細な変化を認識することができた。したがって、本装置による感覚情報の提示によって、視覚情報に頼る傾向のある情報機器の操作において操作者の負担を軽減させることが可能であると考えられる。さらに、本装置は視覚情報を触覚情報で代行する感覚代行システムへの発展も期待できる。

また、本装置による力覚・触覚・疑似力触覚の提示によれば、インターネットショッピングや学習ソフトウェアにおいても、力触覚情報による確認ができるので取引の促進や学習効果の向上が期待できる。

以上のように、本研究で開発した装置と制御方法は、VR の高度化を実現する上有効であり、これにより応用範囲が広がるものと思われる。したがって、上で例示した研究以外にも種々の後続研究が期待される。