

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 12 日現在

機関番号：12602

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03199

研究課題名(和文) 操作者と自律動作ロボットの機能融合による遠隔手術支援システム

研究課題名(英文) Teleoperation of surgical assist system integrating operator and autonomous robot

研究代表者

川嶋 健嗣 (KAWASHIMA, KENJI)

東京医科歯科大学・生体材料工学研究所・教授

研究者番号：40300553

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：遠隔手術支援システムにおける制御性と作業効率の向上を目指して、半自律操作のための制御方法の提案とシステム開発を行った。はじめに、空気圧駆動を用いた力覚提示が可能な遠隔操作の手術支援ロボットにおいて、位置と力を伝送するバイラテラル制御における安定性評価を行なった。また、マスタデバイスで遠隔操作するスレーブ側のロボット鉗子と自律動作するロボット鉗子で構成されるシステムを提案試作した。同システムに、機械学習を用いた状態判別を用いて両鉗子が機能連携する半自律制御方法を提案し、実装した。実験によって、通常遠隔操作に対して、縫合時の作業時間が10%以上短縮できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

遠隔操作する空気圧駆動の手術支援ロボットにおいて、位置と力の情報を伝送するバイラテラル制御の安定性評価を行った。また、マスタスレーブで遠隔操作するロボット鉗子と自律動作するロボット鉗子で構成されるシステムを試作し、両鉗子が機能連携する半自律制御方法を提案した。内視鏡画像から機械学習を用いた状態判別と組み合わせ、外科手術で重要となる縫合操作の時間短縮の実現を実験によって明らかにした。低侵襲外科手術の作業時間の短縮、効率および安全性を高めることが期待される。また、提案した半自律制御は遠隔での触診ほか、外科手術以外にも広く遠隔操作システムに応用可能である。

研究成果の概要(英文)：To improve controllability and work efficiency of tele-surgery, we proposed semi-automatic control and developed a system. We evaluated the stability of a bilateral control of the robot system that can provide force feedback using pneumatic drive. Then, we developed a system wherein an operator manipulates a surgical instrument to insert a suture needle, and another surgical instrument automatically extracts the needle from the operated instrument. In the proposed method, YOLOv3 and standard convolutional neural network (CNN) were used to estimate the penetration and pull states of the needle. An image-based state estimator classifies the needle pull state regardless of the penetrability of the object into which the suture needle is inserted. Experiments on human cooperative control indicated the effectiveness of the needle pull state estimation using the proposed method, and confirmed that the method can reduce the suturing time about 10% compared to the master-slave tele-operation.

研究分野：人間機械システム

キーワード：手術ロボット 遠隔制御 機械学習 自律制御 空気圧サーボ マンマシンインターフェース マニピュレータ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

遠隔操作が可能な手術支援ロボットの普及が国内外で進み、それに伴って従来のマスタスレーブ制御だけでなく、自律での制御方法の提案などが活発になりはじめた[1]。しかし、実用化されたシステムでは、位置情報のみを伝送するユニラテラル制御、またその駆動には電動アクチュエータを用いたものが主流であった。力情報の提示が有効であるとの報告がなされていた。そこで、申請者らは空気圧アクチュエータの直接駆動の特長を活かして、圧力から鉗子先端での接触力を推定するアルゴリズムを提案した。これを遠隔操作に適用した場合のバイラテラル制御の安定性評価と、より効率を向上させる制御方法の提案が求められていた。

### 2. 研究の目的

本研究は遠隔手術支援システムにおける具体的な事例の一つとして低侵襲な外科手術を対象として、以下の2点の達成を目標とする。

1. 術者が遠隔操作する鉗子、自律動作する鉗子、操作対象物などで構成される非線形で非受動的な制御対象に対して、安定に連携作業ができる制御手法の提案と安定理論の確立。
2. マスタスレーブで遠隔操作するロボット鉗子と自律動作するロボット鉗子で構成される手術支援システムを試作、上記制御方法を実装し、機能連携による縫合操作の実現。

### 3. 研究の方法

操作者と自律動作するロボットの機能融合を目指した遠隔操作システムとして、図1に示すシステムを提案し、構築した。通常のマスタスレーブシステムに加え、自律的に動作するスレーブ用ロボット鉗子で構成される、マスタ1台に対してスレーブ側が2台のシステムとなっている。内視鏡カメラは市販の3D内視鏡を用い、マスタデバイスも市販の6自由度を有し、力覚提示可能なものを採用した。

はじめに、空気圧駆動のマスタスレーブシステムでの安定性を評価するために、シミュレーションを作製し、バイラテラル制御として通信遅れに対して電動システムでは安定性が保証されている波変数を用いた場合、空気圧システムにおける周波数領域での安定解析を行った。

次に、図1に示したシステムに半自律制御を提案、実装した。操作者はスレーブA1を操作して縫合針の刺入を行う。縫合針の貫通を検知すると、スレーブA2は針の引抜と受け渡しを自動で行う。縫合タスクの部分自動化のため、タスクを四つのステップに分割し、図2に示すような自動化を行う。Step 1では操作者がスレーブA1を操作して縫合針を刺入する。縫合針の貫通状態が検出されると、Step 2に移行しスレーブA2による針の引抜が自動制御される。縫合針の引抜状態が検出されると、Step 3に移行しスレーブA2は針の受け渡し位置まで移動する。受け渡し位置で停止するとStep 4に移行し、操作者はスレーブA1を操作して縫合針を把持する。縫合針の受け渡しが完了するとStep 1に戻る。縫合針の貫通と引抜状態を基にタスクの自動化を制御する。

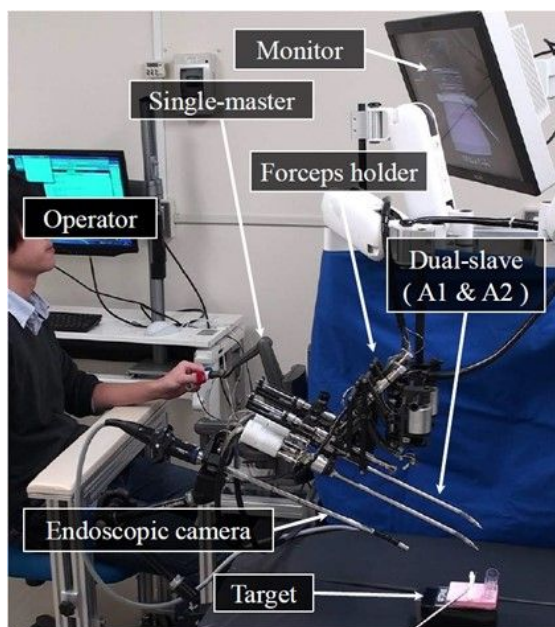


図1 開発した手術支援用の遠隔操作システム操作用マスタデバイス、スレーブ用ロボット鉗子システム、自律駆動するロボット鉗子システムおよび内視鏡カメラで構成



図2 提案した縫合タスクの部分自動化制御

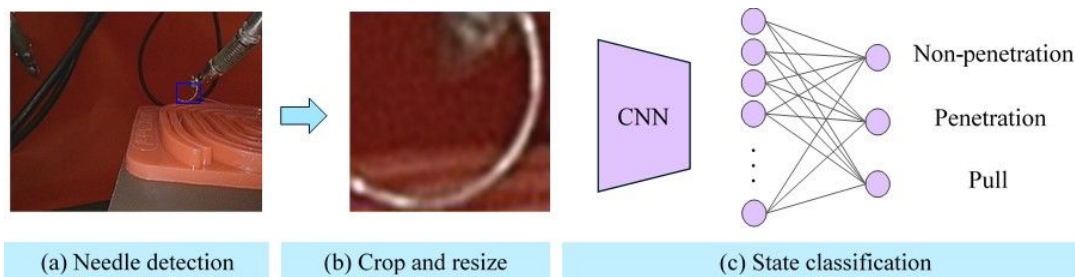


図 3 深層学習を用いた縫合タスクの状態推定

縫合タスクの状態を推定するため、深層学習を用いた内視鏡画像処理を行った。縫合タスクの状態推定手法を図 3 に示す。提案する状態推定手法は縫合針検出と状態推定を行う二つの深層学習から構成されており、縫合タスクの部分自動化に必要な非貫通、貫通、引抜の三つの状態を内視鏡画像から推定する。縫合針の検出には物体検出アルゴリズムである YOLOv3 を用いている。YOLOv3 は 680 px×540 px の内視鏡画像から縫合針の領域を検出する。検出された領域を切り抜き、256 px×256 px にサイズを変更した画像を縫合針の検出画像とした。状態推定には標準的な CNN を用いており、縫合針の検出画像を縫合タスクの三つの状態に分類する。

YOLOv3 に縫合針の特徴を学習させるため、内視鏡画像と縫合針の領域を紐付けした学習用データセットを作成した。縫合タスクの非貫通、貫通、引抜状態の画像が等しく分布するように作成した 1,471 のデータセットを学習した。状態推定を行う CNN を学習するため、YOLOv3 によって検出された縫合針の切り抜き画像と非貫通、貫通、引抜状態を紐付けした学習用データセットを新たに作成した。学習済みの YOLOv3 が検出した 13,386 の縫合針の検出画像を用いて状態推定用の CNN を学習した。

患者への負担を考慮すると手術時間は短い方が好ましく、状態推定は高速で処理されることが望まれる。そのため、SSD や RetinaNet よりも高速で動作する YOLOv3 を用いている。また、画像分類で高いスコアを記録した Resnet や Alexnet に代表される大規模なネットワークではなく、計算速度の速い標準的な CNN を用いている。深層学習によるタスク状態推定は並列計算による高速処理が可能であり、10 Hz で駆動することが確認された。

#### 4. 研究成果

遠隔手術口ポットのバイラテラル制御の性能を向上させるために、スレーブ側で空気圧駆動を採用しているシステムに対する、制御系の安定性について、周波数領域での安定解析からの理論的な考察を実施した。その結果、空気圧制御系は電動サーボ系と異なり 3 次遅れ系となることから、制御ゲインの選定によっては必ずしも受動性を満たさないことを示した。

次に提案した縫合タスクの部分自動化を検証するため、自動化実験を実施した。Step 1 でスレーブ AI が縫合針を把持している状態をタスク開始、Step 4 で針の受け渡しが完了した状態をタスク終了と定義した。また、針の受け渡しが完了したタスクを成功、それ以外のタスクを失敗とした。縫合タスクを 5 回実施し、タスク全体の区間と自動化区間についてタスク時間を計測した。自動化区間とは貫通した縫合針の把持と引抜を行う Step 2 の区間である。タスク時間を比較するため、両手で縫合を行う従来のタスクを 5 回実施し、同様の区間でタスク時間を計測した。

提案手法と従来手法のタスク時間を比較した結果を図 4 に示す。t 検定を行いタスク時間に有意な差が確認された。図 4(a)は提案手法によって縫合タスクの時間が短縮されたことを示している。図 4(b)は自動化区間のタスク時間が短縮され、時間のばらつきが小さいことを示している。従来手法では、3D 内視鏡を通した奥行方向の位置合わせに時間を費やしている。提案手法では、位置合わせを自動化したことでタスク時間が短縮されたと考えられる。実験結果は、提案手法による縫合タスクの部分自動化が達成されたことを示した。

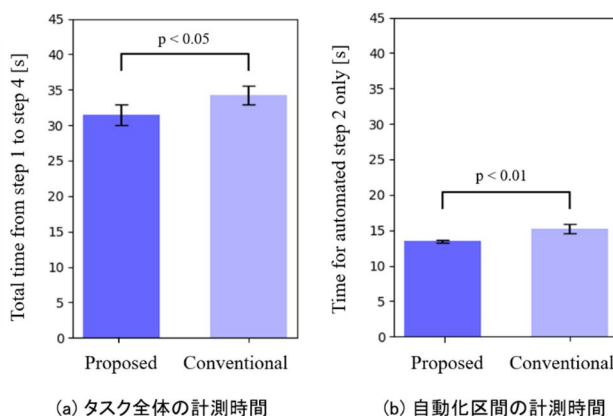


図 4 半自律制御によるタスク時間の実験結果

#### < 引用文献 >

R. A. Beasley, "Medical Robots: Current Systems and Research Directions" Journal of Robotics, 2012.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Dimitrios Karponis, Koya Yokota, Ryoken Miyazaki, Takahiro Kanno, Kenji Kawashima	4. 巻 13
2. 論文標題 Evaluation of a pneumatic surgical robot with dynamic force feedback	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Robotic Surgery	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1007/s11701-018-0878-2">https://doi.org/10.1007/s11701-018-0878-2</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Kengo Watanabe, Takahiro Kanno, Kazuhisa Ito, Kenji Kawashima	4. 巻 65
2. 論文標題 Single Master Dual Slave Surgical Robot with Automated Relay of Suture Needle	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 6343-6351
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIE.2017.2786206	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 3件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Takuya Iwai, Takahiro Kanno, Kenji Kawashima
2. 発表標題 Robotic Forceps Measuring Joint Pose with Visual SLAM
3. 学会等名 The 8th International Conference on Positioning Technology (ICPT 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroki Kaji, Takahiro Kanno, Tetsuro Miyazaki, Toshihiro Kawase, Kenji Kawashima
2. 発表標題 External Force Estimation of Forceps Tip Using Machine Learning
3. 学会等名 The 8th International Conference on Positioning Technology (ICPT 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryoken Miyazaki, Takahiro Kanno, Kenji Kawashima
2. 発表標題 Immersive Operation Interface for Surgical Robot Using Motion Sensor and VR Headset
3. 学会等名 The 8th International Conference on Positioning Technology (ICPT 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenji Kawashima
2. 発表標題 Robotic Surgical System using Pneumatic Actuators
3. 学会等名 16th Urological Association of Asia Congress, (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三ヶ田拓人, 梶創揮, 岩井拓也, 菅野貴皓, 川瀬利弘, 宮崎哲郎, 川嶋健嗣
2. 発表標題 内視鏡画像を用いたCNNによるロボット鉗子の姿勢推定
3. 学会等名 計測自動制御学会産業応用部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横田航也, 藤田壽憲, 宮崎良兼, 菅野貴皓, 川嶋健嗣
2. 発表標題 非接触回転伝達機構による着脱が可能な鉗子マニピュレータの制御性
3. 学会等名 計測自動制御学会産業応用部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横田航也, 宮崎良兼, 菅野貴皓, 藤田壽憲, 川嶋健嗣
2. 発表標題 非接触回転伝達機構による着脱が可能な空気圧駆動鉗子マニピュレータ
3. 学会等名 第36 回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryoken Miyazaki, Takahiro Kanno, Kenji Kawashima
2. 発表標題 Master-Slave Integrated Surgical Robot for Laparoscopic Surgery with Semi-Automation Control using Hand Rotation
3. 学会等名 The 10th JFPS International Symposium on Fluid Power (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 庄司将記, 宮崎良兼, 菅野貴皓, 川嶋健嗣
2. 発表標題 先端回転機構を有する空気圧稼働鉗子マニピュレータの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 久富玲依, 宮崎良兼, 田上俊宏, 菅野貴皓, 米田隆志, 川嶋健嗣
2. 発表標題 操作部に弾性体を用いたマスタスレーブ型手術支援システムの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 川嶋健嗣
2. 発表標題 わが国発の手術支援ロボットの開発
3. 学会等名 第 30 回日本泌尿器内視鏡学会総会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 川嶋健嗣
2. 発表標題 低侵襲な外科手術を支援する空気圧駆動ロボットシステム
3. 学会等名 化学とマイクロ・ナノ システム学会第 35 回研究（招待講演）
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	菅野 貴皓  (Kanno Takahiro)  (50714234)	東京医科歯科大学・生体材料工学研究所・助教   (12602)	
研究分担者	只野 耕太郎  (Tadano Kotaro)  (90523663)	東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授   (12608)	