

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05917

研究課題名(和文) 微細手術支援ローカル操作型マルチアングルマニピュレータ

研究課題名(英文) Locally operated multi-angle manipulator for accurate surgery

研究代表者

河合 俊和 (Kawai, Toshikazu)

大阪工業大学・ロボティクス&amp;デザイン工学部・教授

研究者番号：90460766

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：患者の傍で執刀医が行う単孔式内視鏡下手術をロボットで支援する、第3の手としての鉗子マニピュレータを開発した。この微細手術支援ローカル操作型マルチアングルマニピュレータは、(1)広い視野と作業領域を提供する湾曲可能な鉗子マニピュレータ、(2)腹腔上に鉗子マニピュレータをコンパクトに設置するテレスコピック保持マニピュレータ、(3)術者が直感的にローカル操作可能な多自由度インタフェース、で構成する。これらのデバイスは、ロボット支援手術への応用が高く期待できる。さらに、手術スタッフの省力化や医療費低減、待機患者減少、内視鏡下手術の普及が期待できる。

研究成果の概要(英文)：A new forceps manipulator have developed to act as the third arm for robotically assisted single-incision laparoscopic surgery (SILS) performed by a surgeon working near the patient. The locally operated multi-angle manipulator consists of (1) curved-angle forceps manipulator providing the wide field of view and the large working area, (2) compact holding manipulator with linear and circular telescopic rails, and (3) locally operated interface that collaborated with the surgeon and the manipulator. These devices could be used for robotic surgery applications. This proposed manipulator leads to reduce medical staff and the costs, patients waiting for their surgery, and become widely used SILS.

研究分野：医療ロボティクス

キーワード：手術支援ロボット 鉗子マニピュレータ 保持マニピュレータ ローカル操作 第3の手

### 1. 研究開始当初の背景

患者への侵襲が少ない内視鏡下手術では、執刀医が微細手術をするために、鉗子の自由度不足による動作制限、手の振戦、術者との協調といった課題がある。近年は、複数の術具刺入点を臍部や胸骨下などに集約した単孔式手術が普及しつつある。本術式は刺入点が一点となり、術具が直線形状であることから、術具同志の干渉、患部へのアプローチ方向の制限が新たな課題である。

従来方式の内視鏡下手術の課題を解決すべく、マスタスレーブ制御の da Vinci など手術支援ロボットが開発された。また、単孔式手術を支援する、ギア差動機構の SPRINT や蛇状コマ機構の IREP などが研究されている。しかし、機構の細径化や作用力などに課題が多い。一方、これらマスタスレーブ制御の手術支援ロボットは、「遠隔(リモート)操作型」マニピュレータであることから、医師が患者から離れるため術中の状態が把握しにくく、かつ大規模なオールインワンシステムのため設置場所に課題があった。

そこで、「リモート操作型」に代わり、患者傍で医師と共存し協調した作業ができる「ローカル操作型」マニピュレータによる小型で分散可能なシステムがあれば、緊急時の素早い対応が可能となり安全性に優れ、ロボット手術に不安を持つ患者にも安心感を与え、また、設置場所の自由度が高くなると考えた。「ローカル操作型」マニピュレータやデバイスに関する研究では、マニュアル操作の多自由度鉗子、振戦除去の手台、内視鏡ロボットがある。微細な手術を行なうためには、2本の鉗子で臓器など組織を把持・牽引して視野を展開し、3本目のエネルギーデバイスなどで剥離や切離を進める手技が重要である。すなわち、執刀医が一人で手技を進めるには第3の手となる鉗子ロボットが必要となることから、SCARA型およびCrank-Slider型の鉗子マニピュレータ LODEM の研究に取り組んできた。しかしながら、単孔式で微細手術を支援できる鉗子マニピュレータは存在せず、自由度や作用力、機構の小型化や作業範囲、操作手法が課題となっている。

### 2. 研究の目的

単孔から刺入した機構が腹腔内で術野を遮らないことは重要であり、広い視野と作業範囲で動作するため、刺入した他の術具から離れた位置で鉗子の把持と牽引動作が可能となる鉗子マニピュレータが必要である。そこで本研究では、単孔式手術の支援に向けて、上記の問題の解決を図るためにこれまでの研究成果をさらに発展させ、(1)広い視野と作業範囲を提供する湾曲可能な鉗子マニピュレータ、(2)腹腔上に鉗子マニピュレータをコンパクトに設置するテレスコピック保持マニピュレータ、(3)術者が直感的にローカル操作可能な多自由度インタフェース、を備えた「微細手術支援ローカル操作型マルチ

アングルマニピュレータ」を開発して、その基本性能と有用性を明らかにすることを目的とした。図1に示すように、保持マニピュレータに装着した鉗子マニピュレータを伸展させた状態で臍部より腹腔内に挿入し、湾曲させることでオフセットして他の術具の干渉を回避し、多自由度インタフェースで操作する。

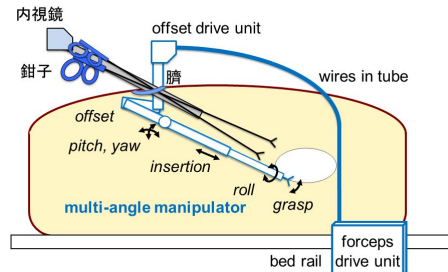


図1 本研究の構想

### 3. 研究の方法

#### (1) 湾曲可能な鉗子マニピュレータ

独立した連結コマ湾曲部を2箇所にも備える外径10mmのワイヤ駆動式の湾曲可能な鉗子マニピュレータを開発した。さらに、機構の占有空間を小さくする、外径8mmおよび5mmのはめあいコマ連結機構を有するマニピュレータを開発した。試作した鉗子マニピュレータを図2に示す。

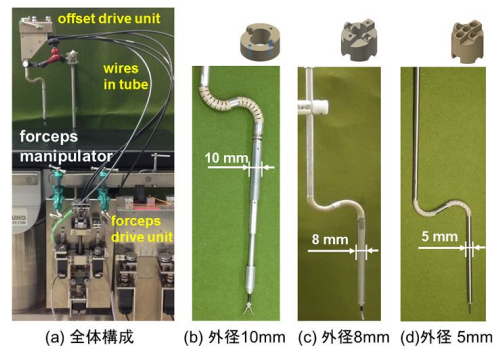


図2 鉗子マニピュレータ試作機

まず、外径10mmでオフセットする湾曲の操作は手動とし、鉗子の操作はモータでワイヤ駆動するマニピュレータを設計試作した。オフセットの2軸機構は、超弾性の外径0.8mmの線ばねを通した階段状の円筒8つで構成し、湾曲角120°、オフセット距離60mm、先端までの距離150mmとした。鉗子の5軸機構は、PEEK樹脂の半球で構成する屈曲角52°のpitch軸とyaw軸、テレスコピック機構で構成する駆動距離56mmのinsertion軸、回転角90°のroll軸、外径3mmの従来鉗子を装着した開閉角75°のgrasp軸とした。オフセット駆動ワイヤは湾曲角度固定ユニットに、鉗子駆動ワイヤはオフセット機構の内部を通りチューブケーブルを介してモータ駆動ユニットに接続した。マニピュレ

ータ機構は重量 0.55 kg となった。モータ駆動ユニットは寸法 350×190×120 mm, 重量 3.4 kg となった。

つぎに, 外径 8 mm へ細径化した 3 自由度 マニピュレータを設計試作した。オフセットの 2 軸機構をモータ駆動とし, 湾曲方向に凹凸の矩形はめあいを有する斜面を設けたコマ 8 個を外径 0.6 mm の線ばねで連結して, 最大湾曲角度 120°, 最大湾曲時の軸間距離 62 mm とした。マニピュレータ機構は重量 0.11 kg となった。モータ駆動ユニットは, アクチュエータを交換可能とし, 寸法 330×230×90 mm, 重量 6.0 kg となった。

さらに, 外径 5 mm へ細径化した 3 自由度 マニピュレータを設計試作した。オフセットの 2 軸機構は, 凹凸の矩形はめあいと回転部を有する傾斜角 15° のコマとした。

上記で試作したマニピュレータの評価実験を実施した。外径 10 mm の試作機に対して, 動作軌跡と作用力の計測実験, 臨床医が手元スイッチで本マニピュレータを操作して補助的に胆嚢モデルを切除する模擬手術を行った。また, 湾曲部の機構剛性を確認するため, 3 種類の試作機を対象に, エアギャップとしてコマ連結機構の静的なスライド変位量を, 位置決め精度として動的な動作軌跡の計測を行った。

## (2) テレスコピック保持マニピュレータ

鉗子マニピュレータを保持してコンパクトに設置するため, 極座標系の伸縮レール機構をリンクとケーブルロッドを介して本体機構から分離したアクチュエータで駆動する, 3 自由度のテレスコピック保持マニピュレータを設計試作した。試作した保持マニピュレータを図 3 に示す。

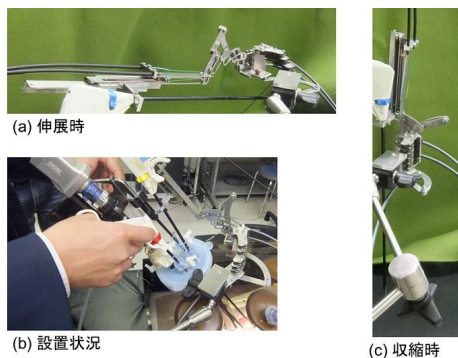


図 3 保持マニピュレータ試作機

円環の伸縮機構を構成する yaw 軸は, 曲率半径 85 mm の円環形状のスライダ 6 枚で構成し, 可動範囲は 90° とした。同じく pitch 軸は, 曲率半径 55 mm の円環形状のスライダ 6 枚で構成し, 可動範囲は 90°, 曲率半径はスライダ毎に 15 mm 増加することとした。直線の伸縮機構を構成する insertion 軸は, 直線形状のスライダ 3 枚で構成し, 可動範囲は 150 mm とした。伸縮機構の pitch 軸と yaw

軸は, ケーブルロッドを装着したプーリ支点と機構先端を 2 リンクで接続し, リンク角度が特異点とならないよう可動範囲内で鋭角になるよう寸法を決定した。リンク機構を装着した試作マニピュレータは, 展開前で高さ 180 mm, 横幅 100 mm, 奥行き 90 mm, 展開後で高さ 230 mm, 横幅 130 mm, 奥行き 120 mm, 重量 0.32 kg となった。

保持マニピュレータ試作機を単体で評価するため, 動作軌跡と作用力の計測実験, 臨床医が手元スイッチで操作する本マニピュレータを用いた胆嚢モデルを切除する模擬手術を行った。

## (3) ローカル操作インタフェース

執刀医が手元で扱う左手鉗子に装着するツールマウント型の操作インタフェースとして, 2 方向同時入力可能な指先操作方式と比較するダブルロック型, スライダ型, プッシュスライダ型の 3 種類, 手指の寸法に基づきスイッチ位置を決める 3 本の指で操作の選択と操作を行うパッド+スイッチ型, 1 本の指で操作軸の選択と操作を行うトグル型およびスティック型を提案した。試作した操作インタフェースを図 4 に示す。また, 内視鏡映像を画像処理してマニピュレータの操作指標とする手法も検討した。

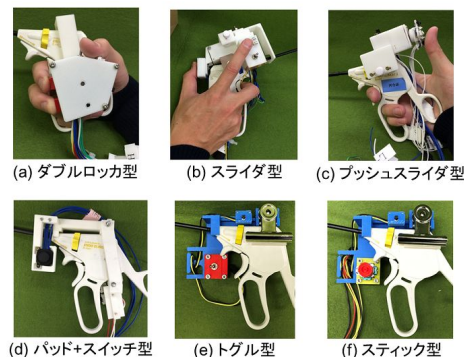


図 4 提案する操作インタフェース群

まず, スイッチ型操作インタフェースとして, 刺入点まわりのピボット運動では 2 方向の同時入力が必要となることから, 示指と中指でロックスイッチを操作しピボット動作するダブルロック型, 母指でスライドパッドを操作しピボット動作するスライダ型, 母指でスライドパッドを操作しプッシュ切替して 5 軸動作するプッシュスライダ型, の 3 種類を設計試作し, オープンループ制御システムを構築した。操作に適したスイッチ類と配置を評価するため, 成人男性 5 名を対象にタスク実験を実施し, ラーニングカーブが安定した時の所用時間を計測し, アンケート評価を行った。

つぎに, 専門医による予備実験を経て, 鉗子ハンドル左手のツールマウント型スイッチの操作は, 示指で 2 方向を同時入力する 2 軸操作を, 中指で 2 モード切り替えて 4 軸



操作とし、薬指で1軸操作する方針とした。示指を伸ばした位置にアナログパッドを1つ配置し、中指と薬指を鉗子ハンドル可動部に入れてその位置に小型スイッチ2個を配置して操作するインタフェースを設計試作した。手指の寸法を計測してスイッチの配置を決める指先位置モデルを構築した。インタフェースのサイズによる操作性の違いを評価するため、成人男性8名の手指の寸法を計測し、寸法の大小で2つのグループに分け、上記モデルに基づき作成した大小2種類のインタフェースを用いてタスク実験を実施し、ラーニングカーブが安定した時の所用時間を計測し、アンケート評価を行った。

さらに、より簡便に示指1本で5軸を操作するため、専門医による予備実験を経て、クリップで装着する形状として、鉗子長軸の奥面に配置したタクトイルスイッチで軸を選択し、2自由度アナログスティックまたは1自由度トグルスイッチで軸を操作するインタフェースを設計試作した。これまでに開発した10ボタンスイッチ、前記の3本の指で操作するスイッチとの操作性を比較評価するため、成人男性5名を対象にタスク実験を実施し、ラーニングカーブが安定した時の所用時間を計測し、アンケート評価を行った。臨床医10名からの意見も取得した。

また、内視鏡映像を操作指標とするために、鉗子による臓器牽引時の三角形を認識する画像処理手法として、鉗子部と止血した凝固部を認識して差分することで画像の情報量を減らし、鉗子先端で牽引された組織の稜線を斜辺、剥離切開部分を底辺として線分情報から三角形を認識するアルゴリズムを構築した。評価実験として、提案アルゴリズムを大腸外科手術3種類に適用し、鉗子部の本数と交差の有無の状況による認識率を取得した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 湾曲可能な鉗子マニピュレータ

外径10mmの試作マニピュレータの位置決め精度はpitch軸で0.3mm yaw軸で0.4mm、insertion軸で0.5mmかつ動作パイプ切り替え時は31.5mmの水平移動が生じた。作用力は0.5Nであった。模擬手術の実験では、マニピュレータと手動操作の鉗子で胆嚢を把持して圧排や牽引を行って、剪刀鉗子で剥離することが可能であった。

試作機の湾曲部を伸展させた状態で直交方向に荷重1Nをかけてスライド変位量を計測したところ、外径10mm試作機では4mm、外径8mm試作機では0.4mmであり、外径5mm試作機では1.3mmとなった。これにより、コマ連結部のはめあいによるエアギャップの低減を確認した。

荷重0.5Nをかけて湾曲・伸展時の動作軌跡の計測を行って軌跡の差異を算出したところ、外径8mm試作機では湾曲方向において1.1mm、直交方向において2.5mmであっ

た。また、外径5mm試作機では湾曲方向において6.5mm、直交方向において2.8mmであった。これにより、細径化に伴う機構剛性の影響で位置決め精度の低下を確認した。

##### (2) テレスコピック保持マニピュレータ

試作機に装着した鉗子を模した丸棒に負荷3Nをかけた動作軌跡の計測から、位置決め精度はyaw軸が1.8mm pitch軸が2.6mm、バックラッシュはyaw軸が7.9mm pitch軸が3.7mm、機構たわみは約4mmであった。模擬手術では、執刀医の2本の術具と手元スイッチでフィードフォワード操作するマニピュレータに装着した鉗子が共存して協調作業が可能であることを確認した。

##### (3) ローカル操作インタフェース

操作に適したスイッチ類と配置を評価する実験結果から、水平面操作するスライドパッドと、プッシュ操作するボタンスイッチとの組み合わせは、操作インタフェースの多自由度化に有用であるとの示唆を得た。

サイズによる操作性の違いを評価する実験結果から、インタフェースのサイズによる所要時間に有意差はないこと、これは手の大きいグループがインタフェースサイズの大小にかかわらず指が届くこと、手の小さいグループは大きいサイズのインタフェースを持つときに指がアナログパッドに届くよう鉗子の握り方を変えるためであること、一方で複数回の持ち替えのために疲労が蓄積し操作しづらいこと、が明らかになった。

示指のみの操作は簡便かつ安心であり、ラーニングカーブの変化が小さく初回から直感的な操作が可能であること、所要時間に有意差はないこと、操作軸の切り替えは疲労すること、が明らかになった。臨床医の意見として、示指操作は鉗子の持ち方を変える必要がなく有効であること、アナログスティックは動かしやすいこと、一方で手が小さいと奥に倒せないこと、との意見を得た。

臓器牽引時の三角形を認識する画像処理手法では、内視鏡外科認定医による主観的な判断では80%程度の認識率を得られているとのことであったが、客観的に認識率を算出する手法が必要であることが分かった。

以上、本研究では、広い視野と作業範囲を提供する湾曲可能な鉗子マニピュレータ、腹腔上にコンパクトに設置するテレスコピック保持マニピュレータ、直感的にローカル操作可能な多自由度インタフェース、を備えた「微細手術支援ローカル操作型マルチアングルマニピュレータ」を開発した。医師による模擬手術など評価実験を通して基本性能と限界を明らかにし、改良方策を検討した。微細な手技を進めるために重要な第3の手となる鉗子ロボットは、患者傍で執刀医が行う単孔式内視鏡下ロボット支援手術への応用が高く期待できる。

人間と共存・協調するマニピュレータの機構や制御に関する基盤技術を有機的な医工連携研究を通じて構築し、学術的な体系化を目指して、ヒトとの親和性を有するロボット工学設計論を主に外科手術を対象に確立した。本研究成果は、雑誌論文、国際会議発表などにより国内外に発信し、書籍などを通じて広く国民に成果公表を行い、独創的で学術的にも価値の高い成果を発信している。

今後は、様々な手術を対象にして本技術を発展させ、内視鏡の画像処理も操作インタフェースに組み込み、執刀医が一人で手術できるソロサージェリーシステムを構築することで、手術スタッフの省力化や医療費の低減、待機患者の減少、内視鏡下手術の普及が期待できる。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計2件)

T. Kawai, H. Hayashi, Y. Nishizawa, A. Nishikawa, ほか4名 (T. Nakamura, 8番目), Compact forceps manipulator with a spherical-coordinate linear and circular telescopic rail mechanism for endoscopic surgery, *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 12(8), 1345-1353, 2017. (査読有)

DOI:10.1007/s11548-017-1595-4

T. Kawai, T. Matsumoto, A. Nishikawa, Y. Nishizawa, T. Nakamura, Bending forceps manipulator with offset distance for single-port laparoscopy, *Adv Biomed Eng*, 5, 56-62, 2016. (査読有) DOI:10.14326/abe.5.56

### 〔学会発表〕(計47件)

H. Nakasuji, K. Naruki, T. Kawai, A. Nishikawa, Y. Nishizawa, T. Nakamura, Image Recognition of Triangular Tissue of an Organ Pulled by Forceps in Surgical Working Area for Laparoscope Robot, *39th Annual International Conf. IEEE-EMBC*, 2017.

南恭太, 河合俊和, 西澤祐吏, 西川敦, 中村達雄, はめあいコマ連結機構を有するワイヤ駆動式マニピュレータ, 第26回日本コンピュータ外科学会大会, 2017.  
大津湧, 河合俊和, 西川敦, 西澤祐吏, 中村達雄, 手術支援5軸鉗子マニピュレータを示指で操作する手元スイッチインタフェースの開発, 第56回日本生体医工学学会大会, 2017.

T. Kawai, H. Hayashi, A. Nishikawa, Y. Nishizawa, T. Nakamura, Compact forceps manipulator with spherical-coordinate linear and circular telescopic rail mechanism for laparoscopic surgery, *30th International Congress and Exhibition*

CARS, 2016.

小林広幸, 河合俊和, 西川敦, 西澤祐吏, 中村達雄, 手指の寸法に応じてスイッチ配置可能なオーダーメイド操作インタフェース, 第28回ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2016.

T. Kawai, T. Matsumoto, Y. Horise, A. Nishikawa, Y. Nishizawa, T. Nakamura, Flexible Locally Operated End-Effector Manipulator With Actuator Interchangeability For Single-Incision Laparoscopic Surgery, *29th International Congress and Exhibition CARS*, 2015.

河合俊和, 友兼賢大, 西川敦, 西澤祐吏, 中村達雄, ローカル操作型鉗子マニピュレータの手元スイッチ型5自由度インタフェースの開発, 第54回日本生体医工学学会大会, 2015.

他, 40件。

### 〔図書〕(計2件)

Y. Horise, A. Nishikawa, T. Kawai, K. Masamune, Y. Muragaki, Concept of Virtual Incision for Minimally Invasive Surgery. *Surgical Robotics* (Edited by Serdar Küçük, IntechOpen Limited, 151 pages), 23-35, 2018.

DOI:10.5772/intechopen.68561

河合俊和, 共存協調型手術支援ロボット開発, 人と協働するロボット革命最前線 (監修: 佐藤知正, 発行: NTS出版, 全342頁), 77-85, 2016.

### 〔その他〕

ホームページ等

<http://medicalrobotics.ninja-web.net/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

河合 俊和 (KAWAI, Toshikazu)

大阪工業大学・ロボティクス&デザイン工学部・教授

研究者番号: 90460766

### (2) 研究分担者

西川 敦 (NISHIKAWA, Atsushi)

信州大学・学術研究院繊維学部・教授

研究者番号: 20283731

中村 達雄 (NAKAMURA, Tatsuo)

京都大学・ウイルス・再生医科学研究所・准教授

研究者番号: 70227908

西澤 祐吏 (NISHIZAWA, Yuji)

国立研究開発法人国立がん研究センター・東病院・医員

研究者番号: 50545001