

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Haptic Proxy for Dynamic Deformable Objects
著者(和文)	DingHaiyang
Author(English)	Ding Haiyang
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11585号, 授与年月日:2020年9月25日, 学位の種別:課程博士, 審査員:長谷川 晶一,中本 高道,山村 雅幸,青西 亨,小野 功
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11585号, Conferred date:2020/9/25, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	DING Haiyang	
論文審査 審査員		氏名	職名		
	主査	長谷川 晶一	准教授	小野 功	准教授
	審査員	中本 高道	教授		
		山村 雅幸	教授		
青西 亨		准教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は、動的で変形するバーチャル物体との力覚インタラクションにおける課題を指摘し、その解決法を提案するものであり、“Haptic Proxy for Dynamic Deformable Objects”と題し英文 6 章からなる。

第 1 章 “Introduction” では、背景と先行研究の課題が紹介されている。まず、力覚システムは実時間シミュレーションを必要とし、効率化のために連続時間の現象を有限の時間刻みで離散化するため、バーチャル世界の衝突判定にも離散時間衝突検出法 (Discrete Collision Detection method, DCD) が通常用いられると述べている。次に DCD を使用した従来研究の力覚レンダリングには「通り抜け」の問題があり、力覚ツールがバーチャル物体を飛び抜ける現象が生じること、その原因が離散化した時刻での物体間の衝突しか検出しない DCD にあることを説明している。一方、物体の軌跡上の全ての衝突を検出する連続時間衝突検出法 (Continuous Collision Detection method, CCD) は「通り抜け」の問題を解決するが、CCD を用いた従来研究は質量を持つ力覚ツールを対象としており、力のアーティファクト、つまり力覚提示の透明性を低下させる余分な慣性力が生じるという問題を指摘している。さらに、本論文がこれらの問題の解決を目的とすることを述べた上で、本論文の貢献を示している。

第 2 章 “The Context” では、技術的背景と先行研究を紹介しており、力覚レンダリング、力覚提示機能を持つ変形シミュレーション、CCD を用いた力覚インタラクション、マルチレート力覚レンダリング、シミュレーション手法について説明し、本研究がこれらの関連分野の最先端の研究成果を反映したものであると述べている。

第 3 章 “Overview of The Proposals” は、提案の概要を示す章であり、本論文の 2 つの提案とその関係、システム構成とシミュレーション手法の概要が説明されている。

第 4 章 “Three-Degree-of-Freedom Haptic Proxy with Dynamic Deformable Objects” では、1 つ目の提案を紹介している。提案は 3 自由度力覚レンダリング用のバーチャルプロキシのための連続時間衝突検出法 (CCD) であり、力覚デバイスのバーチャルリアリティ空間での表現として球体を用いることを説明している。また、3 角形メッシュで近似した球モデルと比較して、真の球モデルは触覚探索において滑らかな操作感を提供する上に計算コストを削減できるので、本研究ではプロキシに真の球モデル、物体形状モデルとして三角形メッシュモデルを採用すると述べている。計算手法としては、静止したプロキシと移動する三角形の衝突を連続に検出するために、プロキシと三角形の同一平面条件の方程式を利用して衝突時刻を計算するが、計算コストを削減するために、プロキシの中心位置と移動する三角形の間の衝突時刻を計算し、中心以外の衝突は Proxy popout 法 (DCD の反復による手法) により検出すると述べている。また、Proxy popout 法では複数の三角形を処理する際に 1 つの DCD 操作が別の衝突を発生させる可能性があるため、反復が必要であると述べている。さらに、安定した力覚インタラクションのために、三角形に基づくマルチレート力覚レンダリングを提案している。提案手法の評価実験については、布がプロキシの球を完全に通過した場合でも、高速に落下する布を受け止めることができたこと、提案された CCD の計算が効率的で、複数の動的で変形可能な物体で構成される複雑なシーンのシミュレーションでも、安定した力覚インタラクションができたことと述べている。

第 5 章 “Extension to A Six-Degree-of-Freedom Deformable Haptic Proxy” では、2 つ目の提案を紹介しており、6 自由度力覚レンダリングを実現するために前章の手法の拡張が提案されている。提案

手法では、プロキシの形状として複数の球モデルを用いており、この球がプロキシの変形計算のための Oriented Particle 法の粒子としても使用されることを説明している。さらに、現在の位置からデバイスの位置に配置した粒子に向かって衝突の可能性を計算することで、各粒子についてバーチャルプロキシ法が計算されること、その際、力のアーティファクトをなくすため、デバイスの位置は硬さ無限大の位置ベースの制約条件としてプロキシに適用され、制約解消の計算による「通り抜け」の問題を解決するために追加の衝突検出を行うことを説明している。また、安定した力覚インタラクションのために、ツールを構成する粒子の位置を同期させるマルチレート力覚レンダリングを提案している。評価としては、提案手法により変形可能な手と複雑に変形可能な布とのハプティックインタラクションを実現できたことを示している。

第6章“Conclusion”では、提案の要約を示すとともに、さまざまな物理現象を提示できるハプティックシステムについての研究の展望と、提案手法による力覚透明性の高い力覚操作の応用の展望を述べている。

以上要するに本論文は、新たな計算手法の提案により、動的に変形するバーチャル物体との力覚インタラクションの品質を向上させ、従来取り扱うことのできなかつた薄く複雑に変形する動的物体モデルを利用可能にするものであり、工学上の貢献が大きい。よって博士（工学）の学位論文として十分な価値を持つと認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。