

論文の内容の要旨

論文題目： 身体運動を用いた装着型ハプティックディスプレイの研究

氏名： 南 澤 孝 太

本論文は、情報環境において容易に利用可能でありながら高品位の触覚情報を提示できるハプティックインタラクションシステムによって触覚情報を用いたコミュニケーションを実現することを目的とする。そこで、人の触運動知覚に着目し、身体運動と皮膚感覚の協調効果に関する実験的な検証を通じて、身体運動と協調し効果的に触覚情報を提示する装着型ハプティックディスプレイの設計手法を提案した。また、提案した設計手法を用いた3次元視触覚情報提示システムを構築し、コミュニケーションにおける触覚情報の有用性について検証を試みた。

第1章では、序論として、コミュニケーションメディアの進化における触覚情報の位置付けについて考察し、触覚を伴う「体験」の伝達と共有を行うコミュニケーションメディアを実現するための基盤技術を構築することを本研究の目的と設定した。また皮膚感覚と自己受容感覚から構成される人の触知覚の機序において、能動的な触知動作における触運動知覚が、利用者の身体性を担保し対象物体の存在感を提示する上で重要であることを考察した。従来の触覚提示手法については利用形態から環境型・把持型・装着型の3種、支点の設置方法から設置型・非接地型の2種に分類できることを示し、これらの触覚提示手法について関連研究を挙げ概説した。これらの考察から、触覚における感覚要素間の相互作用、特に圧・振動覚と運動・姿勢覚との相互作用に着目し、感覚要素の組合せにより生じる触知覚現象や、触覚の認識における感覚要素間の役割分担を明らかにすることで、人の触知覚メカニズムを活用した装着型ハプティックディスプレイの設計手法を構築するという研究の方針を定めた。

第2章では本論文を通して用いる装着型ハプティックディスプレイの設計と実装を行った。利用の容易さを確保するためシンプルな触覚提示機構を設計する必要があり、触覚情報の提示自由度の取捨選択を行うことで機構自由度を抑制し、デバイスの簡易化を図った。まず皮膚感覚の提示手法としては、指先の垂直力とせん断力の提示が有効であることを確認し、各指2自由度を持つ指先装着型の皮膚感覚ディスプレイを開発した。2個のモータとモータに取り付けられたプーリーを通して駆動されるベルトを用いることで、指腹部に垂直圧力と剪断力を提示する機構を提案し、提案機構に基づき実装した指先装着型触覚ディスプレイは指先から根元までの間に十分収まる程度に小型で、1指あたり45gと、軽量に実装することができた。本デバイスを用いて剪断力による重量感覚の提示実験を行った結果、十分な解像度での重量感覚の提示を行えることを確認した。次に自己受容感覚の提示手法については、指先から手首にかけての自己受容感覚を欠如しても、肘から肩にかけての4自由度の力覚提示のみでも十分な重量感の伝達が行えることを確認した。さらに200gf以下の力の提示に限定すれば、皮膚感覚刺激のみでも十分な重量感の提示が行えることを確認した。すなわち比較的小さな力の提示で十分な状況においては、装着型皮膚感覚ディスプレイを、自己受容感覚の成分も含むハプティックディスプレイとして捉えることが可能となり、非常に簡易な装置による高品位な触覚情報提示が実現されたといえる。

第3章では、重量の知覚における皮膚感覚と固有受容感覚の役割分担および統合の効果について検証し、皮膚感覚は小さい力で優位に働き、固有受容感覚は大きい力で優位に働くという、相補関係にある

役割分担が存在することを確認した。また皮膚感覚と固有受容感覚が統合されることで、知覚域全体でのフラットなパフォーマンスが達成されていることを検証した。

第4章では、身体性を有する触覚情報の提示技術を開発するため、人の把持動作における皮膚感覚と自己受容感覚の役割分担と統合効果について、第2章で開発した指先装着型ハプティックディスプレイを利用した心理物理実験を通じて解明し、効率的な触覚情報提示手法の構築を図った。まず、重量感の提示においては、拇指と示指の2指で把持する状況においては、200g以下の重量の知覚においては皮膚感覚が優位であり、200g以上の重量知覚においては自己受容感覚が優位であることを確認した。この結果から、皮膚感覚は知覚範囲が狭いが分解能は高く、自己受容感覚は分解能が低い而知覚範囲は高い、という相補関係にある役割分担が存在することが示唆された。次に物体の実在感の提示に関して、指先に対する皮膚感覚刺激を身体運動と協調して提示することによって、一般に自己受容感覚が主とされる物体の位置および大きさの知覚についても提示可能であることを示した。特に拇指と示指による把持動作において、一指での知覚よりも高い制度での大きさ知覚が確認され、触運動知覚における手の姿勢覚と皮膚感覚の協調を実現することができた。また同様に手掌においても、手掌部装着型ハプティックディスプレイ(図2)を開発し、皮膚感覚によって物体の位置知覚が可能であることを確認した。さらに両手での把持動作においては指ほど顕著ではないが姿勢覚との協調により知覚制度が向上することを確認した。最後に、能動触の知見に基づき、本デバイスによる重量感覚 (Weight Sensation) 提示を質量感覚 (Mass Sensation) 提示に拡張することを提案した。これまでは重力による重量感を提示していたが、運動加速度による慣性力をパラメータとして加えることで、バーチャルな物体に能動的な動きを加えたときの慣性質量の提示が可能となる。具体的には、物体の持ち上げ・回転・横振りの各動作における質量感覚の提示手法に関して検討を行い、デバイスに加速度センサを取り付けることで運動加速度を測定し垂直力と剪断力の組み合わせによる質量感覚提示を実装した。そして質量感覚提示により利用者の物体重さ弁別能力が向上することを心理物理実験によって確認し、質量感覚提示の有効性を示した。さらに物理シミュレーションを用いて物体の内部ダイナミクスの計算を行い、拡張現実感 (Augmented Reality) の概念に基づき、現実の物体に複数のバーチャル物体の触覚情報を重畳できることを示した(図1)。

第5章では、第2章で開発した装着型触覚ディスプレイ、および第3章で提案した触覚提示手法を利用して、3次元の視触覚情報を提示する情報環境を構築し、提案手法の有効性を実証した。まず、手全体でのインタラクションを実現するため、これまで設計した指先装着型ハプティックディスプレイと手掌部装着型ハプティックディスプレイを統合し、手袋型のハプティックディスプレイを実装した。また物理シミュレーション空間において手のモデルを構築し、バーチャルな手と物体との接触における手の各部位での垂直力と剪断力の実時間計算を行った。これによりバーチャル環境との触覚を介した3次元インタラクションは実現できたが、視覚情報が2次元的であると、触る前の段階での物体の位置認識が正しく行えず、身体運動の行動計画が立て難いことから、3次元の視覚情報と触覚情報の位置を一致させ、「見たものを見たままにさわれる」情報環境を構築することの重要性を確認した。そこで立体映像の提示を導入し、視覚情報と触覚情報の位置の一致により実在感の向上が行えることを心理物理実験により検証した。最後に、これらの知見を統合し、全周囲立体映像提示装置 TWISTER において手袋型ハプティックディスプレイを用いた、3次元視触覚情報提示システムを構築し、身体性を有する触覚コミュニケーションメディアの有効性を確認した。

以上のように、本論文では身体運動と触覚提示の協調に着目した触覚提示手法を提案し、身体運動を妨げない小型の装着型ハプティックディスプレイを開発し、身体運動に連動した触覚提示の効果を心理物理実験により検証した。触覚提示手法の設計においては特に人の把持動作における触運動知覚に着目し、触動作における皮膚感覚と姿勢覚・運動覚との感覚統合による対象物体の知覚の特性を、心理物理実験を通じて究明した。本研究において、身体運動と触覚提示の協調の効果を究明し、触覚提示手法の設計に応用したことによって、従来にはないシンプルなハプティックディスプレイが実現されるとともに、従来の触覚提示手法では伝達できなかった優れた触体験の伝達が可能であることが示された。

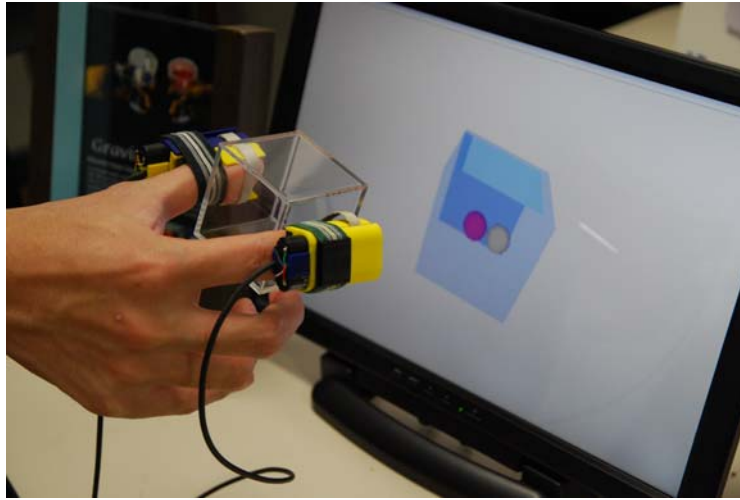


図1: 指先装着型ハプティックディスプレイを用いた触覚情報の拡張現実感

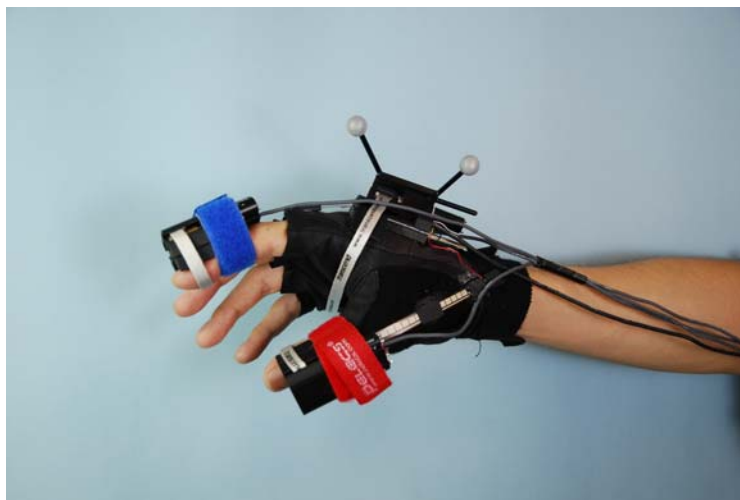


図2: 手袋型ハプティックディスプレイ