

## 審査の結果の要旨

氏名 荒田 純平

本論文は、「低侵襲手術支援システムに関する研究」と題して、全7章により構成される。

近年、医療の質が問われる中、外科領域では患者の苦痛や身体的な負担を軽減する手段として、低侵襲手術が注目されている。低侵襲手術は医療技術の進歩とともに発展し、その対象も今日では飛躍的に広がっている。中でも内視鏡下手術は、従来の開腹手術に比べ小さな切開のみで行われるため、患者の術後の疼痛が少なく、患者への身体的負担は極めて小さい。このため、患者の早期社会復帰、入院期間短縮による医療費削減などが期待でき、低侵襲手術の代表的な術式として広く普及している。患者のQOL (Quality of Life) の観点からも、低侵襲手術は今後さらなる発展・普及が期待されている。

しかし、これらの長所の反面、内視鏡下手術では内視鏡下の限られた視野のもと、挿入点で拘束された手術器具を用いて緻密で正確な作業を行う必要があるため、術者には高度な技術が要求され、作業には熟練を要する。そこで、本研究ではロボット技術に代表される工学技術の導入による手術支援を提案する。これらにより、これまで不可能とされてきた手術方法の創出・発展が期待できる。

本研究では、低侵襲手術の中でも最も広く行われている腹腔鏡下胆嚢摘出術を対象とした低侵襲手術支援システムを構築した。主に、次の成果を得ている：

(1) 腹腔鏡下手術における手術手技を分析し、手術支援ロボットで行うべき動作を抽出した。

(2) 低侵襲手術支援システムとして、操作者が存在するオペレーション・サイト、患者に対して手術を行うサージェリ・サイト、両サイト間を結ぶ情報伝送システムから構成される統合システムの構築法を示した。

(3) 力帰還手法を発展させ、感覚認知に基づき、物体との接触を強調提示可能な

力帰還手法を提案した。本手法は血管などの柔軟物体を扱うのに有効である。

(4) ブタを対象として腹腔鏡下胆嚢摘出手術実験を遠隔で4回行い、全て成功した。実験では東京-静岡を通信回線によって結び、バイタルサイン、腹腔鏡患部映像、手術室環境映像、ロボット制御信号等の術場環境を伝送した。本実験により、提案したシステムの有効性が確認された。

本論文における各章は、以下の様に構成されている。

第1章「序論」では、低侵襲手術の社会的背景を含めた現状について述べ、その利点と問題点を明らかにしている。また、本研究と関連する従来の研究、本論文の構成について述べている。

第2章「低侵襲手術支援システム」では、低侵襲手術支援システムを構築するために必要で十分なシステムは以下にあるべきかを示した。具体的には、システムはオペレーション・サイト、サージェリ・サイト、また、これら結ぶ環境伝送システムから構成される。医師はマスタ・マニピュレータによって動作を入力し、動作情報を環境伝送システムによってサージェリ・サイトへ伝送を行う。この情報に基づき、スレーブ・マニピュレータは動作し、手術を行う。このとき、両サイト間の映像・音声情報が相互に伝送される必要がある。さらに、手術を実行するためには、サージェリ・サイトの術場環境として、患者バイタルサイン、助手の様子、内視鏡映像、ロボット全体の様子等の伝送し、オペレーション・サイトの医師へ提示される必要がある。また、スレーブ・マニピュレータに加わる力をマスタ・マニピュレータに帰還することで、より有効な手術支援が可能となる。

第3章「オペレーション・サイト」では、低侵襲手術支援システムにおけるオペレーション・サイトにおける要素について、詳細を述べている。オペレーション・サイトでは操作者がマスタ・マニピュレータを操作し、必要な情報は環境伝送システムによってサージェリ・サイトより伝送され、提示がなされる。本章では、マスタ・マニピュレータの設計思想から、具体的な実装として、2腕から構成され、片腕7自由度を持ち、力帰還機能、また機能切り替えのためのフットスイッチを有するシステムの構築について述べた。術場環境として、患者バイタルサイン、助手の様子、内視鏡映像、ロボット全体の様子などを伝送する環境伝送システムについてその詳細を示した。

第4章「サージェリ・サイト」では、低侵襲手術支援システムにおけるサージェリ・サイトにおける要素について、詳細を述べている。サージェリ・サイトではマスタ・マニピュレータからの動作信号をもとにスレーブ・マニピュレータが動作を行い、患者に手術

を施す。本章ではスレーブ・マニピュレータの腹腔鏡下胆嚢摘出術に必要な動作内容を明らかにし、これらの動作を実現するベース部、アーム部、ツール部から構成される構造について実装法を述べた。また、それぞれの機構部について、患者の安全性を考慮するための設計について述べた。また、手術器具の多自由度化の手法として、多自由度鉗子の機構についても示された。

第5章「腹腔鏡下手術のための力帰還手法」では、腹腔鏡下手術では主に臓器の把持について力帰還が求められることを示した。そこで、腹腔鏡下手術のための力帰還手法として、力逆走バイラテラル制御を適用し、その評価実験を行った。さらに、その発展形として、操作者の感覚認知を考慮し、さらに系の安定性を考慮した力帰還手法の開発について述べた。その評価実験より、臓器などの柔らかい把持対象物に対して、把持の感知までに生ずる対象物への負荷を3割程度低減することに成功し、その有効性を明らかにした。

第6章「遠隔手術実験」では、低侵襲手術支援システムによって、東京-富士宮間（直線距離150[km]）を結び、ブタを対象とする腹腔鏡下胆嚢摘出手術を行う、遠隔手術実験について述べた。実験では、セットアップにかかる時間を除けば、ほぼ従来の腹腔鏡下胆嚢摘出手術と同程度の時間で手術を成功した。このことから、開発を行った低侵襲手術支援システムの有効性が確認された。また、ロボットのセットアップの容易性等の今後解決すべき問題点を明らかにした。さらに、力帰還、情報伝送システムの評価を行った。

第7章「結論」では、低侵襲手術支援システムの構築、また評価実験について総括を行った。

以上を要するに、本論文は、低侵襲手術を支援するためのシステム構築法を提案するとともに実験を行い、その有用性を確認するに至っている。提案したシステムにより将来、手術技能の向上、ネットワークを介しての遠隔手術が実現可能となることが実証された。

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。