

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 野嶋 琢也

本論文は「触覚におけるオーグメンティドリアリティに関する研究」と題し、5章からなる。オーグメンティドリアリティとは、現実環境にバーチャルな情報環境を適切な形で融合して人に提示する技術であることから、現実世界における人間の作業支援に対しても有効な技術であると考えられている。しかし従来のオーグメンティドリアリティに関する研究では、主として視覚を通じてバーチャルな視覚情報の提示がなされてきており、人は情報の提示による指示などの支援は受けられるが、手を取って助けるといった直接的な支援を受けることはできないという問題点があった。本論文では、特に対象の切断や変形を伴うような相互作用を伴う作業において、手応えという現実の触覚情報に加えてバーチャルな触覚情報を重畳提示することによって人の作業を直接支援することを可能にする、触覚のオーグメンティドリアリティという概念を提案し、実際にその概念に基づいて提示システムを構成し、その有効性を示すことにより応用への道を拓いている。

第1章「序論」は緒言で、従来のバーチャルリアリティ(VR)研究における現実世界の再現のための触覚提示ではなく、人に対する情報の提示手段としての触覚に着目し、これをオーグメンティドリアリティという枠組みの中で活用することを提案し、この概念を実用的なアプリケーションへと応用することを目的として、その一例として医療用支援システムの構築を目指すという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、「触覚におけるオーグメンティドリアリティ」と題し、第1章において指摘された問題点に基づき、現実の触覚情報に加えて、バーチャルな触覚情報を融合・提示する技術としての触覚のオーグメンティドリアリティの提案を行うとともに、本概念を実現する上で必要な要件が、現実世界の触覚情報とバーチャルな触覚情報が同時に得られること、両者とも実時間での相互作用が可能であること、バーチャルな触覚情報と現実世界の触覚情報とが適切にレジストレーションされていることであることを明確にしている。また、この触覚のオーグメンティドリアリティを実現するための触覚の提示方式には、Feel-Through 方式と Feel-Wired 方式があり得ることと、提示すべき情報の取得様式としては、事前に構築された非実時間のデータを利用する方法と、センサを利用して実時間で計測しつつ提示を行う方法、さらにその両者の併用という3つの方法があり得ることを指摘し考察している。その結果、実世界作業支援に Feel-Through 方式を利用する方式を用いれば、より直接的な支援が可能で、かつ Supervisory Control を導入することができるといった利点に加えて、既存の道具を利用することで既存のスキルとの共存も可能となることを明らかにしている。

第3章は「システム構築」と題し、第2章においてその長所が明らかにされた、Feel-Through 方式の触覚提示方式による、触覚のオーグメンティドリアリティを実現するためのシステムの試作を行っている。その際、高いバックドライバビリティを有して、十分な作業スペースを確保し、提示されるバーチャルな触覚情報と現実の触覚情報が同じ部位から同時に感じられるといった点を最優先に設計すべきであるというシ

システムの設計指針を導いている。特に実時間で計測を行いつつ提示を行う方式の場合にはさらに、センサを道具の先端に搭載することが望ましいことを指摘し、これらの指針に基づいて、並進3自由度、回転3自由度の計6自由度で、並進3自由度の力が出力可能なバーチャルピボット構造の触覚提示システムの試作を行い、試作機を利用して触覚のオーグメンティドリアリティを利用することの効果を確認する実験を行っている。すなわち、人間の反応時間に対する支援の実験を行ったところ、従来の視覚や聴覚におけるオーグメンティドリアリティを利用した場合には反応時間には改善が見られず、触覚を通じた提示の場合でも、単純に振動感覚で情報の提示を行った場合には、視覚や聴覚と同様に改善は見られず通常の人間の反応時間と同程度の0.2[s]程度であった。一方、触覚のオーグメンティドリアリティを利用した場合には、0.045[s]と大幅な改善が認められ、従って提案システムによる支援の効果が明確に現れたとしている。

第4章は「経蝶形骨洞手術支援システム」と題し、これまでの議論と基礎実験をふまえて、提案した触覚におけるオーグメンティドリアリティの手術への利用といった実問題への応用を提案し、その一例として経蝶形骨洞手術に対する支援システムに適用することを提案している。提案手法により血管や神経といった侵襲すべきでない、非侵襲領域をバーチャルな壁で保護し、術者をより直接的に支援することが可能となる。術者はバーチャルな壁の内側では従来通りの手応えを感じつつ手術を遂行することが可能であり、予め指定した領域に道具が近づいた場合には、バーチャルな壁からの反力という形でその情報を知ることが可能となるため、術者がそれまで身につけた技能を妨げることなく、あらたな支援システムとして導入することが可能となるとしている。この考えをシミュレーションなどで十分に検証したのち、①鼻腔からトルコ鞍にかけての内部形状が実際の頭骨と一致し、かつその経路が実際の手術と同様に確保され②腫瘍として想定する物の機械的性質として、実際の腫瘍のもつ固さや弾力性となるべく等しく、かつ自重により崩壊しない程度の強度を備えており、③適切な部位に腫瘍として想定する物が固定されていて、④腫瘍として想定する物の周囲に、内頸動脈や視神経などを含む、その他の重要組織を模擬する物が存在し、⑤MRI撮像可能であるという条件を満足する手術用ファントムを作成している。そのファントムを用いて、手術室に試作システムを導入して臨床医による実際の手術を行って、触覚におけるオーグメンティドリアリティによる手術支援の有効性と確認し、本格的な臨床に向けての改善点を実験的に明らかにしている。

第5章「結論」では、本論文の結論をまとめ、今後を展望している。

以上これを要するに、現実の触覚情報に加えてバーチャルな触覚情報を重畳提示するという、触覚におけるオーグメンティドリアリティという新たな概念の提案を行い、その利点を実験的に明らかにするとともに設計法を明確に示し、この概念を実現するシステムの試作を行い、実用的なアプリケーションへと応用することを目指し、その一例として医療用支援システムを構築して、その有効性を示して応用への道を拓いたものであって、システム情報学及び人工現実感工学に貢献するところが大きい。

よって、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。