

氏 名	くめ なお と 桑 直 人
学位(専攻分野)	博 士 (情 報 学)
学 位 記 番 号	情 博 第 226 号
学位授与の日付	平 成 18 年 9 月 25 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	情 報 学 研 究 科 社 会 情 報 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Distributed Massive Simulation for Haptic Virtual Reality Based Surgical Skill Transfer (大規模分散シミュレーションによる力覚提示型 VR に関する研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 吉 原 博 幸 教 授 富 田 眞 治 教 授 守 屋 和 幸

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、手術手技における技能伝達をめざし、バーチャルリアリティ技術（VR）を用いた手術手技トレーニングシステムの表現力を飛躍的に向上させる大規模分散シミュレーションシステムを提案したものである。精緻な力覚提示を目的とした物理法則モデリングによる汎用な臓器モデルを構築し、物理シミュレーションにかかる大規模な計算量を扱いつつ実時間応答を可能とするアプリケーションレベルの投機実行手法に関して述べたもので、7章から成る。

第1章は序論で、VR 訓練環境において際限なく要求されるシミュレーションの質の問題に対し、従来のパーソナルコンピュータ（PC）を用いた処理では対応できない点を指摘し、大規模計算機を用いた実時間応答システムの必要性に関して述べられている。

第2章では、本論文の背景とする VR を用いた技能伝達環境に関して概観したのち、既存の VR 手術シミュレータの設計手法と課題に関して述べられている。はじめに、技能伝達環境として熟練した動作の判断となる感覚を提示することの重要性をあげている。つぎに、VR 手術シミュレータの既存研究を挙げ、PC 上での臓器モデリングの限界に関して述べられている。最後に、従来おこなわれてこなかった臓器の破断時の力覚提示を可能とするシミュレータを提案し、剝離シミュレータの開発をテーマとして挙げている。また、大規模計算を要求する多感覚提示型の VR システムの実現が、VR 環境における動作の判断に必要な感覚を提示するために不可欠であると示されている。

第3章では、大規模計算結果の実時間応答による、臓器破断時の力覚視覚提示が可能な手術手技シミュレーションシステムの設計に関して述べている。本システムにより、臓器モデリングにおいて、計算資源の制約を受けることなく必要とする要件を満たすモデルの設計が可能になると示唆されている。物理シミュレーションを行うサーバ側の応答を高速化する手法により、シミュレーション結果の精度を維持したままユーザに応答を返す、クライアントサーバ型の大規模分散システムを提案している。大規模分散システムの要件として、第四章に破断表現が可能な汎用臓器モデルに関して、第五章にシステムのサーバ側の応答を高速化する手法に関して、それぞれ述べられている。

第4章では、物理法則に基づき臓器の変形と破断を一貫して扱うことができる軟組織の破断モデリングに関して述べられている。従来のモデルがあらかじめ破断箇所を設定しておくことで破断を表現しているのに対し、本論文では、有限要素法に基づく応力分布によりモデル自身が破断を表出できるモデルが提案されている。変形と破断の過程を一貫して扱うことにより動的に破断を表出することが可能となる。ユーザの操作に応じた破断が生じるモデルであることから、操作の成功と失敗を教示できることが示されている。応力分布の比較から、材料力学で示される最大剪断応力説が採用され、引張試験シミュレーションにより、破断シミュレーションと計算時間の計測結果が述べられている。提案モデルにより、ユーザ操作に応じて破断操作時の反力を算出しつつ動的に軟組織の破断を表現できることが確認された。

第5章では、力覚・視覚提示を伴うシミュレーションの計算遅延を隠匿しつつ実時間応答を達成する手法として、サーバ側でのアプリケーションレベルの投機実行手法が提案されている。分散システムの各計算ノードを単一のシミュレータとし

て扱い、投機的にモデルの次の状態を用意しておくことにより、ユーザ要求に対して即時応答が可能なシステムを実現できることが示されている。シミュレーションモデルに応じた投機選択肢の削減により、計算精度を犠牲にすることなく次のモデル状態を予測する手法が提案されている。パフォーマンス算定の結果、投機がヒットする限りにおいて正しい計算結果を実時間シミュレーションの範囲で提示できるものと期待されることが確認された。

第6章は、第四章で示した汎用臓器モデルと第五章で示したサーバ側の実時間応答システムにより達成しうる、分散システムを用いた大規模計算の実時間応答システムに関して述べられている。実装上の課題をあげ、対策としてとりえる手法に関する議論が示されている。

第7章は結論で、本論文のまとめと今後の展望について述べられている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、手術手技における技能伝達環境の提供に着目し、バーチャルリアリティ技術（VR）を用いた手術手技トレーニングシステムの表現力を飛躍的に向上させる大規模分散シミュレーションシステムに関して研究を行った結果をまとめたものである。得られた成果は以下のとおりである。

1. 従来のVR手術シミュレーションが単一手技を対象として臓器モデルを開発してきたのに対し、本研究のアプローチは、大規模な計算を処理し実時間応答を返すシステムを提供することで臓器モデリングにおける計算資源の制約を取り払うものである。

2. クライアントサーバ型の分散シミュレーションシステムにおいて、計算遅延、通信遅延を隠匿し、実時間応答を達成するために必要な要素技術に関して検証されている。

3. 有限要素法に基づく軟組織変形破断モデルを提供し、従来できなかった物理法則に基づく軟組織の変形と破断時の力覚提示が可能な臓器モデルを達成している。本モデルにより、モデル自身が力覚提示とともにユーザ操作の成功と失敗を動的に表現することが可能となった。本研究では、軟組織破断のモデル化は物理的に変形と破断を一貫して扱う問題であるとしており、材料力学と破壊力学が従来別個に取り扱ってきた問題を一貫して扱うことに着目したものと見える。さらに、物理現象を解析的に詳細に解くのではなく、人間が知覚しうる粒度で体感させることを目的としており、物理モデルの構築手法として新たなアプローチであるといえる。

4. 分散シミュレーションにおいて問題となる計算遅延を隠匿する方法として、アプリケーションレベルの投機実行手法という新たなアプローチを確立した。検証の結果、パラメータの調整により常に投機をヒットさせることで大規模計算の精度を維持しつつ実時間で応答を返せることが示唆された。

本研究の成果により、VR空間の表現力は飛躍的に向上するものと期待され、従来困難であったVR環境における判断を促す感覚の提示に対する可能性が開かれた。以上、本論文は、物理法則に基づく臓器破断時の感覚を提示できる革新的な汎用臓器モデルを開発し、大規模シミュレーションの質を維持したまま実時間応答の達成を可能とする多感覚提示型のVRシステムの設計を示したものであり、手術手技の訓練、技能伝達環境に寄与する技術として、学術的に極めて有意義であるといえる。

よって、本論文は博士（情報学）の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成18年8月17日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。