

審査の結果の要旨

氏名 洗 津

本論文では手術ロボットにおける術具細径化による低侵襲化と術具性能を両立することに焦点を当てた手術ロボットの研究について取り扱っている。現在の手術ロボット研究における低侵襲化手法の一つである術具細径化には性能低下を引き起こすという問題点があり、その解決方法として手術ロボットのモジュール化に着目した。しかしながら従来のモジュール型手術ロボットでは腹壁に固定し運用しているため体内における位置自由度が低く体の深い位置にアクセスできない、モジュールの持つ動作自由度が少ない、モジュールの出力が小さいなどの理由から、映像記録や術野照射、牽引等の手術における補助動作しか行うことができなかった。これらの問題を解決するべく本論文では臍から導入したロボットモジュールを細径のシャフトで保持した状態で手術を行う **Needlescopic Modular Robotic Surgery(NMRS)** と呼ばれる新たな手法を提案しており、それに用いるロボットモジュールの設計開発手法と試作機とシミュレータを通じた実現可能性の検証を行っている。

第一章では研究背景の説明と研究目的の設定を行っている。

第二章では従来のモジュールロボットにおける問題点を解決するための手法として細径シャフトによるロボット保持を行う **NMRS** を提案し、本手法を用いることによって低侵襲性を維持したまま従来のモジュールロボットで問題となっていた位置自由度の低さを解決することができることを示している。また提案手法を実現するためのロボットの概念設計を行い、関節モジュールと術具モジュール、そしてそれによって構成される連結モジュールの定義を行っている。

第三章では提案した **NMRS** の実現性を実証するための試作機を開発した。対象とする症例と術式を大腸がんの **S** 状結腸切除術と設定し、そこから関節モジュール・術具モジュール・連結モジュールに必要な要求仕様を決定した。これらの要求仕様と概念設計を元に関節モジュール・術具モジュールの設計と連結モジュール時の組み合わせの検討を行い、そのうちの 1 種類の設計・製作を行い、全長 **216[mm]**、3 節 7 自由度(動作自由度 6、把持自由度 1)の試作機を製作した。また試作機を動作させるためのロボットシステムを構築し、精度評価と動作実

験を行い、その結果各軸の平均誤差二乗誤差の平均が 2.29[deg]、最大誤差が -9.858[deg]となったが、動作試験を行った結果として術者の目視と操作によるフィードバック等により大きな問題なく動作を行えることが確認でき、その実現可能性を示した。

第四章では自由度構成の異なる複数の連結モジュールについてシミュレータを利用し、医師の協力の下で対象臓器を模した対象モデルに対して動作実験を行った。自由度構成による動作の精度検証・動作領域の図示、また作業の行い易さ、連続的な動作の可否といった、実際に動かしてみないとわからない情報についての解析を行った。これにより各連結モジュールの動作実現性及び術式への適性を検証した。右手の動作検証として腸間膜の切開模擬を行い、その結果2つのモデルが動作の精度評価や作業時間、医師による操作性や作業感覚の評価などの各項目において高い評価を受け、その適性の高さを示した。左手の動作検証として切開時における膜の把持・牽引の模擬を行い、どのモデルに関しても大きな問題なく動作を行うことができ、またその時に牽引を行うために関節でどれだけのトルクが必要なのかを推定し、各関節において試作機定格トルクの 3 倍から 4 倍の値が必要となることを示した。

第五章では本研究全体に関する考察として、現在の機構要素と構成で実現できるモジュールロボットについて提案し、現状でも電気メスに必要な動作範囲及びペイロードを持つ連結モジュールが実現できることを示した。次に自由度の増減可能性について考察を行い、6 自由度が適していることを示した。それに加えてモジュールロボットの直径と出力の関係について考察を行い、試作機と同じ設計で牽引を行えるペイロードを得るためにはモジュール直径を 15[mm] から 20[mm]程度にすることが必要となるが、そのままでは全長が長くて体内に入らないことから全長を短くする工夫やモジュール挿入孔とシャフト挿入孔に必要な距離を短くする工夫を行う必要があることがわかった。他に細径シャフトの挿入位置や操作デバイスに関する考察と試作機を臨床で利用することへの課題についても考察を行っている。

第六章となる本章では結論としてこれまでの研究内容の総括を各章ごとに行っている。

本論文は NMRS という新たなロボット手術を提案し、その利点と有効性を提示するとともに、実現可能性を試作機の製作とシミュレータによる検証によって示している。このシミュレータを用いたモジュールロボット設計・組み合わせ検証法により、スムーズかつ簡便な設計検討を行えるようになった。これは現在の NMRS の概念に基づく連結モジュール以外のモジュール型手術ロボットなどについても応用可能な汎用的手法であり、将来的に NMRS に換わる新たな手法が提案された場合においても利用できる知見であると考えられる。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。