

審査の結果の要旨

氏名 金 俊 煥

腹腔鏡下手術においては術野の確保のために臓器を把持・圧排などの操作により移動させ、適切な手術野を確保することが求められ、その目的でリトラクタという手術機器（手術デバイス）が用いられる。肝臓の腹腔鏡下手術では大型の臓器である肝臓を、把持して移動することが行われるが把持部の応力集中、不安定な把持による不安定な操作などの課題が存在する。このような課題を解決するために吸着装置を用いた臓器操作法が検討されているが、曲面である臓器に対して追従して安定した吸着を実現することが困難である、吸着装置の変形による不安定性のため臓器けん引方向の制御が困難であるといった課題があり、形状追従のための柔らかさと容易な牽引制御のための硬さの両方の特性を持つリトラクタの開発が望まれている。本論文は腹腔鏡下手術のための吸着固定ならびに可変剛性機構を特徴とする肝臓リトラクタに関する研究を取り扱っている。

本論文は 7 章からなり、第 1 章では肝臓の解剖と腹腔鏡下肝臓外科手術の概要を述べ、術野展開のための臓器の操作に関する先行研究を調査し、求められる機能について述べている。その中で臓器形状への柔軟な追従と安定した操作のためには、可変剛性機構が重要であることを指摘し、可変剛性構造実現手法の比較検討を行っている。そして本研究の目的を述べている。

第 2 章では形状追従のための柔らかさと容易な牽引制御のための硬さの両方の特性を持つリトラクタの概念設計を行い、吸着機構と可変剛性機能実現手法として、**Passive Compliance** 付吸着パッドと梁のすべり拘束による曲げ剛性変化機構を採用することを述べている。可変剛性機構に関しては直線状の梁に対する理論解析を、均一材質の構造、不均質材質の構造に対する解析を通じて設計パラメータを検討した。また臓器形状への追従手法として空気圧アクチュエータを採用することとし、前述の理論解析に基づきリトラクタの設計に必要な検討を行っている。また前述の理論解析は低剛性の状態で臓器に追従して吸着した後に、可変剛性機能を使って高剛性とした際の理論解析ではないことから、有限要素法を用いた数値計算による設計検証を行い、所望の性能が実現できる

ことを述べている。

第3章では提案する機構を採用する腹腔鏡下肝臓手術のための要求仕様を定め、リトラクタの具体的諸元を定めてデバイスを試作し、空気圧駆動システムも含めた実装を行っている。

第4章では試作したデバイスの可変剛性特性、リトラクタの吸着性能、臓器形状追従特性を実験的に評価している。低剛性状態で $267.4 \times 10^{-6} \text{Nm}^2$ 、高剛性状態で $1130.6 \times 10^{-6} \text{Nm}^2$ と約 4.2 倍の剛性の可変が可能であることを示している。また理論解析結果とも符合する結果を得ている。また曲率半径 50mm 程度までは 80%以上の成功率でシリコン樹脂への吸着が可能であり、垂直方向 3 N、水平方向 4 N 程度の臓器操作力を持つことを示している。

第5章では肝臓切除術への適用を想定し、模擬環境並びに動物実験による切除デバイスの評価について述べている。摘出ブタ肝臓を用いて生体組織に対する把持性能を、腹腔鏡下での操作を模擬した環境で、切除操作に必要な臓器操作を想定して評価した。その結果、肝臓切除に求められる臓器牽引操作を実現できることを確認している。また多点での吸着による臓器操作が、一点の把持による臓器操作に比べ肝臓表面の広い領域に組織テンションをかける効果があることを実験的に示している、またブタの肝臓を用いて肝臓切除を模擬した状態での切除操作を行い、試作したデバイスによる臓器操作により術野展開を行う場合に、一般的な鉗子を用いた術野展開を行う場合に比べ安定した切除線を実現できること、術野展開と組織テンション負荷のための臓器操作が容易に行えることを外科医による評価実験で確認している。最後に動物実験により試作デバイスの操作性を確認するとともに、組織吸引・けん引による肝臓組織の損傷を評価している。目視による表面ならびに臓器内部の損傷の評価、病理標本検査による評価を行っている。肝臓被膜下 2mm 以内に血種が発生するが、把持解除後 4 時間で消失する程度の軽微な損傷であることを確認している。

第6章では本研究全体に対する考察と、臨床応用へ展開するために残された課題を議論し、第7章で結論を述べている。

これらの研究成果は、腹腔鏡下肝臓切除術を安全かつ容易に行うための新たな吸着固定ならびに可変構造を特徴とする肝臓リトラクタの開発につながる重要な知見を与え、また明らかになった設計情報は他の臓器に対する同様のデバイスの設計の基礎となる知見を与えている。臨床的に高い有用性を持つデバイスの実現に貢献している。以上より、バイオエンジニアリングの進歩に貢献するものである。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。