

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560306

研究課題名(和文) 微細手術支援ローカル操作型着脱式術具マニピュレータ

研究課題名(英文) Locally operated detachable end-effector manipulator for accurate surgery

研究代表者

河合 俊和 (Kawai, Toshikazu)

大阪工業大学・工学部・准教授

研究者番号：90460766

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：患者傍で執刀医が行う低侵襲な内視鏡下手術をロボットで支援する、従来鉗子を着脱可能な新しいマニピュレータを開発した。この第三の手としてのローカル操作型着脱式術具マニピュレータは、(1)執刀医と共存して作業する鉗子マニピュレータ、(2)執刀医とマニピュレータが協調した作業を行うローカル操作インタフェース、(3)ステッピングモータによる臓器の硬さ計測手法、から構成される。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、低侵襲な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 manipulator with a detachable commercial forceps was developed that allows minimally invasive robotically assisted endoscopic surgery by a surgeon working near the patient. The locally operated detachable end-effector manipulator (LODEM) that can act as a third arm for the surgeon was consisted of (1) forceps manipulator that coexisted with the surgeon, (2) locally operated interface that collaborated with the surgeon and the manipulator, and (3) method of measuring elasticity of organ using a stepper motor. These devices are highly promising for robotic surgery applications. Furthermore, this manipulator leads to reduce medical staff and the costs, patients waiting for their surgery, and become widely used endoscopic surgery.

研究分野：医療ロボティクス

科研費の分科・細目：機械工学、知能機械学・機械システム

キーワード：手術支援ロボット マニピュレータ ローカル操作 硬さ計測

1. 研究開始当初の背景

患者に優しい外科治療として、創痕が小さく整容性に優れ、身体への負担が軽く、社会復帰も早期に可能となる内視鏡下手術が普及しつつある。本術式において、内視鏡による拡大視野の下で微細な手技を実現するには、臓器を把持して2方向に引張り、十分な張力をかけた状態で切開することが重要となる。特に、執刀医は自由度の少ない術具を操作し、手の振戦を抑え、内視鏡や鉗子を操る助手と協調する必要がある。これまでに、マスタ・スレーブ制御によるリモート操作でこれらの課題が解決されたが、緊急時の対応を考えると、患者傍の滅菌エリアでのローカル操作が安全性の面から優れている。そこで、ローカル操作型の手術ロボットやデバイスの多くが開発され、多自由度機構を備える手動鉗子、手の振戦を抑制する受動ブレーキのスタビライザー、内視鏡保持ロボットが実現した。しかし、臓器を把持して張力をかける鉗子ロボットは存在しなかった。

また、外科手術での触診は、臓器の状態を知って効果的な診断と治療を導く必要不可欠な手技である。最新のロボット支援手術では力覚がないため、臓器の変形程度を視覚で認識し、操作入力機構の摩擦による疑似的な力覚で硬さを推定しており、医師に過度の負担を強いると考えられた。

本研究では、「ローカル操作型手術支援マニピュレータ」などを実現する人間共存・協調ロボット工学の基盤技術を、有機的な医工連携研究を通じて構築することを目指している。そして、構築した基盤技術を学術的に体系化し、ヒトとの親和性の高い機構や制御に関するロボット工学設計論を確立する。執刀医の第三の手として使い慣れた鉗子を着脱可能で5自由度を備える、「微細手術支援ローカル操作型着脱式術具マニピュレータ」(locally operated detachable end-effector manipulator, LODEM)を実現するため、次の3つの要素研究に分けて遂行した。

(1) 執刀医と共存して作業できる鉗子マニピュレータ

(2) 執刀医とマニピュレータが協調した作業を行えるローカル操作インタフェース

(3) マニピュレータを高機能化する力覚センシング手法

2. 研究の目的

(1) 鉗子マニピュレータ

マニピュレータの小型化と装着した従来鉗子の位置決めは、安全なローカル操作に重要である。多自由度の専用鉗子を精密に位置決め可能な大型の手術マニピュレータは多数開発されているが、第三の手として従来鉗子を装着する小型マニピュレータは無く、必要な位置決め精度も明らかでは無かった。

また、マニピュレータの簡単な運搬と設置は、持ち運ぶ医師にとって重要である。すなわち、分割による小型化が可能なモバイル式

マニピュレータ機構が必要となる。手術マニピュレータ機構は多数開発されているが、簡易に分割や変形することは難しかった。

(2) ローカル操作インタフェース

執刀医が内視鏡モニタに集中できる直感的な操作インタフェースが重要である。また、装着型のインタフェースは執刀医にとって煩わしく、鉗子マニピュレータに必要な5自由度を操作できる非装着型インタフェースが必要である。内視鏡把持ロボットは、高々3自由度の操作を行う装着型が多く、適用は難しかった。

(3) 力覚センシング手法

マニピュレータで臓器の計測と把持を行うには、滅菌性が重要である。すなわち、電氣的センサを使わない計測方式で、把持機構部とアクチュエータ部を分離できる単純小型な機構が必要となる。把持力や臓器の機械的特性を計測する手法は多数研究されているが、上記課題を実現することは難しかった。

そこで、これら課題を解決する鉗子マニピュレータ、ローカル操作インタフェース、力覚センシング手法を開発して、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。

3. 研究の方法

(1) 鉗子マニピュレータ

複数種の従来鉗子が着脱可能な小型鉗子マニピュレータを開発した。本マニピュレータは、鉗子本体を位置決めする水平多関節のSCARAアームと、その先端に鉗子をワイヤ駆動する受動ジンバル機構を有し、把持力2N以上、牽引力5N以上、自由度数5、重量47kg以下である。試作マニピュレータの位置決め精度などを計測し、専門医による*in vivo*での模擬手術を行った。

モバイル式鉗子マニピュレータを開発した。本マニピュレータは、折り畳みできるスライダクランク機構とアクチュエータから動力伝達する分離可能なケーブルロッド機構を有し、作用力5N以上、自由度数5、重量15kg以下である。試作マニピュレータの位置決め精度や組立時間などを計測し、専門医と学生によるタスクモデルでの操作時間を計測して、*in vivo*での模擬手術を行った。

(2) ローカル操作インタフェース

鉗子マニピュレータを執刀医一人でローカル操作可能な術具装着式の手先スイッチ型とフットマウス型のインタフェースを開発した。本インタフェースは、on/off入力機構を用いて、ピボット拘束して挿入移動可能な鉗子の先端が水平面と長軸方向で駆動する、クローズドループ制御方式である。小型鉗子マニピュレータに実装して、専門医によるタスクモデルでの操作時間を計測して、臓器モデルでの模擬手術を行った。

術具装着式の手先スイッチ型インタフェースを開発した。本インタフェースは、5自由度の on/off 入力機構を用いたオープンループ制御方式である。モバイル式鉗子マニピュレータに実装して、専門医によるタスクモデルでの操作時間を計測して、臓器モデルでの模擬手術を行った。

ハンズフリーのインタフェースを開発した。本インタフェースは、床に設置した圧力センサシートを用いて、執刀医の脚動作に伴う足重心の位置と荷重における時間変化を計測する方式である。専門医と学生を対象に6つの脚動作のパターン解析を実施した。次に、専門医の足重心パターンを時間微分で認識して5自由度を on/off でオープンループ制御するインタフェースを構築し、モバイル式鉗子マニピュレータに実装して、専門医による臓器モデルでの模擬手術を行った。また、練習時間と対象となる操作軸を認識してから動作許可を与えるまでの時間を計測した。

(3) 力覚センシング手法

ステッピングモータの脱調現象を活用した臓器硬さ計測手法を開発した。本手法は、ステッピングモータに取り付けたグリッパで一定の印加力を与えて臓器を圧縮し、作用反作用力が釣り合っただけでモータが空回りするまでの臓器変形量をエンコーダで取得して、ヤング率またはバネ定数を算出する計測モデルである。本手法を適用した分解能 $1\mu\text{m}$ のダイレクト駆動バー、傘歯式短軸グリッパ、リンク式長軸鉗子を試作し、材料試験機で校正を行って、各々シリコンゴムの試験片と、*in vitro*と *in vivo*で臓器の硬さを計測した。

4. 研究成果

(1) 鉗子マニピュレータ

小型鉗子マニピュレータの位置決め精度は 0.5mm で、*in vivo*での内視鏡下手術手技において、対象臓器を臨床に必要な要求レベルでハンドリングすることに成功し、第三の手として十分な精度であることを示した。

モバイル式鉗子マニピュレータの位置決め精度は 0.4mm で、臓器のハンドリングに十分な精度を示した。試作マニピュレータの組立と分解の時間は8分間で、高いモバイル性を示した。*In vivo*での内視鏡下手術手技において、対象臓器を臨床に必要な要求レベルでハンドリングすることに成功した。

(2) ローカル操作インタフェース

タスクモデルでのラーニングカーブは、手先スイッチ型で4回目に収束し、速やかな習熟度を示した。フットスイッチ型では収束傾向は見られなかったが、学生の操作時間が専門医より短かったことから、脚動作入力方式の可能性を示唆した。臓器モデルを対象に、小型鉗子マニピュレータを用いてハンドリングすることに成功した。

タスクモデルでのラーニングカーブは3回

目で収束し、速やかな習熟度を示した。操作時間は の手法に対して約半分となり、簡易なオープンループ制御方式の有用性を示唆した。臓器モデルを対象に、モバイル式鉗子マニピュレータを用いてハンドリングすることに成功した。

6つの脚動作に伴う足重心の位置と荷重は、flat, step, pulse の信号に正負号を考慮した5つのパターンを示すことが明らかになった。臓器モデルを対象に、モバイル式鉗子マニピュレータを用いてハンドリングすることに成功した。練習時間は5分間で、機械学習による認識率向上の方策を示した。動作許可を与えるまでの時間は3秒間で、グラフィック提示での時間短縮案を示した。

(3) 力覚センシング手法

シリコンゴムの試験片と *in vitro* 臓器の硬さ計測結果の相関係数は各々 0.91 と 0.87 で、高い相関を示した。長軸タイプのグリッパでは、*in vivo* 臓器の硬さの違いを計測できた。これにより、ステッピングモータを用いた臓器硬さ計測手法は、力センサ方式と交換できる可能性を示した。

以上、本研究「微細手術支援ローカル操作型着脱式術具マニピュレータ」により、ロボット支援手術への応用が高く期待できる、患者傍で執刀医が行う低侵襲な内視鏡下手術を支援する、従来鉗子を着脱可能な新しいマニピュレータを開発した。

ローカル操作型マニピュレータなどを実現する人間共存・協調ロボット工学の基盤技術を有機的な医工連携研究を通じて構築し、学術的に体系化して、ヒトとの親和性の高い機構や制御に関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、新聞記事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本技術を発展させることで、手術スタッフの省力化や医療費低減、待機患者減少、低侵襲手術の普及が期待できる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

Toshikazu Kawai, Myongyu Shin, Yuji Nishizawa, Yuki Horise, Atsushi Nishikawa, Tatsuo Nakamura: Mobile locally operated detachable end-effector manipulator for endoscopic surgery, 査読有, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, Online first, 2014, DOI: 10.1007/s11548-014-1062-4 Toshikazu Kawai, Kensuke Nishio, Shota

Mizuno, Yusuke Morita, Yuji Nishizawa, Tatsuo Nakamura: A Method of Measuring Elasticity using the Step-out Phenomenon of a Stepper Motor, 査読有, Advanced Biomedical Engineering, Vol. 3, pp.14-20, 2014, <http://dx.doi.org/10.14326/abe.3.14>
河合俊和: ハプティクスと外科手術, 電気学会, 査読無, Vol. 133, No. 5, pp.282-285, 2013, DOI:10.1541/ieejjournal.133.282
河合俊和, 橋田淳, 申明奎, 西澤祐吏, 中村達雄, 森田直也, 室谷友哉, 望月修一: 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, 査読有, 日本コンピュータ外科学, Vol. 14, No. 1, pp.5-14, 2012, <http://ci.nii.ac.jp/naid/10030613839>

〔学会発表〕(計 29 件)

Toshikazu Kawai, Masanori Fukunishi, Atsushi Nishikawa, Yuji Nishizawa, Tatsuo Nakamura: Hands-free Interface for Surgical Procedures Based on Foot Movement Patterns, the 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, August 26-30, 2014, Chicago, USA.

Toshikazu Kawai, Myongyu Shin, Yuki Horise, Atsushi Nishikawa, Yuji Nishizawa, Tatsuo Nakamura: Mobile Locally Operated Detachable End-effector Manipulator for Endoscopic Surgery, the 28th International Congress and Exhibition of Computer Assisted Radiology and Surgery, June 27, 2014, Fukuoka, Japan.

Toshikazu Kawai, Kensuke Nishio, Yusuke Morita, Yuji Nishizawa, Tatsuo Nakamura: Sensing Elasticity from the Phase Difference of the Stepper Motor, the 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, July 5, 2013, Osaka, Japan.

Toshikazu Kawai, Myongyu Shin, Yuki Horise, Atsushi Nishikawa, Yuji Nishizawa, Tatsuo Nakamura: Mobile-type Locally Operated Detachable End-effector Manipulator for Laparoscopic Surgery, the 27th International Congress and Exhibition of Computer Assisted Radiology and Surgery, June 26-29, 2013, Heidelberg, Germany.

Yuji Nishizawa, Toshikazu Kawai, Jun Hashida, Myongyu Shin, Yasuyuki Suzuki: LOCAL OPERATED DETACHABLE

ENDO-EFFECTOR MANIPULATOR FOR ENDOSCOPIC SURGERY, Society of American Gastrointestinal and Endoscopic Surgeons Annual Meeting, April 17-20, 2013, Baltimore, USA.
Myongyu Shin, Toshikazu Kawai, Jun Hashida, Yuji Nishizawa, Tatsuo Nakamura: Locally Operated Detachable End-effector Manipulator for Laparoscopic Surgery, the 26th International Congress and Exhibition of Computer Assisted Radiology and Surgery, June 27-30, 2012, Pisa, Italy.

Kensuke Nishio, Toshikazu Kawai, Yusuke Morita, Yuji Nishizawa, Tatsuo Nakamura: Elasticity sensing forceps with stepper motor, the 26th International Congress and Exhibition of Computer Assisted Radiology and Surgery, June 27-30, 2012, Pisa, Italy.

Toshikazu Kawai, Shota Mizuno, Yuji Nishizawa, Tatsuo Nakamura: Measurement method for internal organs elasticity from step-out phenomenon of stepper motor, the 25th International Congress and Exhibition of Computer Assisted Radiology and Surgery, June 22-25, 2011, Berlin, Germany.

〔その他〕

報道関連

河合俊和: 医療用「ロデム」開発, わたしはロボット, 読売新聞 朝刊 12 面, 2011 年 12 月 26 日.

ホームページ等

<http://www.oit.ac.jp/bme/~kawai/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河合 俊和 (KAWAI, Toshikazu)
大阪工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 9 0 4 6 0 7 6 6

(2) 研究分担者

中村 達雄 (NAKAMURA, Tatsuo)
京都大学・再生医科学研究所・准教授
研究者番号: 7 0 2 2 7 9 0 8

西澤 祐吏 (NISHIZAWA, Yuji)
香川大学・医学部・助教
研究者番号: 5 0 5 4 5 0 0 1

西川 敦 (NISHIKAWA, Atsushi)
信州大学・繊維学部・教授
研究者番号: 2 0 2 8 3 7 3 1