

博士論文(要約)

超低侵襲手術支援のための
細径シャフト固定式モジュール型
手術ロボットの開発

洗 津

ロボット手術は小さな孔を数個開ければ手術が行えるため、従来の開腹手術に比べて低侵襲であり、傷跡が目立たない、術後の痛みが小さい、早期退院が可能となるなど、多くの利点が存在する。また現在主流のロボット術具はマスタースレーブ制御を利用する事によって、手元のマスターコントローラの動きをロボットの多自由度性と動作制御を利用することでスレーブとなるロボット術具の動きに変換することができる。これにより通常の開腹手術のように直感的な操作が可能となり、従来の内視鏡鉗子を用いる内視鏡下手術に比べて習熟が早く、術具操作の難易度を低くすることができる。

現在の手術ロボット研究の目標の一つとして更なる低侵襲化が挙げられるが、現在の手術ロボットの機構で低侵襲化を行おうとすると、術具直径が細くならざるを得ず術具性能が低下してしまうという問題がある。この問題に関して手術ロボットのモジュール化・分離組み立て方式を利用することで解決が可能であると考えた。

本研究における手術ロボットのモジュール化とは手術作業機能を搭載した術具とその術具を保持・運用するためプラットフォームに分離し、簡便に分離・装着を可能とする、もしくはある程度独立した状態で運用できるようにすることである。この時に術具を体表に開けた挿入孔から挿入し、それを体内で保持するためのプラットフォームを無侵襲・超低侵襲で利用することができれば、術具の直径を維持したまま侵襲性を低減すること、また侵襲性を維持したまま術具の追加を行うことができるため術具直径と低侵襲性の両立ができると考えた。しかしながら現在の研究におけるモジュール型手術ロボットは(1)十分な位置自由度を持っていない (2)十分な動作自由度を持っていない (3)十分な出力を持っていない という理由で組織切開等や切除等の主に術者が行うような手術における主作業ではなく、術野展開や照明・カメラ等の手術においては助手が行うような手術における補助作業のみを対象としている。本研究では新たにNeedlescopic Modular Robotic Surgeryと名付けた新たな手法を提案しこれを用いて解決を図る。

提案手法では手術を行うロボットモジュールを臍部に開けた孔から挿入し、体表から挿入した細径のシャフトに固定することによってロボットを保持する。これによって体表に開く孔は臍部のロボットモジュール挿入孔と通常の内視鏡術具よりも細径のシャフトを通す孔のみになるため、従来の腹腔鏡手術・ロボット手術よりも低侵襲にしつつ体内に挿入された術具モジュールの直径を太くする事ができ、性能の向上を狙うことができる。また保持シャフトの位置・角度調整のみでワークスペース全体の移動が可能となる。体外に大きな機構が不要であるため、ロボットの配置やワークスペース移動後の再配置も簡単に行うことができる。本研究ではこの提案手法に基づいたモジュール型手術ロボットシステムの実現可能性を試作機開発とシミュレーションによる検

証によって示した。

第一章では研究目的として、切開や縫合などの手術における主動作についても利用可能なモジュール型手術ロボットの開発を目的として定めた。

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Needlescopic Modular Robotic Surgery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、それに加えて多くの利点があることを示した。また関連研究との比較を行い、本手法の優れた点を示すことができた。そして提案手法を実現するためのロボットの概念設計を行い、特に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た。

第三章では提案したNeedlescopic Modular Robotic Surgeryの実現性を実証するための試作機を開発するにあたり、ロボットにて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。

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種類であるY-P-R-P-R-P-Eの自由度構成を持つ連結モジュールの設計・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った。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。

第四章では複数の自由度構成の異なる連結モジュールについてシミュレータを利用して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対象術式の内容を模した動作を行ってもらい、その際に自由度構成による動作の精度検証・動作領域の図示、また作業の行いやすい姿勢でアプローチを行えるか、その状態で連続的に動作させて作業を行うことが可能かという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い、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6自由度モデル1と6自由度モデル2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た。またその時に牽引に必要な2.3[N]の力で各方向へ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た。結果として各関節において試作機の定格トルクの3倍から4倍の値が必要ということがわかり、もう1段減速することが必要であるということがわかった。

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の考察を行い、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った。その結果として自由度を増やす場合においても減らす場合においても現状では利点が見当たらず、6自由度が適していることが示された。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った。開発した試作機と同様の設計としてモジュール直径を変化させた際に全長と先端部のペイロードがどのように変化するかをモジュール直径15[mm]から35[mm]まで5[mm]きざみで推定を行った。その結果、モジュール直径と全長、モジュール直径とペイロードのそれぞれの関係について正比例するような関係となることがわかった。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。また細径シャフトの挿入位置に関する考察を行った。第四章で細径シャフトを設置していた位置を実際の人間に当てはめた場合肋骨の下辺りになる。この場所は左右で1点ずつ計2点しか指定できないことから、現状においては2本までしか6自由度の連結モジュールは利用できない。これを解決するための手段としては前述した前述した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、もしくはモジュール挿入孔に臍よりも下の下腹部を指定することなどがあげられた。

他に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た。

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た。