

## 審査の結果の要旨

氏名 エレディア ペレス サウル アレクシス

低侵襲手術を支援するための新しいロボットシステムが開発されつつある。バーチャルリアリティ (VR) シミュレーションシステムは、患者やロボットへのリスク無しに手術トレーニングのためのロボットシステムの制御アルゴリズムを検証するための優れた環境を提供する。低侵襲手術支援用ロボットに特徴的な制御には、微細な手術ロボット用術具の正確なトラッキングと位置姿勢の推定が必要となる。その実現のためには、ビデオ映像を用いた手術機器のロバストな検出が必要不可欠となる。近年、この技術は医用画像データを用いた畳み込みニューラルネットワーク (CNN) によるロボット手術器具のセマンティックセグメンテーション (各ピクセルをその意味に基づいて、カテゴリ分類する手法) へ適用されている。現在までは、低侵襲手術支援用ロボット手術器具のセマンティックセグメンテーションのための CNN 学習用データセットの作成は、手作業で行っていたため作成には時間を要してきた。この課題を解決する方法として VR シミュレータを作成し、現実感を強化した画像のデータを作成し CNN の訓練データとして代替できる可能性がある。

本論文の主な目的は、低侵襲医療ロボットの開発を支援することができる新しい VR インタラクティブシミュレータの開発と評価である。手術の訓練を目的としたダヴィンチ手術システムを対象とした既存の VR シミュレータとは異なり、提案する VR シミュレータの特徴は次の3つである：(1) ロボットの制御アルゴリズムの検証、(2) 深層学習モデルのトレーニングのための現実感のあるデータの生成、(3) ロボットによる低侵襲手術のための訓練プラットフォームの提供。特に、本論文ではロボット手術において複雑で難易度の高いスキルの一つである縫合動作を取り扱っている。また、VR シミュレータに求められるインタラクティブな機能を達成するために、実時間シミュレーションを実現する方法も提案している。

本論文の特徴は次の通りである(1) 剛体ダイナミックス (RBD) を用いた柔軟組織の実時間シミュレーション手法を提案していること。(2) 持針器と糸結びのインタラクティブなシミュレーションを実現する手法と数学的なトポロジー

を用いた結び目の検出手法を提案していること．(3) ロボットによる低侵襲手術の精度を向上するための動的モーションスケーリング (DMS) アルゴリズムを検証していること．(4) RBD を用いたロボット手術機器におけるコンプライアンス機構の実時間シミュレーション手法を提案していること．(5) 術具のセマンティックセグメンテーションを行う CNN を学習させるための現実感のある画像を生成する手法を提案していること．(6) ロボットによる小児外科手術の訓練と学習したスキルをロボットへ移行することができる機能を実装し、評価していること．

本論文は全 5 章で構成されている．第 1 章の序論ではロボットによる低侵襲手術と VR ロボティック手術シミュレータの現状を紹介している．また、ロボティックサージェリにおける研究を支援する VR シミュレータの必要性と本論文の目的が述べられている．第 2 章では VR シミュレータの背景と VR シミュレータ開発の方法論が述べられている．第 3 章では動的モーションスケーリングの新しいロボット制御アルゴリズムを検証する VR シミュレータの応用、および、ロボティック術具のセマンティックセグメンテーションのための CNN のトレーニングを行う VR シミュレータの応用について述べている．第 4 章ではロボティックサージェリの訓練のために開発した VR シミュレータを使用した場合の評価について述べている．最後に第 5 章では結論とともに本論文で開発したシステムの限界と将来展望を述べている．

本論文では、実時間性と現実感を重視したインタラクティブな低侵襲ロボット手術用 VR シミュレータを提案開発し、低侵襲ロボット手術システムの制御手法の検証、深層学習による術具のセマンティックセグメンテーション用のデータ生成、ロボティックサージェリの訓練プラットフォームにおける評価実験を行っている．これらにより、提案手法と開発した VR シミュレーションシステムの有効性を確認しており、工業的及び学術的に意義が高いと判断できる．

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．