

マイクロ手術ロボットにおける力覚計測に関する研究

夏, 久云

<https://hdl.handle.net/2324/4784615>

出版情報 : Kyushu University, 2021, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 夏 久云

論 文 名 : マイクロ手術ロボットにおける力覚計測に関する研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

近年、各手術領域で患者の体に負担の少ない低侵襲手術 (Minimally Invasive Surgery: MIS) が普及している。低侵襲手術においては、手術の精度、操作性を向上させるために、マスタスレーブシステム (Master Slave System: MSS) を用いた手術支援ロボットの研究が幅広く行われている。一方、マイクロ手術は顕微鏡下で血管や神経の縫合等を行う手術であり、眼科、耳鼻科、脳神経外科等広い領域で行われているが、狭く限られた作業スペースで正確な動きをする必要があるため、技術的に最も要求の厳しい手術分野の一つである。そこで、微小作業が可能なマイクロ手術ロボットの導入により、医者の負担の軽減だけでなく、従来以上の巧緻な手術の実施を可能とすることが期待される。しかし、既存のマイクロ手術ロボットでは、スレーブハンド側の手術器具と対象組織との相互作用力の計測機能は欠如している。マイクロ手術ロボットにおいて力覚フィードバックがある場合は、術者は手術部位に加わる力を感じ、相互作用力を制御できるようになるため、過度の力を回避し、脆弱な組織への損傷のリスクを減らすことができる。力の情報が無い場合は、術者は繊細な組織にどれだけの力が加えられているかを感じることが難しく、過度の力は不可逆的な損傷を引き起こす可能性がある。

この問題を解決するために、2つの課題を解決する必要がある。1つは、マイクロ手術ロボットのスレーブ側の手術器具と組織の間の相互作用力を測定する方法である。もう1つは、スレーブ側で計測した力をマスタ側にフィードバックすることである。本論文では、1つ目の問題、すなわち、マイクロ手術ロボットのスレーブ側での力覚計測方法を検討する。

マイクロ手術ロボットでは、スレーブ側の手術ツールの直径は通常の手術ツールよりも小さく、力覚センサーを設置することが困難である。そこで本研究では、マイクロ手術ロボットのスレーブ側での力覚計測に着目し、力の大きさに応じて変形する手術ツールを用い、手術ツールの変形具合から力を推定する手法を提案する。

本論文は5章で構成されている。

第1章では、序章として本研究の背景について述べている。MSSを用いた内視鏡手術ロボットとマイクロ手術ロボットの現状を説明し、マイクロ手術ロボットに力フィードバックがないことにより生じるデメリットを説明している。

第2章では、関連研究として、MSSを用いた手術支援ロボットにおける力計測の先行研究、本論文の研究目的について述べており、これまでに提案された内視鏡手術ロボットにおける力計測方法を紹介した後、マイクロ手術ロボットにおける力計測方法を説明している。現在、内視鏡手術ロボットの力フィードバック研究が盛んに行われているが、マイクロ手術ロボットの研究例は少ないこと、また、一般的にマイクロ手術の力覚フィードバックには既存の方法を利用する難しいことを説明した。さらに、本研究の目的は、マイクロ手術ロボットのスレーブ側での力覚を推定するために、力覚センサー無しで力覚を測定する手法を提案することであると説明している。

第3章では、マイクロ手術ロボットのスレーブ側で、力覚センサー無しで力覚を計測する新たな手法について提案している。提案手法では、先端に加えられた力の大きさに応じて容易に変形する手術ツールを設計し、手術ツールの3次元の変形具合（画像）とツール末端のカベクトルの間の関係を機械学習で構築する。これにより手術時に手術ツールの変形から力を推定することが可能となる。

手術ツールの変形画像から力を推定するため、手術ツールの先端部を複数の直交する螺旋パターンの方形の刻みの形状（隣接する各パーツは互いに直交する）で設計し、さらに、各パーツの変形画像をより明確に観察するために、カメラデバイスで最も認識しやすい色（三原色と黒色）で着色した。

また、入力画像シーケンスを出力シーケンス（カベクトル）にマッピングするため、計測時と過去の2つ、合計3つのタイムステップの画像シーケンスを入力とする時系列畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network: CNN）を用いて、カベクトルを推定する手法を提案した。

第4章では、第3章で提案された時系列CNNモデルを用いた力計測手法の有効性を確認する実験とその実験結果を説明した。また、提案手法の結果を他の2つのモデルの結果と比較することで提案手法の有効性を検証した。さらに、他のいくつかの既存のニューラルネットワークを用いて動的情報を使用して不確実なダイナミクスを学習する研究を参照し、本研究で提案した時系列CNNモデルは、非線形システムの動的マッピングを構築するに有効であることを考察した。

第5章では、本章では本論文の総括として、本研究で検討した項目についての結果および今後の展望について述べている。