ジンバルと平行リンクの閉ループ機構を備える 内視鏡下手術支援ポータブル鉗子マニピュレータ

Portable Forceps Manipulator with Closed Loop Mechanism using Gimbal-mounted Parallel Linkage for Endoscopic Surgery

韓 勝成 (学生会員)^a, 河合俊和^{a*}, 西川 敦^b, 西澤祐吏^c, 中村達雄^d

^a 大阪工業大学大学院ロボティクス&デザイン工学研究科

^b 大阪大学大学院基礎工学研究科機能創成専攻

^c 国立がん研究センター東病院大腸外科

^d 京都大学ウイルス・再生医科学研究所

Seungseong Han^a, Toshikazu Kawai^a, Atsushi Nishikawa^b, Yuji Nishizawa^c, Tatsuo Nakamura^d

^a Graduate School of Robotics and Design, Osaka Institute of Technology

^b Graduate School of Engineering Science, Osaka University

^c Department of Colorectal Surgery, National Cancer Center Hospital East

^d Institute for Frontier Life and Medical Sciences, Kyoto University

Abstract

A new locally operated detachable end-effector manipulator (LODEM) as the portable forceps robot that can be used by a surgeon as a third arm during laparoscopic surgery was developed. The portable forceps manipulator which has motor controlled three DOFs consists of a separable pivot restraint device that can be sterilized and an actuator unit draped with a sterilized cover. This manipulator uses a gimbal-mounted parallel linkage mechanism of the closed loop structure for the pitch and the yaw axes, and a wire driven linear slider mechanism for the insertion axis attached to the forceps. The manipulator placed above the abdominal wall using a fixed arm connected to a bed rail is motor controlled by a handheld interface with button switches. The positional accuracy and the mechanical deflection of the manipulator were evaluated. Simulated laparoscopic cholecystectomy using the prototype manipulator was performed on a surgically realistic gall bladder model. It was confirmed that the organ model could be pulled in various directions using the forceps attached to the manipulator manually and driven by the motors. The results of the present study indicate that the proposed manipulator could be used for robotically assisted laparoscopic surgery by a surgeon working near the patient.

Key words

Surgical robot, third arm, closed loop mechanisms, locally operated, laparoscopic surgery

1. はじめに

近年、内視鏡下で行う外科手術が普及している。内視鏡下手術は従来の開腹手術と比べ、患者にとって創痕が小さく整容性に優れるほか、内視鏡の拡大視野で

微細な手技が行えるといった利点がある。一方で、術具が刺入点で拘束されるため、術者は自由度の少ない術具を非直感的なピボット操作で扱い、かつ手の振戦を抑える必要がある。さらに、執刀医は内視鏡や鉗子进行操作する助手らと協調して手技を進めることが要求される。これらの課題を解決すべく、執刀医が非滅菌領域から操作するリモート操作型、または滅菌領域から操作するローカル操作型の手術支援ロボットが研究

*大阪工業大学大学院ロボティクス&デザイン工学研究科

〒530-8568 大阪府大阪市北区茶屋町 1-45

toshikazu.kawai@oit.ac.jp

受付 2019 年 3 月 18 日；採択 2019 年 9 月 17 日

開発されている¹⁾。

リモート操作型の手術支援ロボットは、執刀医が非滅菌領域に配置されたマスタデバイスを操作し、滅菌領域に配置されたスレーブロボットをマスタスレーブ制御して手術を行うハイエンドツールである。上述の課題に対して、多自由度の術具を有した複数本のマニピュレータを異構造マスタスレーブ制御し、手ぶれ補正やスケーリングにより解決している。世界的に広まっている da Vinci²⁾は、前立腺摘出術など狭小空間での微細作業を可能としている。このほかにも、Senhance³⁾、Versius⁴⁾、SPORT⁵⁾、revo-I⁶⁾、IBIS⁷⁾が開発されている。

ローカル操作型の手術支援ロボットは、滅菌領域の執刀医が手技を進めながらスイッチなどで小型ロボットを操作する補助ツールである。複数のローカル操作の小型手術支援ロボットを用いることで、執刀医は患者の状況を把握しやすい安全なロボット支援手術が実施できる。これまでに、上述の課題を個々に解決する、シミュレータなどトレーニング機器、先端が屈曲する術具、振戦防止のアームレスト iArmS⁸⁾、内視鏡保持ロボットの EMARO⁹⁾、VIKY¹⁰⁾、freehand¹¹⁾、SOLOAS-SIST II¹²⁾、が開発されている。しかし、臓器を把持牽引して作業空間をつくるのに不可欠な手術支援ロボットはないことから、鉗子ロボット (Locally Operated Detachable End-effector Manipulator, LODEM)^{13)–16)}の開発を進めている。

執刀医が LODEM と共存協調して手術を円滑に進めることは重要である。したがって、術者に広い作業領域を提供でき、かつ、初期位置決めおよび術野展開を素早く行うことができるマニピュレータ機構が必要となる。また、術具刺入点を中心としたピボット運動を直感的に理解し、緊急時にはマニピュレータを簡易に取り除けることが望ましい。すなわち、鉗子の位置決めを素早いマニュアル駆動および精密なモータ駆動で行う占有空間の小さい機械的な Remote Center of Motion (RCM) 機構¹⁷⁾が求められる。

手術支援マニピュレータの da Vinci などを用いられている平行リンク機構は¹⁸⁾、簡素な平面機構であるが、片持ち梁形状のため剛性を考慮すると大型の機構となり占有空間は大きくなる。一方で、Viky などを用いられる極座標系の曲率ガイド機構は、閉ループで高剛性な小型の機構だが、複雑な立体機構であり、刺入点回りの占有空間は大きい。

そこで、小型かつ高剛性な占有空間の小さい機構を

Fig.1 Concept of robotically assisted laparoscopic surgery supported by a locally operated portable forceps manipulator (portable LODEM).

備える LODEM の実現を目指して、従来鉗子をジンバル回転 2 軸と直動 1 軸にガイドする滅菌可能なピボット拘束具、および平行リンク機構を備える非滅菌の駆動部で構成する、閉ループ機構の手動およびモータ駆動可能な 3 自由度の鉗子マニピュレータを考えた。

本研究の目的は、ジンバルと平行リンクの閉ループ機構を備える内視鏡下手術支援ポータブル鉗子マニピュレータの開発である。これまでに予備試作¹⁹⁾を行って、伸縮直動型の鉗子マニピュレータ²⁰⁾を開発した。本論文は、これらの先行機を踏まえてリニアガイドレール型の鉗子マニピュレータを設計試作し、バックラッシュ量および位置決め精度の機構特性を計測して、内視鏡外科医による臓器モデルを用いた模擬手術実験を行って、有用性と課題点を明らかにする。

2. 方法

2.1 コンセプト

内視鏡下手術にて本ポータブル鉗子マニピュレータを用いるコンセプトを **Fig.1** に示す。まず、執刀医は内視鏡から視野を得て、マニピュレータを手動で操作して臓器を把持する、すなわち、マニピュレータのモータの電源を切りバックドライブ可能な状態にし、装着した鉗子を直接手にして動かす。次に、モータ駆動で操作して臓器を牽引し張力をかける、すなわち、執刀医は手元スイッチでマニピュレータを on/off 操作し、臓器を所望の方向に牽引して切開対象の部位を露出する。これ以降、執刀医は左手に持つ鉗子で臓器を把持してマニピュレータ装着鉗子とは反対方向に牽引し張力をかけ、右手に持つエネルギーデバイスで切開を進める。手技の進行に伴い、マニピュレータ装着鉗子で牽引する臓器の張力は緩むが、執刀医はマニピュレータを手元スイッチで操作して臓器の牽引保持を繰り返す。これにより、従来の受動的な内視鏡や鉗子を

固定する保持具とは異なり、能動的に保持具を操作できるので、執刀医は術野から目と手を離さず手技に集中できる。

緊急時には、本マニピュレータに装着する鉗子を術野に残して駆動部のみを取り除き、従来手技に移行できることとする。したがってマニピュレータの構成は、トロカールに挿入する鉗子動作をガイドするオートクレープ滅菌可能なピボット拘束具と、滅菌ドレープで覆う RCM 機構の駆動部を、中間部材を用いて着脱できる閉ループ機構とする。マニピュレータの設置方式は、手術台による患者の体位変換に対応できることを考え、ベッドレールに固定用アームを用いて接続する方式とする。

マニピュレータの自由度は、腹壁刺入点まわりのピボット運動に必要な pitch 軸, yaw 軸, insertion 軸をモータ駆動する 3 自由度とする。鉗子本体の roll 軸と grasp 軸は、執刀医による手動での駆動とする。各軸の動作範囲は、標準的な人間のサイズから内臓系の手術で必要な範囲が、縦 400 mm × 横 300 mm × 高さ 150 mm であることを考慮して決定する²¹⁾。執刀医が扱う鉗子はベッドに対して水平近くまで倒しながら手技を行うことがあるため、pitch 軸は $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 、yaw 軸は初期位置からの動作方向が両側となるように鉛直方向を基準に $\pm 45^{\circ}$ 、insertion 軸は鉗子とトロカールヘッドの長さを考慮して 200 mm とする。マニピュレータに装着する鉗子先端の作用力は成人男性の肝臓の重量の 3 分の 1 程度である 5 N とする。鉗子 200 mm 刺入時の先端速度は 100 mm/s、分解能は 0.01 mm、精度は助手としての役割を考慮し 0.5 mm とする。

2.2 鉗子のピボット拘束具

鉗子動作をガイドするピボット拘束具を Fig.2 に示す。ベッドレールに固定用アームで接続する本拘束具は、トロカールに挿入する鉗子をジンバル回転 2 軸と直動 1 軸にガイドする器具²²⁾で、オートクレープ滅菌可能な部材で構成する。

従来手技でのピボット点は腹壁へ刺入するトロカール支点と同じであるが、本提案でのピボット点は腹壁直上に設置する拘束具に装着したトロカール支点となる。鉗子操作に伴うピボット点の位置は、従来手技では腹壁への外力に応じて動くが、本器具を用いる手技では機械的に拘束されているため外力に応じて動くことはない。本器具では腹壁刺入点とトロカール支点が異なるため両者の間にギャップが生じるが、鈴木らの実験に

Fig.2 Separable pivot restraint device with gimbal rotational motion for the pitch and yaw axes, and a linear motion for the insertion axis though into the forceps. The device can be attached to the actuator unit.

より腹壁への印加力は問題ないことが報告されている²³⁾。また、本器具を用いた手技では、ピボット点が拘束されることにより、従来手技と比べて腹壁への印加力が低減できることを報告している²⁴⁾。

2.3 鉗子マニピュレータ

リニアガイドレール型のポータブル鉗子マニピュレータ機構について、全体設計を Fig.3 (a) ~ (b) に、pitch 軸, yaw 軸, insertion 軸の可動範囲を各々 Fig.3 (c) ~ (e) に示す。モータは 3 軸を三角形に配置し重心バランスをとる。

本マニピュレータ機構の pitch 軸の構成を Fig.4 (a) に示す。ベッドレールを介し固定用アームで保持する駆動部の土台に、2 本の丸棒を中間部材としてピボット拘束具のパーツ A と接続する。Pitch 軸の回転が拘束具の L 字部分パーツ B の回転と同期するように、モータ回転軸を拘束具のピボット点と一致するように配置する。

次に、pitch 軸と共にジンバルを形成する yaw 軸の構成を Fig.4 (b) に示す。モータ出力を傘歯車（基準円直径 20 mm, モジュール 1.0, MMSA1-20R, MMSA1-20 L, 小原歯車工業）で直交方向に向きを変え、平行リンクを介して insertion 軸の機構をピボット周りに回転する。ピボット拘束具との接続は、パーツ C を insertion 軸の接続部に中間部材の丸棒を差し込むことで行う。これにより、マニピュレータ機構の pitch 軸と yaw

Fig.3 Mechanical design of the portable LODEM using the gimbal-mounted parallel linkage mechanism of the closed loop structure for the pitch and the yaw axes, and the wire driven linear slider mechanism for the insertion axis attached to the forceps : (a) front perspective view, (b) side perspective view, (c) operating range in 3-DOFs, (d) operating range in the pitch axis, (e) operating range in the yaw axis, (f) operating range in the insertion axis.

軸のピボット点と、拘束具のジンバル回転2軸のピボット点が一致し、閉ループ機構を構成する。

鉗子を装着する insertion 軸の構成を Fig.4 (c) ~ (d) に示す。モータ出力をワイヤ（外径 0.3 mm, 最大張力 196 N, ウルトラダイニーマ WX8, YGK よつあみ）とプーリでリニアガイド（SRS5N+220LM, THK）上の

Fig.4 Detailed Mechanism of the portable LODEM for three axes. (a) pitch axis, (b) yaw axis, (c) insertion axis, (d) wire route of the insertion axis.

Fig.5 Prototype of the portable LODEM (a) controlled by a handheld interface with button switches (b).

スライダに伝達する機構とする。試作後の機構調整を考慮して、ワイヤ伝達経路と yaw 軸の平行リンク機構とは、別々に設ける専用構造とする。モータのワイヤ巻取りプールの外径は 26 mm とする。鉗子はピボット拘束具に挿入して、insertion 軸のスライダにネジ固定する。

固定する市販鉗子（外径 5 mm, ENDO CLINCH II, Covidien）は、外側の固定パイプに対して内側に先端開閉用リンクロッドがあり、鉗子回転はこの内側ロッドを鉗子ハンドル部のダイヤルで先端ごと回転させるタイプとする。鉗子外側パイプをマニピュレータに固定しても先端の回転は可能である。

駆動システムを構成するアクチュエータは、DC モータ（直径 25 mm, 最大連続トルク 30.4 mNm, 最大効率 0.88, RE25 339152, マクソンモータ）とプラネタリギアヘッド（直径 26 mm, 減速比 139, 最大効率 0.70, GP26A406770）およびエンコーダ（500 pulse, HEDL 5540 110512）として、位置制御ユニット（EPOS2 24/2 DCX）とノートパソコンを介して自作のスイッチで on/off 制御する。動作実験に向けて、先端速度が設計条件の半分である 50 mm/s となるよう、モータ回転速度を設定する。

鉗子をピボットから 200 mm 刺入した時に先端へ 5 N の負荷がかかる事を考慮して、ピボットから 95 mm の位置にある insertion 軸の鉗子装着部に 10.5 N の負荷をかけた際の機構たわみが 0.1 mm 程度となることを CAD シミュレーションで確認して設計した。試作した鉗子マニピュレータを Fig.5 (a) に示す。マニピュレータ機構はアルミ材、ピボット拘束具は ABS で試作した。試作した機構の全体寸法は 275 mm × 160 mm × 275

Fig.6 Results of trajectory measurements of the forceps attachment in the moving direction when loaded by 0 and 5 N : (a) pitch axis, (b) yaw axis, (c) insertion axis.

mm, 質量は 1.8 kg となった。

本鉗子マニピュレータを on/off 制御する手元操作スイッチは、内視鏡保持ロボットの 3 軸の手元スイッチを参考に、指先操作する複数の入力ボタンを中心線基準で対称配置することを考えた。試作した手元操作スイッチを Fig.5 (b) に示す。手元操作スイッチの中心部には、マニピュレータのピボット点まわりジンバル回転 2 軸である pitch 軸と yaw 軸を正逆転方向に操作する、二対の角ボタンを十字に配置した。また、十字ボタンの下部には、直動 1 軸の insertion 軸を前後方向に操作する一対の角ボタンを配置した。さらに、十字ボタンの上部には、今後のマニピュレータの 5 自由度化を考慮して、鉗子の軸まわり回転 1 軸を操作する一対の丸ボタン、鉗子先端の開閉を操作する一つのボタンスイッチを配置した。本体寸法は 70 mm × 50 mm, 重量は 30 g となった。

3. 評価実験

3.1 動作軌跡の計測

試作したポータブル鉗子マニピュレータを対象に、動作軌跡を計測する。鉗子を模した外径 5 mm で長さ 300 mm のステンレス丸棒を、ピボットから刺入方向に 200 mm となるように装着する。計測用マーカをピボットから 95 mm の位置にある insertion 軸の鉗子装着部に取り付け、ステンレス丸棒先端に 0 または 5 N の負荷をかけた時の pitch 軸, yaw 軸, insertion 軸の可動範囲の往復動作を計測する。本計測には、3 次元位置計測装置（精度 0.1 mm, OPTOTRAK Certus, NDI）を用いる。計測結果から換算して機構先端のたわみと精度を求める。機構たわみは負荷 0 N 時の動作軌跡と 5

Fig.7 Simulated laparoscopic cholecystectomy performed on a surgically realistic gall bladder model in a training box by an endoscope specialist using the portable LODEM.

N 時の動作軌跡の最大差異，精度は負荷 5 N 時の動作軌跡ヒステリシスの最大差異と定義する。

計測で得られた試作マニピュレータの pitch 軸，yaw 軸，insertion 軸の動作軌跡を各々 **Fig.6 (a) ~ (c)** に示す。機構たわみは pitch 軸が 1.5 mm，yaw 軸が 1.1 mm，insertion 軸が 1.7 mm であった。精度は pitch 軸が 0.5 mm，yaw 軸が 0.4 mm，insertion 軸が 0.1 mm であった。これは，鉗子先端に換算すると，各軸で 1.1 mm，0.8 mm，0.2 mm となった。

3.2 手動での操作に必要な力計測

試作したマニピュレータを対象に，モータ非励磁時に執刀医が手動で操作するのに必要な力を計測する。鉗子を模した外径 5 mm のステンレス棒をピボットから刺入方向に 200 mm となるように装着する。Pitch 軸と yaw 軸は，ステンレス棒の先端を直交 4 方向にフォースゲージ（分解能 0.01 N，最大使用荷重 50 N，ZP-50 N，イマダ）で牽引し，動作し始める印加力を 5 回測定して平均トルクを求める。Insertion 軸は，モータ出力軸のプリー部でワイヤを牽引し，直動 2 方向に動作し始める印加力を 5 回測定して平均トルクを求める。これらのトルク値から，ピボットから 95 mm の位置にある insertion 軸の鉗子装着部の手動操作に必要な力を換算して得る。

計測で得られた試作マニピュレータの手動操作に必要なトルクは，pitch 軸が 0.70 Nm，yaw 軸が 0.20 Nm，insertion 軸が伸展方向に 0.24 Nm，縮小方向に 0.17 Nm であった。したがって，鉗子装着部の手動操作に必要な力は，pitch 軸が 7.4 N，yaw 軸が 2.1 N，insertion 軸では伸展方向が 18 N，縮小方向が 13 N となった。

Fig.8 Results of time measurements of simulated laparoscopic cholecystectomy by the endoscope specialist using the portable LODEM in situations categorized by 1) to 4) : 1) manually control, 2) on/off switch control, 3) holding organ, 4) forceps attachment.

3.3 医師による模擬手術

胆嚢モデルを用いたドライ環境での動作実験として，腹腔鏡下胆嚢摘出術の模擬手術を行った。手術台に置いた腹腔鏡トレーニングボックス（Endowork-pro II，KARL STORZ）の中に胆嚢モデル（50128，Limbs and Things）を配置し，トレーニングボックスのポートに内視鏡，執刀医の術具，試作マニピュレータに装着した鉗子を挿入した。実験配置は，開脚位を想定し尾側に執刀医と内視鏡，執刀医の左側に固定アーム（Snowden Pencer Fast Clamp System，CareFusion 2200）に取り付けたマニピュレータ，左手に鉗子，右手に剪刀鉗子とした。執刀医は内視鏡から得た映像で状況を確認し，手動操作とスイッチ操作でマニピュレータを動かしながら手技を行った。執刀医は，内視鏡外科医 2 名とし，うち 1 名は技術認定医とした。認定医が模擬手術に要する時間を計測し，マニピュレータの手動操作，スイッチ操作，臓器の牽引保持すなわち医師の両手による手技，の 3 つの状況に区分けした。医師は自由意思に基づき実験に参加し，不参加ならびに評価結果で不利益を受けないように配慮した。

試作マニピュレータによる内視鏡下胆嚢摘出模擬手術の様子を **Fig.7** に示す。執刀医は 2 名とも，スイッチ操作する鉗子マニピュレータと，左手の鉗子を用いて，胆嚢モデルに十分な張力をかけて術野を確保することができた。執刀医の右手の剪刀鉗子で胆嚢周囲の剝離を進め，術野展開もスムーズに行うことができ，医師との協調作業が可能であった。術野展開の際は，マニピュレータのモータを非励磁にして手動で操作し，模擬臓器の把持と牽引が可能であった。

認定医が模擬手術に要した時間と各状況を **Fig.8** に示す。1) 手動操作が 1 分 24 秒間，2) スイッチ操作が

7分6秒間, 3) 臓器の牽引保持すなわち医師の両手による手技が11分5秒間, 4) 把持できなくなった鉗子の交換が1分5秒間となり, 合計で20分40秒間の時間を要した。

4. 考察

内視鏡下手術において, 執刀医が患者のそばで従来手技を進めながら, 近接操作型の手術支援ロボットを補助的に用いるロボット支援サージェリーに不可欠である, 素早い術野展開と精密な臓器の牽引・維持を行え, かつピボット運動を直感的に理解できる小型鉗子マニピュレータ LODEM の実現を目指した。

従来鉗子をジンバル回転2軸と直動1軸にガイドする滅菌可能なピボット拘束具と, 傘歯—平行リンク回転伝達機構およびワイヤ直動伝達機構を備える非滅菌の駆動部で分離可能に構成する, 閉ループ構造の手動およびモータ駆動可能な3自由度のポータブル鉗子マニピュレータ (Portable LODEM) を開発した。

開発した Portable LODEM は, ベッドレールから固定アームを介して腹壁上に設置可能で, 最大寸法 280 mm で重量 1.8 kg となり, 可動範囲と作用力 5 N の仕様を満たすこと, 鉗子先端の位置決め精度は回転2軸が 1.1 mm 以下で直動軸が 0.1 mm 以下であること, 鉗子装着部の機構たわみは回転2軸が 1.5 mm で直動軸が 1.7 mm であること, 手動での操作に必要な力は回転2軸が 7.4 N 以下で直動軸が 18 N 以下であることを確認し, 認定医が LODEM を手動およびスイッチ on/off 操作して臓器モデルをハンドリングしながらスムーズに剝離切開できたことから有用性を示した。これにより, 鉗子助手を配置することなく, 認定医はストレスのないソロサージェリーができること, 手技のスピードに差がある修練医であっても LODEM を直感的にコントロールしてストレスのないソロサージェリーができることを示唆した。

模擬手術に要した時間について, 本リニアガイドレール型の試作機は約20分間であり, 伸縮直動型の先行機²⁰⁾では約15分間であったことと比べ, 約5分間の超過がみられた。これは, 時間 12:00~17:00 にみられるように, 把持できなくなった鉗子およびその交換に要した時間が影響している。また, 術野展開時の手動操作に要する直動軸の操作力が大きいことが影響し, 手動操作に代わりスイッチ操作で術野展開を行ったことから, スイッチ操作の時間が長くなっている。さらに, LODEM をベッドレールに接続する初期セッ

ティング位置が影響し, 模擬臓器の切開が進むにつれて LODEM の最大可動範囲に近づき, 効果的なカウンターアクションが得にくくなって医師の両手による手技時間が増大した。これらのことから, 直動軸の手動操作に要する操作力の低減と, 初期セッティング位置を考慮することで, 手術時間の短縮につながる事が明らかとなった。

これまでに開発した鉗子マニピュレータ SCARA LODEM¹³⁾は, スカラアームに受動ジンバルを備える5自由度の床置き式で, 最大寸法 1400 mm, 重量 45 kg, 無負荷時の先端位置決め精度 0.5 mm であった。Mobile LODEM¹⁴⁾は, スライダクランク機構を備える5自由度の床置き式で, 最大寸法 900 mm, 重量 9.0 kg, 無負荷時の先端位置決め精度 0.4 mm であった。Compact LODEM¹⁵⁾は, 円環直動テレスコピック機構を備える3自由度のベッドレール接続式で, 最大寸法は展開時で 230 mm, 重量 2.3 kg, 負荷 3 N 時の精度は先端に換算して 4.2 mm, 鉗子装着部の機構たわみ 5.1 mm であった。これらの LODEM を発展させた本 Portable LODEM は, 占有空間の小さい簡素な機構で小型軽量化を実現できたことから, 位置決め精度と機構たわみに関して本試作機と材料と組立精度を考慮すれば, ステンレス材と PEEK 材を用いたさらなる小型化と実用化に向けた期待ができると考える。

内視鏡や鉗子を固定する保持具では, 本研究で Portable LODEM をベッドレールに接続した機械式の固定アームを始め, 空気圧式²⁵⁾, 液圧式やバネ式²⁶⁾がある。これらの受動的な保持具と比較して, 能動的なモータ駆動の内視鏡ロボットや鉗子ロボットは, 執刀医の手が届かない場所や方向に設置しても操作ができる点, その操作に術野から手を離す必要がないことから手技に集中できる点で有用である。特に臓器を牽引する能動的な鉗子ロボットについて, 最初に臓器を固定保持するまでは受動的な保持具と機能は同じである。しかしながら, 切開が進むと臓器全体の張力が緩んでくるので, 切開箇所には張力がかからなくなる状況においては, モータ駆動の LODEM ならば受動的な保持具と異なり, 術野から手と目を離さずとも所望の方向へ臓器を牽引できる。制御方式について, 牽引力を維持するためにトルク制御が考えられるが, 臓器が切り離されると急に鉗子ロボットが動き出すため, on/off スイッチ制御あるいはマススレーブ位置速度制御となっている。トルク制御や自立制御については, 今後の研究課題と考えている。また, Portable LODEM に装着する

市販鉗子について、先端の回転が内側ロッドではなく外側パイプの回転に連動するタイプへの対応も必要であり、今後の課題である。

現在の内視鏡ロボット^{9)–12)}へ到達するまでに、先駆的な AESOP²⁷⁾や Naviot²⁸⁾から始まり多くの研究¹⁷⁾を経ている。ベッドレール接続式で3自由度の内視鏡ロボットにおいて、円環ガイド機構を備える Viky¹⁰⁾は最大寸法 120 mm で重量 1.5 kg, 平行リンク機構を備える free hand¹¹⁾は最大寸法 590 mm で重量 7.0 kg, 垂直多関節アームを備える SOLOASSIST II¹²⁾は最大寸法 1200 mm で重量 9.5 kg である。これらの内視鏡ロボットに比べて本 Portable LODEM は、臨床試用に向けた寸法と重量、および緊急時の機構の退避と術具の着脱性を実現できたと考える。しかし、ベッドレール接続式であれば、固定アームと執刀医が操作する鉗子やエネルギーデバイスとの干渉は、術野で生じる可能性は残る。これら術具との干渉を考えると、EMARO などのアームがオーバーハングする床設置式が優れているが、装置全体が大型化するため、優先度のトレードオフを考慮することが必要である。

執刀医が術前に LODEM を手動操作することで、LODEM に装着した鉗子の動作範囲と初期負荷を理解し、手動での臓器の把持と牽引はスムーズにできるが、初期負荷は小さい方が望ましい。本試作機の insertion 軸は、リニアガイドを用いることで寸法は大きい一方、位置決め精度は高いが、手動での操作に必要な力が 20 N 前後となるのは大きいと考える。これは、ワイヤ経路に設けるプーリなどでの摩擦が原因と考える。直動ガイドローラなど新たな駆動機構、または、モータ直結で駆動するといった、伝達効率を上げる解決策が考えられる。臨床試用に向けては、この insertion 軸の改良に加え、LODEM を操作する on/off スイッチ制御やマススレーブ制御などヒューマンインタフェースを考慮する必要がある。

現在、地域間の医療格差や医師および診療科の偏在、外科医の働き方が課題となっている。その解決策の一つとして、本鉗子マニピュレータを含むローカル操作型手術支援ロボット群を統合するソロサージェリーを実現できれば、スタッフの省力化につながると考える。まずは、これまでの内視鏡助手と鉗子助手の役割を一人の助手が担い、両ロボットを操作することからはじめることを考えている。このとき、医師にとって使い勝手の良い操作インタフェースが重要である。ロボット本体と操作インタフェースの組み合わせ

は通常一対一であることから、複数のロボット群を単一のインタフェースで簡便に切り替えて操作できるシステムが必要と考え、その構築に向けた研究を進めている^{29),30)}。さらには、複数台の LODEM を組み合わせた大腸内視鏡手術への展開や、オープンサージェリーへの適用、発展途上国向けシステムの構築を視野に入れている。

5. 結論

鉗子動作をガイドするロボット拘束具のジンバルとマニピュレータの RCM 機構でロボット点が一致する閉ループ構造を備える鉗子マニピュレータを開発した。本マニピュレータの機構特性を明らかにし、医師が手動および on/off 操作で臓器モデルをハンドリングしながらスムーズに剝離切開できることを確認した。これらのことから、ロボット支援ソロサージェリーに不可欠な助手としての本マニピュレータの有用性を明らかにした。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP18K04065, JP16H01859 の助成を受けた。

文献

- 1) Taylor RH, Menciassi A, Fichtinger G, et al. Medical Robotics and Computer-Integrated Surgery. In: Siciliano B., Khatib O. eds. Springer Handbook of Robotics. Berlin:Springer, 2016:1657–1684.
- 2) da Vinci <https://www.intuitive.com/> (2019 年 3 月 3 日確認)
- 3) Senhance <https://transenterix.com/> (2019 年 3 月 3 日確認)
- 4) Versius <https://cmrsurgical.com/versius/> (2019 年 3 月 3 日確認)
- 5) SPORT <https://titanmedicalinc.com/> (2019 年 3 月 3 日確認)
- 6) revo-I <http://www.meerecompany.com/> (2019 年 3 月 3 日確認)
- 7) Tadano K, Kawashima K. Development of a Master-Slave System with Force-Sensing Abilities using Pneumatic Actuators for Laparoscopic Surgery. AR 2010;24(12):1763–1783.
- 8) 小山俊彦, 岡本 淳, 後藤哲哉. パッシブ型手術支援ロボット iArmS. 医療機器学 2016;86(4):377–383.
- 9) Tadano K, Kawashima K. A pneumatic laparoscope holder controlled by head movement. Int J Med Robot 2015;11(3):331–340.
- 10) Gumbs AA, Crovari F, Vidal C, et al. Modified robotic lightweight endoscope (ViKY) validation in vivo in a porcine model. Surg

- Innov 2007;14(4):261-264.
- 11) Stolzenburg JU, Franz T, Kallidonis P, et al. Comparison of the FreeHand® robotic camera holder with human assistants during endoscopic extraperitoneal radical prostatectomy. *BJU Int* 2010;107(6):970-974.
 - 12) Gillen S, Pletzer B, Heiligensetzer A, et al. Solo-surgical laparoscopic cholecystectomy with a joystick-guided camera device : a case-control study. *Surg Endosc* 2014;28(1):164-170.
 - 13) 河合俊和, 橋田 淳, 申 明奎, ほか. 内視鏡下手術支援ローカル操作型着脱式術具マニピュレータ. *J JSCAS* 2012;14(1):5-14.
 - 14) Kawai T, Shin M, Nishizawa Y, et al. Mobile locally operated detachable end-effector manipulator for endoscopic surgery. *Int J CARS* 2015;10(2):161-169.
 - 15) Kawai T, Hayashi H, Nishizawa Y, et al. Compact forceps manipulator with a spherical-coordinate linear and circular telescopic rail mechanism for endoscopic surgery. *Int J CARS* 2017;12(8):1345-1353.
 - 16) 雨森弘記, 河合俊和, 西澤祐吏, ほか. 内視鏡下手術支援ケーブル駆動式円環ガイドレール鉗子マニピュレータの機構設計. *J JSCAS* 2017;19(4):301-302.
 - 17) Bihlmaier A. Learning dynamic spatial relations. Wiesbaden:Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
 - 18) Madhani AJ, Niemeyer G, Salisbury K. The Black Falcon:a Teleoperated surgical instrument for minimally invasive surgery. *IROS1998*. Victoria, 1998:936-944.
 - 19) Han S, Kawai T, Nishikawa A, et al. Surgical Tool Manipulator with Gimbal-Mounted Parallel Linkage and Telescopic Sliders for Laparoscopic Surgery. *EMBC2018*. Honolulu, 2018:FrPoS-30.46.
 - 20) Fukui S, Han S, Kawai T, et al. Portable Forceps Manipulator with Gimbal-mounted Parallel Linkage and Telescopic Rail Mechanism for Laparoscopic Surgery. *Int J CARS* 2019;14(S1):49-50.
 - 21) 光石 衛, 杉田直彦, 保中志元, ほか. 人体を内側から扱うロボットの設計. *日本ロボット学会誌* 2008;26(3):101-105.
 - 22) 大和淳司, 西澤祐吏, 韓 勝成, ほか. 保持具. 特願 2018-101140.
 - 23) Suzuki T, Katayama Y, Kobayashi E, et al. Mechanical error analysis of compact forceps manipulator for laparoscopic surgery. In:Bozovic V, ed. *Medical Robotics*. InTech, 2008:433-442.
 - 24) Masatake A, Kawai T, Han S, et al. Effectiveness of Pivot Restraint Device for laparoscopic accurate procedure. *EAES2019*. Sevilla, 2019:P405.
 - 25) 近藤彰宏, 伊藤雅昭, 塚田祐一郎, ほか. 腹腔鏡手術における助手機能を代用する医療機器ロックアームの臨床応用. 第79回日本臨床外科学会総会. 東京, 2017:WS14-09.
 - 26) Bosma J, Boeken Kruger A, Jaspers J. A novel, intuitive instrument positioner for endoscopy, involving surgeons in design and feasibility. *MITAT* 2015;24(6):326-333.
 - 27) Uecker D. R, Lee C, Wang Y. F, et al. A Speech-Directed Multimodal Man-Machine Interface for Robotically Enhanced Surgery. *MRCAS' 94*. Pittsburgh, 1994:176-183.
 - 28) Kobayashi E, Masamune K, Sakuma I, et al. A new safe laparoscopic manipulator system with a five-bar linkage mechanism and an optimal zoom. *CAS* 1999;4(4):182-192.
 - 29) Fukui S, Kobayashi H, Kawai T, et al. Locally operated unilateral master-slave control system with portable device and forceps manipulator for laparoscopic surgery. *Int J CARS* 2018;13(S1):234-236.
 - 30) Iwamoto N, Nishikawa A, Kawai T, et al. A Novel Medical Robot Architecture with ORiN for Efficient Development of Telesurgical Robots. *Int J CARS* 2018;13(S1):40-41.