

氏 名	なか お みぐみ 中 尾 恵
学位(専攻分野)	博 士 (情 報 学)
学 位 記 番 号	情 博 第 67 号
学位授与の日付	平 成 15 年 3 月 24 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	Cardiac Surgery Simulation with Active Interaction and Adaptive Physics-Based Modeling (能動インタラクションと適応型の物理法則モデリングを用いた心臓外科手術シミュレーションに関する研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 上 林 彌 彦 教 授 松 田 哲 也 教 授 田 中 克 己

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、外科手術における術前計画支援を目的とした手術プロセスの術前リハーサルを提案し、患者データから三次元的に構築される仮想人体上で術中のストラテジー決定までに行われる手術手技と人体組織の物理現象をシミュレートする手法について述べたもので、8章から成っている。

第1章は序論で、医用VRを用いた手術計画立案の支援が外科手術の質の向上に繋がることを述べ、本研究の目的とアプローチを概説している。次に既存技術の問題点を分析して、術前リハーサルを可能とするVRシミュレーションシステム: ActiveHeart を提案し、システム実現のために本論文で提案する新規的な要素技術を概説している。

第2章は本論文の背景と既存研究が述べられている。最初に、高度化が進む外科手術分野における現状の問題点を整理し、医学教育及び術前計画の重要性を述べている。次に、課題解決に用いる医用VR技術の背景と既存手法を調査し、これまでのアプローチでは術前リハーサルの実現が困難であることを述べている。

第3章は術前リハーサルを実現するためのアプローチを具体化し、提案するActiveHeartの全体的な設計を行っている。術前リハーサルを行うための要求仕様を整理し、術中に生じうる物理現象を実時間で高精度にシミュレートすることを目的とした力学計算フレームワークを考案している。提案フレームワークは基本的な手技である切開・開創・触診をシミュレートすることによって術中のストラテジー決定までに行われる術野構築・危険部位判定作業を標準的なPC上で行える環境を提供する。各手法の詳細は4章・5章・6章において述べられる。

第4章では、拍動臓器に対して触診を行える環境の提供を目的として、心拍動の視覚・力覚提示を可能とする手法の提案とリアリティ達成のために考慮すべき要素の抽出を行っている。拍動による心筋の形状変化は時系列MRIデータから取得し、時系列的に与えられる仮想形状とユーザの指とのインタラクションを記述し、心内圧と弾性率、外力との関係を定式化することによって心筋に触れた際に指に返される反力を記述している。心臓血管外科医による使用結果から提案モデルに対する評価を与え、内圧の適用と時系列的に変化する形状の両方を考慮することによってよりリアリティのある拍動を再現できることを確認している。

第5章では、前章のモデル開発および実験結果を踏まえ、心臓外科手術において行われる重要な手技の1つである大動脈弓に対する触診をシミュレート可能な環境の構築を行っている。形状・弾性率・内圧を考慮した実時間での正確な変形及び反力計算を目的として有限要素法に基づいた拍動する大動脈モデルを提案している。

また、硬化病変のモデル化を行い、2台の力覚提示デバイスを実装して触診の際のつまむ動作を再現している。シミュレーション実験を通して、提案モデルが視覚・力覚提示に必要とされるリフレッシュレートを達成可能であることを確認し、正常部位と硬化部位を押し込んだ際に得られる反力を定量化している。心臓血管外科医による試用を通して熟練医が大動脈の硬さを絶対的に認識していることを明らかにして触診を習得するための必要条件を抽出し、触診経験のない医学生が本システムを通して効果的に正常・硬化大動脈の硬さを認識し、部分的な硬化部位の判定が行えるようになることを確認している。

る。

第6章は術野構築をシミュレートするための切開と開創の両方をサポートする適応型の力学計算フレームワークについて述べられている。体表に対する切開をシミュレートするために、メッシュ修正のアルゴリズムを与えている。仮想メスと仮想人体を構成する四面体メッシュとの交差を検出後、四面体分割によってメッシュ修正が行われる。また、ばね質点系において組織の緊張状態をモデル化して、切開が行われた箇所に関してリモデリングを行う事によって切開創の形成を対話的に表現することを可能としている。次に、切開後の変形には高精度なモデルが必要であり、ばね質点系では精度・安定性共に不十分であることを述べている。これに対する解決法として切開後にバックグラウンド処理によって動的に有限要素モデルを構築する手法を考案している。提案フレームワークによってシームレスにモデルの移行がなされ、シチュエーションによって力学モデルを柔軟に適応でき、精度の向上が図れることを確認している。

第7章では、4章から6章で述べた提案手法を3章で設計した方針に基づいて実装した結果を述べ、患者実測データを適用してシステム全体の評価実験を行っている。心臓血管外科による試用評価の結果、開発システムが術前における手術アプローチ計画を効果的に支援できることを確認している。

第8章は結論で、本論文のまとめと今後の展望が述べられている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、外科手術における術前計画支援を目的とした手術プロセスの術前リハーサルを実現するための、人体組織の物理特性のシミュレート手法と仮想人体を用いた手術手技のシミュレーション環境構築に関して研究を行った結果をまとめたものであり、得られた成果は以下のとおりである。

- 1) 従来の手術シミュレーションシステムでは静的な臓器が対象とされていたが、心拍動の時系列データを対象とした能動インタラクションモデルを提案し、反力計算を定式化することによって拍動臓器に対する視覚・力覚提示を具現化している。提案モデルにより実測データに基づいてリアルな拍動感を生成することが可能となった。
- 2) 有限要素法に基づいて実時間で高精度な変形結果を生成可能な大動脈モデルを考案し、2台の力覚提示デバイスによる触診の際のつまむ動作をサポートする事によって触診シミュレーション環境を構築している。構築環境によって、効果的に正常・硬化大動脈の硬さの認識ができ、硬化部位判定手技のリハーサルが可能となった。
- 3) 仮想人体に対して切開・変形操作を高精度にシミュレートできる適応型の力学計算フレームワークを提案し、術野構築の際に行う体表に対する切開と切開創の開創をリハーサルできる環境を構築している。提案手法によって、入力された手術アプローチに対して想定される術野を高精度にシミュレートし、手術計画の際の支援情報を生成することが可能となった。
- 4) これらの手法を統合した手術計画支援システム ActiveHeart を開発し、実測患者データを適用することによって行った試用実験を通して、開発システムが手術計画の立案を効果的に支援することが判明した。

以上、本論文は外科手術シミュレーション開発で課題とされてきた、仮想人体上での軟組織の切開表現と切開後の高精度な変形、及び拍動臓器に対するインタラクションと反力提示を実時間で達成するための、有効な力学計算モデルの提案、システム構築方法及び実測患者データの適用例を示したものであり、学術的にも実用性の上でも極めて有意義であると言える。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15年2月3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。