

氏 名（本 籍）	横 山 哲 也（岐阜県）
学 位 の 種 類	博 士（工学）
学 位 授 与 番 号	甲第 278 号
学 位 授 与 日 付	平成 18 年 3 月 25 日
専 攻	生産開発システム工学専攻
学 位 論 文 題 目	実空間に即した力覚提示方法に関する研究 (Research on methods of haptic display based on real world)
学位論文審査委員	(主査) 教 授 川 崎 晴 久 (副査) 教 授 谷 和 男 教 授 山 本 秀 彦 教 授 佐々木 実

## 論 文 内 容 の 要 旨

Virtual Reality技術の発達により、視覚情報が提示された仮想空間に力覚を提示することが可能となった。力覚提示技術は、操作者が仮想空間のモデル（以下、仮想物体）に触れることを可能とし、製品設計および評価などの支援システムへの貢献が期待され、製品開発や医療において利用されつつある。また、仮想物体の弾性モデルを導入し柔らかい物体の力覚表現も可能となり、仮想空間のリアリティは向上している。

従来の力覚提示方法は、操作者に正確な力覚ではなく近似的な力覚を提示することで事足りてきたが、より使いやすい有効な技術とするには、提示される力覚を実空間の力学法則等に合わせる必要がある。従来の力覚提示方法では、①物体間の拘束感は、物体同士が干渉（重なる）ことで提示力を生成しているが、実空間では物体同士が重なることはない、②仮想物体間の多点接触の表現が難しい、③柔軟物体の変形は物体を空間に固定することを前提としているから、掴み操作で物体を移動させることができない、等の問題があった。本論文では実空間に即した力覚提示方法に関する研究として、仮想物体間に働く拘束感の提示、指先の掴み操作による柔軟物体の変形及びその際の重力影響を取り上げ、上記問題の解決を試みている。

はじめに、仮想物体間の接触時に働く拘束感の提示法を提案している。仮想空間での力覚提示装置による物体間の拘束感提示は、作業効率の向上に有効である。特に汎用性のあるシステムを開発するためには、非凸形状を有する一般形状からなる仮想物体同士の接触に伴う拘束感提示の検討が必要である。本論文では、幾何交差と最短距離を併用した衝突判定法と、線形計画法による物体間の干渉排除の手法を提案し、これにより、多面体で表現された一般形状の仮想物体同士が、干渉することなく多点接触の拘束感提示を可能とした。衝突判定に関しては、凸物体の集合に分解することなく、一般形状の物体同士の衝突箇所と侵入量を効率よく特定し、物体間干渉排除に関しては、衝突判定で得た多点衝突箇所とその侵入量から、線形計画法を用いて侵入解除を行っている。

次に、指先の掴み操作を想定した柔軟物体の変形の計算手法を提案している。従来手法は、前提条件として物体の一部を空間に拘束することで、剛性行列の逆行列を常に既知とし、変形、反力を求めていたが、空間に拘束されているため、掴んだ状態で物体を移動させることはできなかった。逆行列を算出すると物体の全ノード数の3次に比例した計算量が必要となり、実時間内での処理が難しい。そこで本論文では接触面に拘束条件を持たせ、Woodburyの公式の適用、および物体の全ノードに対して指先と接触しているノードが少ないことに着目し、計算量をノード数の1次比例にする計算手法を提案している。これにより、実時間内での柔軟物体の掴み操作が可能となっている。

最後に柔軟物体の掴み操作における重力の影響を考慮した計算手法を提案している。重力を重心1点に荷重させれば、変位算出および剛性行列の逆行列算出にかかる計算量が少なく、力覚提示処理に適しているが、長軸形状の物体変形は正確に表現できないため、重力荷重を適度に表面に分散させる計算手法を提案している。分散の程度による計算精度と計算時間の関係を計算機シミュレーションで示している。

以上の研究より、現実に応じた力覚提示を行うための物体間接触時の拘束感、指先の掴み操作による柔軟物体変形およびその重力影響を考慮した計算手法を示した。これらの研究成果は、仮想空間での作業支援システムの開発等への貢献が期待できる。

## 論文審査結果の要旨

Virtual Reality技術の発達により、視覚情報が提示された仮想空間に力覚を提示することが可能となった。力覚提示技術は、操作者が仮想空間のモデル（以下、仮想物体）に触れることを可能とし、製品設計および評価などの支援システムへの貢献が期待され、製品開発や医療において利用されつつある。また、仮想物体の弾性モデルを導入し柔らかい物体の力覚表現も可能となり、仮想空間のリアリティは向上している。

従来の力覚提示方法は、操作者に正確な力覚ではなく近似的な力覚を提示することで事足りてきたが、より使いやすい有効な技術とするには、提示される力覚を実空間の力学法則等に合わせる必要がある。従来の力覚提示方法では、①物体間の拘束感は、物体同士が干渉（重なる）ことで提示力を生成しているが、実空間では物体同士が重なることはない、②仮想物体間の多点接触の表現が難しい、③柔軟物体の変形は物体を空間に固定することを前提としているから、掴み操作で物体を移動させることができない、等の問題があった。本論文では実空間に即した力覚提示方法に関する研究として、仮想物体間に働く拘束感の提示、指先の掴み操作による柔軟物体の変形及びその際の重力影響を取り上げ、上記問題の解決を試みている。

はじめに、仮想物体間の接触時に働く拘束感の提示法を提案している。仮想空間での力覚提示装置による物体間の拘束感提示は、作業効率の向上に有効である。特に汎用性のあるシステムを開発するためには、非凸形状を有する一般形状からなる仮想物体同士の接触に伴う拘束感提示の検討が必要である。本論文では、幾何交差と最短距離を併用した衝突判定法と、線形計画法による物体間の干渉排除をの手法を提案し、これにより、多面体で表現された一般形状の仮想物体同士が、干渉することなく多点接触の拘束感提示を可能と

した。衝突判定に関しては、凸物体の集合に分解することなく、一般形状の物体同士の衝突箇所と侵入量を効率よく特定し、物体間干渉排除に関しては、衝突判定で得た多点衝突箇所とその侵入量から、線形計画法を用いて侵入解除を行っている。

次に、指先の掴み操作を想定した柔軟物体の変形の計算手法を提案している。従来手法は、前提条件として物体の一部を空間に拘束することで、剛性行列の逆行列を常に既知とし、変形、反力を求めていたが、空間に拘束されているため、掴んだ状態で物体を移動させることはできなかった。逆行列を算出すると物体の全ノード数の3次に比例した計算量が必要となり、実時間内での処理が難しい。そこで本論文では接触面に拘束条件を持たせ、Woodburyの公式の適用、および物体の全ノードに対して指先と接触しているノードが少ないことに着目し、計算量をノード数の1次比例にする計算手法を提案している。これにより、実時間内での柔軟物体の掴み操作が可能となっている。

最後に柔軟物体の掴み操作における重力の影響を考慮した計算手法を提案している。重力を重心1点に荷重させれば、変位算出および剛性行列の逆行列算出にかかる計算量が少なく、力覚提示処理に適しているが、長軸形状の物体変形は正確に表現できないため、重力荷重を適度に表面に分散させる計算手法を提案している。分散の程度による計算精度と計算時間の関係を計算機シミュレーションで示している。

以上の研究より、現実に応じた力覚提示を行うための物体間接触時の拘束感、指先の掴み操作による柔軟物体変形およびその重力影響を考慮した計算手法を示した。これらの研究成果は、仮想空間での作業支援システムの開発等への貢献が期待できる。

## 最終試験結果の要旨

論文の内容は、これまで国際会議で2件講演発表を行い、学術論文誌に2件掲載され、特許出願を1件行っている。博士後期課程学生としての必要な単位も修得し、公聴会での質問事項にも適切な回答をしており、学位論文の授与に値するものである。