

審査の結果の要旨

氏名 南澤孝太

本論文は「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」と題し、6章から成る。バーチャルリアリティの分野では、立体映像を用い視覚情報を介して物体の実在感を伝達する試みは多くなされているが、映像のみでは提示された物体を操り体験することができないため、触覚情報を介した実在感の伝達の必要性が着目され、近年盛んに研究が行われている。その結果アクチュエータを内蔵したリンク機構によって手先に力を提示するシステムは既に数多く提案され実用化に至っているものの、自由な動作を行いながら高臨場感の触覚情報を提示できるウェアラブルなシステムはほとんど実現されていない。本論文では、人の能動的な身体運動における触運動知覚に着目することで、シンプルな装着型ハプティックディスプレイを設計し、身体運動と協調した触覚情報の提示に関する心理物理学的知見を得て、触運動知覚の再現による物体の実在感の提示法を構築した。さらにこれらの知見を応用したハプティックインタラクションシステムを構成することで、その有効性を実証し、身体性を有するハプティックインタラクションという応用分野への発展の道を拓いている。

第1章「序論」は、緒言であり、コミュニケーションメディアの発展とバーチャルリアリティ技術の関係について概説し、本論文で扱う触覚情報について、人の触覚知覚に関する生理学的知見およびバーチャルリアリティにおける触覚情報の提示手法という2つの観点から従来の知見および技術を論じることで、パブリックスペースや家庭において日常的に利用可能な、見聞きするだけでなく、手で触り、操ることができる能動的な「体験」を提供する情報環境であるハプティックコミュニケーションメディアを提案している。その実現に向けた基盤技術として、日常生活で利用可能なツールとしての「シンプルさ」と対象がそこに存在するような触覚的「実在感」の提示を両立するハプティックディスプレイの開発を行うとして、本研究の目的と立場と意義を明らかにしている。

第2章は「装着型ハプティックディスプレイの設計」と題し、日常生活で利用可能なシンプルさを備えながら自在な身体運動と協調した触覚提示を行うことができる非接地・装着型ハプティックディスプレイの開発にあたり、まず、本研究が目指す実在感の提示を、能動的な身体運動における触覚の身体性を成立させることで実現することを提案し、さらに身体性の成立条件を運動の自在性と触覚の同期性であると定めている。従来の触覚提示手法では高品位な触覚情報を提示しようとするシステムが複雑になる傾向があるため、運動の自在性を達成することを目的として、ハプティックディスプレイの設計方針として、触覚の提示自由度の削減、および皮膚感覚提示と固有受容感覚提示の独立設計を掲げている。まず提示自由度を削減するために再現する触覚の物理特性として物体の位置、大きさ、重さを選択し、次いで、皮膚感覚提示における提示自由度の削減として、「固有受容感覚を提示せずとも皮膚感覚の提示のみによって重さの感覚を伝達し得る」という仮説を提案し、その妥当性を様々な重さの実物体を用いた心理物理実験によって確認している。その結果、皮膚感覚の提示においては指先の垂直力と剪断力の提示が有効であることを確認し、1指あたり2自由度と、従来の手法より大幅に自由度の削減を行った指先装着型皮膚感覚ディスプレイを設計している。さらに固有受容感覚の提示自由度の削減として、提示する関節自由度数と重量知覚における弁別閾の関係、心理物理実験を通じて測定し、求められる弁別性能に対して最低限必要な自由度数を設計することを可能としている。例えば提示重量に対して12%程度の弁別閾値が達成されれば十分な状況においては、指先から手首にかけての固有受容感覚を削減し肘から肩にかけての4自由度の提示を行うのみで十分な重量感の伝達が行えることから、従来手法より簡易な機構による触覚提示が可能であり、さらに200g以下程度の比較的小さな重量に限定すれば、前述の仮説が成立し、皮膚感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ている。すなわちこの状況においては設計した装着型皮膚感覚ディスプレイを装着型ハプティックディスプレイとして捉えることが可能であると示され、これら

の結果に基づいて、指先装着型ハプティックディスプレイの実装を行っている。

第3章は「皮膚感覚と固有受容感覚の協調」と題し、人の重量知覚に伴う皮膚感覚と固有受容感覚の役割分担と相互作用について、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の構築を図っている。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固有受容感覚が優位であることを確認している。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、固有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し、双方が協調することで人の知覚としてフラットな重量知覚が達成されていることを示唆している。

第4章は「身体運動と協調した触覚提示手法」と題し、身体性を有する触覚情報の提示技術を構築するため、人の把持動作における皮膚感覚と運動感覚の協調による触運動知覚について、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、身体運動を利用した触覚情報提示に関する知見を得たとの報告を行っている。まず、触運動知覚の知見に基づき、本デバイスによる重量感覚提示を慣性力も含む質量感覚提示に拡張することを提案し、物体の持ち上げ・回転・横振りなどの運動中における質量感覚の提示に関して検討を行い、質量知覚の分解能が向上することを検証し、質量感覚提示の有効性を示している。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実時間計算を行うことで、より詳細な触覚情報も提示可能であることを示し、また、身体運動と協調した接触圧力の提示により、物体の位置および大きさについても提示可能であることも示している。その結果、特に把持動作において高い精度での大きさ知覚が可能であることが確認され、触運動知覚における手の固有受容感覚と皮膚感覚の協調が実現されている。

第5章は「身体性を有するハプティックインタラクションシステムの構築」と題し、提案した装着型ハプティックディスプレイおよび身体運動と協調した触覚提示手法を用いて、触覚の Augmented Reality の概念の基づき実物体とバーチャルな物体の触覚情報をシームレスに融合する GravityGrabber、空中でのバーチャルな物体の把持操作が可能な AirGrabber、手全体でのインタラクションを実現する手袋型のハプティックディスプレイ GhostGloves 等のハプティックインタラクションシステムを構築し、身体性を有するハプティックコミュニケーションメディアの有効性を実証している。

第6章「結論」は結語で、本論文の結果をまとめ、今後の展望を行っている。

以上、これを要するに、本論文は、日常生活で利用可能なシンプルさを備えながら、自在な身体運動と協調した再現性の高い触覚情報を提示する非接地・装着型ハプティックディスプレイを開発し、能動的な身体運動における触覚の身体性を成立させ、物体の実在感を伝達する触覚情報メディアの可能性を拓いたものであって、システム情報学、触覚学およびバーチャルリアリティ学に貢献するところが大きい。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。