

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：32714

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K12116

研究課題名(和文) 鉗子装着式計測デバイスによる手術スキルデータ取得と操作誘導法に関する研究

研究課題名(英文) Surgical skill data acquisition and operation guiding using forceps-mounted measurement device

研究代表者

金 大永 (KIM, Daeyoung)

神奈川工科大学・健康医療科学部・教授

研究者番号：60461860

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：市販の鉗子への応用を目的として、以下のことを行った。

1. 臓器の弾性計測・把持力誘導：鉗子操作だけで、術者の把持力、対象の弾性が計測可能なシステムを構築した。15gの軽量で小型の干渉装置を開発し、モータ駆動の空圧機構を使って、8Nの干渉力を出した。ブタを用いたin vivo実験では、セットアップ時間は約5分であった。

2. 鉗子の表示・操作誘導：本研究では新たな試みとして、ディープラーニングにより、カメラ画像から直接鉗子の位置姿勢を求める手法を検討した。手術室内にあるデバイスのみによる鉗子の位置計測・表示を目的として、深層学習を用いた単眼カメラによる、鉗子位置姿勢計測法を提案、十分な精度結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、高価な装置や大型のロボットシステムを使わずに、術者を主役としたアシスタントシステムであることが特徴である。よって、全自動で手術の主導権を握る訳ではなく、術者により安全な動作へと誘導する。その誘導法として、術者へ力を伝える触感的な方法と画像を利用した視覚的方法を提示したことに意義がある。また、その対象が一般的に市販されている鉗子にも応用が可能であり、より良い技術を広く医療社会に貢献できるのも大きな意義であると思われる。

また、機械学習の対象を人間ではなく、カメラ画像から直接鉗子の位置姿勢を求める方向へと転換し、良い結果を得ることが出来たのも学術的に新しい試みとしての意義を持っている。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of application to commercially available forceps, the following steps were undertaken:

Measurement of organ elasticity and induction of gripping force: We developed a system that can measure the gripping force exerted by the surgeon and the elasticity of the target object solely by manipulating the forceps. A compact interference device weighing 15 g was designed, and an interference force of 8 N was generated using a motor-driven pneumatic mechanism. In in vivo experiments conducted on pigs, the setup time averaged 5 minutes.

Display and operation guidance of forceps: As a novel approach in our research, we explored a method to directly extract the position and orientation of the forceps from the camera image using deep learning. To achieve the goal of measuring and displaying the forceps' position using only equipment available in the operating room, we proposed a method employing monocular camera and deep learning to measure the forceps' position and orientation.

研究分野：外科支援デバイス・ロボット

キーワード：鉗子能動制御 低侵襲 腹腔鏡下手術 コンピュータ外科支援 ネガティブフィードバック

1. 研究開始当初の背景

内視鏡手術において得られる情報は内視鏡からの映像のみであり、術者は経験に基づいて弾性率などの臓器の力学的特性を判断し、適切な力加減で操作を行うことで臓器への損傷を最小限に抑えている。しかしながら、経験の浅い医師やロボットにとってはその判断が困難であり、把持や臓器の移動によって臓器を傷つける恐れがある。したがって、臓器の損傷を最小限に抑えるためには、術中において臓器の力学的特性などの情報をリアルタイムで術者やロボットに提供可能なシステムが必要である。

そこで我々は、腹腔鏡下手術において重要な要素を占める電気メスの使用性向上を目的として、組織が受けている力を計測・算出し、その結果を画像に提示するシステムを開発した。これは13個のひずみゲージを鉗子に配置し計算を行うことで、挟む力と持ち上げる力、2軸の曲げる力を独立的に計測しており、*in vivo* 実験にてその有効性を確認した。また、内視鏡下手術でも使用可能な折り畳み式の機構を用いたデバイスも開発し、*in vivo* 実験にて臓器の弾性率を計測することに成功した。しかし、計測した臓器の弾性や組織から受ける力が計測可能でも、その情報をどのように活用し、操作するかは、まだ術者の経験に大きく頼ることになる。臓器の力学的特性に対して適切な操作とは何かを実験を用いてデータベース構築し、リアルタイムで取得したデータや熟練者のデータに基づいて、誘導することが可能なシステムが必要とされる。臓器の力学的特性と治療機器の操作によって、臓器の損傷具合は決まる。しかし、臓器に負荷をかける方法や形状の問題などから、術中鉗子などの道具から得られる臓器の力学特性と一般的に行われている圧縮・引張による臓器の力学的特性は差が出てしまう。実験を用いてその相関関係を明確にすることで既存のデータベースが有効に活用出来、様々な形の道具から得られる計測値から臓器の力学特性を予測することも可能になり、適切な操作へ誘導することで、結果的に低侵襲治療へ繋がる。

2. 研究の目的

本研究では、臓器の力学特性と術者の操作法との相関関係をデータベース化し学習することにより、「装着型の計測デバイスを用いて臓器の力学特性を推算し、術者側にその情報を提供、安全な操作へ誘導する」ことを目的とする。具体的な内容を以下に示す。

① 一般材料試験から得られた臓器の力学特性と鉗子など治療機器から得られる特性の関係を明確にする。② 市販の鉗子にも応用可能な計測・表示・誘導システムを構築し、適切な鉗子の把持力を誘導する。

3. 研究の方法

以下の3つについて研究する。

① 臓器の既存データと鉗子から得られる値の関係を明確にする計測システム構築：鉗子先端での把持力を計測する為、我々が開発したデバイスを改良し、把持部は臓器などを挟めるように設計し、臓器を挟んだ時に鉗子の先端に発生する力を計測することを可能にする。臓器の弾性率によって、臓器に触れてから操作に必要な力を入れるタイミングや力加減が変わる傾向を観察し、熟練とした医者と操作に慣れていない素人との差を比較・分析する。

② 市販の鉗子にも応用可能な計測・表示システム構築：鉗子には、先行研究で行った結果を基に、鉗子を動かすロッドにひずみゲージを複数つけることで、鉗子先端で発生する力と術者の把持する力の伝達を観察する。術者の把持部には、親指の力が入る場所にひずみゲージを付け、術者の力を計測する。同時に把持をする為に変動させた把持部の回転角度を、ポテンショメータを用いることで動かした変位値を計測する。ロッドのひずみゲージから計測した値と比較することで、硬い臓器の場合は、同じ回転角度でもより大きな力が発生するので、その相関関係に注目する。表示システムは、先行研究で光学式位置検出器を使用した為、精度が低く、術野を狭くするデメリットがあった為、慣性センサと画像処理等、高精度で術野の妨げとならない手法を検討する。また、誘導したい方向の表示を行うことを最終目的とする。

③ 適切な鉗子の把持力を誘導する制御システム：誘導法として、本研究では適切な把持力を越えた場合に水・空圧や電気粘性流体等を用いて術者の操作を干渉し、術者に臓器の操作法を覚えさせる。

4. 研究成果

適切な鉗子把持力を誘導するための鉗子操作誘導装置を開発するにあたって、より多くの病院で使われるよう、市販の鉗子に応用可能なシステムの開発を行った。

(1) 臓器の弾性計測・把持力誘導システム

鉗子进行操作するだけで、術者の把持力、対象の弾性がリアルタイムで計測可能なシステムを構築した。把持した対象の弾性を図るためには、臓器からの反力と鉗子先端で対象物を変形させた量を計測する必要がある。臓器からの反力は鉗子の把持を行う内部のロッドに継手を作成し、その継手にひずみゲージを貼って計測した。また、グリップにもひずみゲージを貼ってかかる術

者の力を計測して比較した。対象の変形は、鉗子先端の開閉程度に比例関係であることを利用し、グripperの内部に小型のポテンシオメータを組み込み、リアルタイムで対象の弾性と術者からかかる力を計測した。その詳細を Fig. 1 に示す。

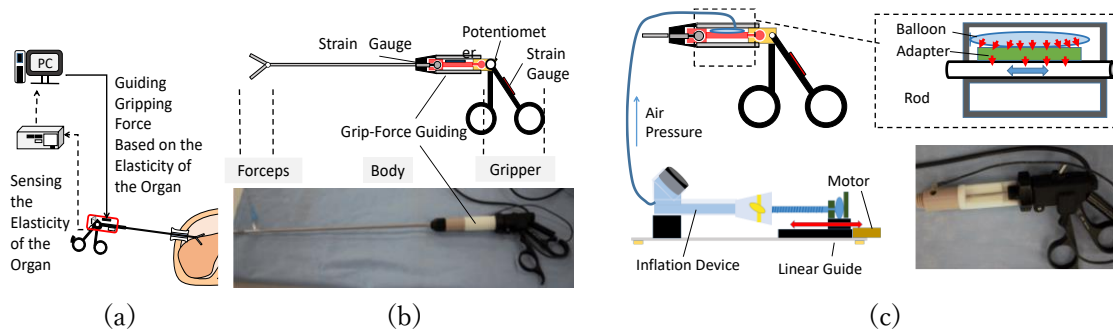


Fig. 1. システムの概要 (a) 研究のコンセプト: 動作中の鉗子から臓器の弾性を測定し、測定された臓器の弾性に応じて臓器を安全に把持できる装置。臓器を傷つけない適切な把持力は、把持力誘導装置を用いてネガティブフィードバックをかけることで誘導される。(b) 開発したシステムは、弾性測定装置と把持力誘導装置から構成される。把持力誘導装置は、操作を妨げないように小さくて軽い必要がある。市販の鉗子を使用しているため、搭載可能な構造になるように設計された。(c) モータで駆動によるバルーン膨張を利用した把持力誘導装置。

干渉デバイス(Fig. 1(c)参照)は、PCI 用の小型バルーンを用いて軽量で小型の干渉装置(径 22 mm、長さ 50 mm、重さ約 15gf)を設計・製作し、評価実験を行った。Fig. 2(a)にはブタの膵臓を把持した際の結果を、Fig. 2(b)には干渉デバイスの発生力計測の結果を示す。1次製作で最も改善すべき問題点はその干渉時の発生力(1.2N)であった。内部構造にテコの機構を入れて改善した結果、モータ駆動の空圧機構を使い、バルーンの内圧が 300kPa の時に鉗子把持に 8N の干渉力を出すことが可能であった。10 倍近く力が出ることになったが、PCI 用バルーンはその耐久性に問題があり、数十回の使用で劣化が激しく、再現性の低い結果となった。

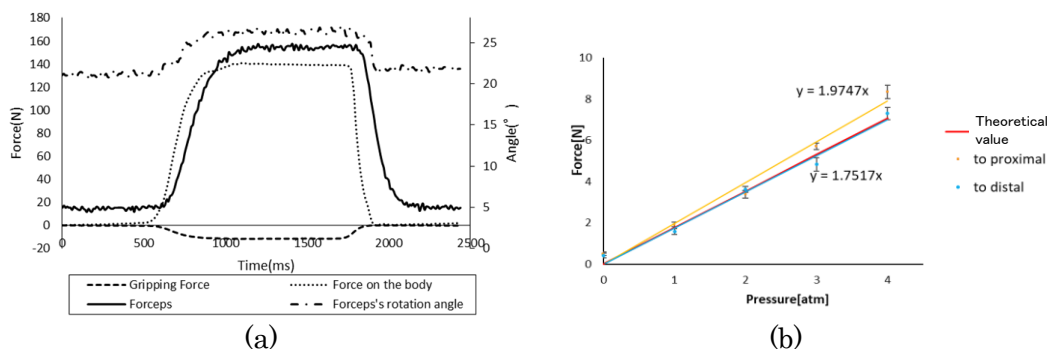


Fig. 2 デバイスの評価実験結果、(a) 製作したデバイスでブタ膵臓を把持した際の計測結果、(b) 干渉装置の発生力計測結果。

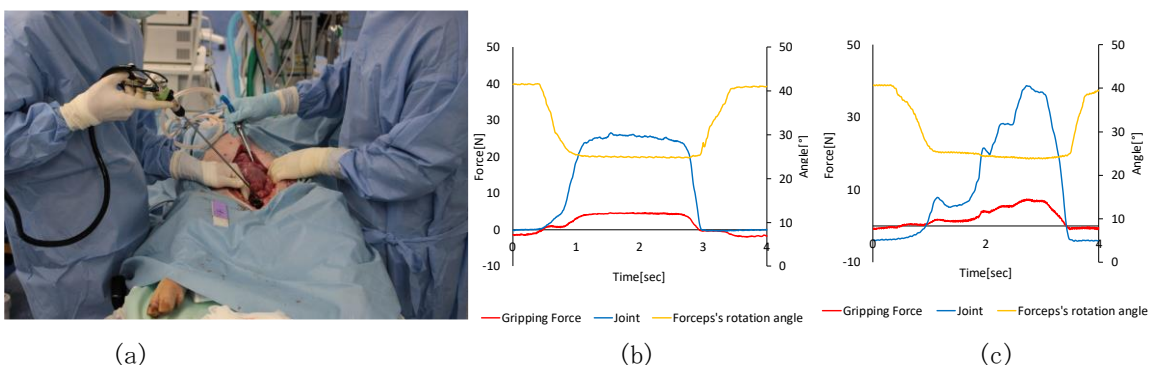


Fig. 3 ブタでの in vivo 実験、(a) 実験風景; 熟練した外科医と経験のない初心者が同じ動作を行い、そのスキルデータを取得した、(b) 外科医による鉗子デバイスの動作データ: 一般的になめらかで一定な力を出すことが可能であることが分かる。特に臓器の把持力についてその安定さは明らかであった。(c) 経験のない初心者による鉗子デバイスの動作データ。

開発したデバイスについて、臨床使用での有用性を確かめるため、また、熟練した外科医と初心者との鉗子使用時の差を見つけるため、ブタを用いた *in vivo* 実験を行った (Fig.3 参照)。軽量であり、マイコンを組み込んだシンプルなシステムであるため、セットアップ時間は約 5 分で、大腸の一部を一定時間 10 回持ち上げる評価実験も 13 分 49 秒で終了した。

課題となった耐久性の向上のために、人工筋を応用することとなった。5mL のシリコンバルーンは、その耐久性には優れているものの、大きな圧力 (実験結果 0.5atm) で簡単に破裂してしまう。そこで、シリコンバルーンをナイロンの網で覆うことで 5atm までも数十回の動作に耐えられた。

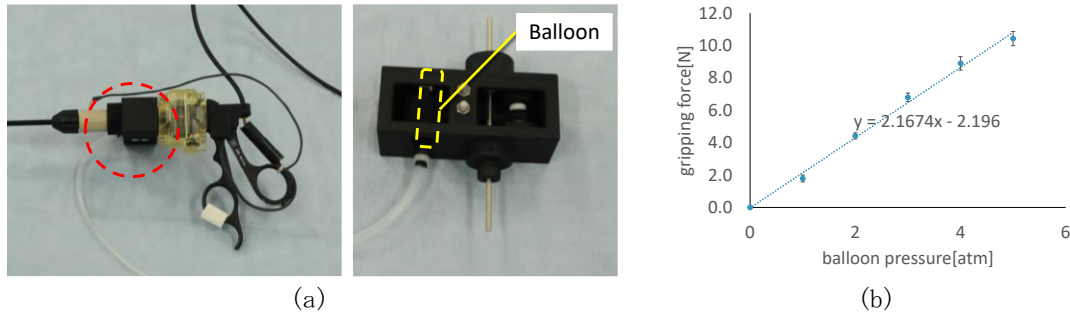


Fig.4 人工筋を利用した干渉装置の改良 (a) 構造、(b) 発生力

(2) 鉗子の表示・操作誘導システム

本研究の表示システムは、光学系ナビゲーションシステムを基盤にして構築された。術中の鉗子操作力情報を内視鏡画像上に重畳表示するシステムの改良を行い、鉗子先端に加わる 3 軸方向の力を表示する矢印を、操作力の大きさに従い、青・黄・赤の 3 色に変化させることとした。さらに力計測鉗子自体に自重補正機能を付加し、自重補正值等の数値データも画面上に表示することにより、計測表示している操作力の信頼性を確認可能とした。動物による評価実験を行ったところ、表示は問題無くされたが、視野を妨げる場合もあるため、表示を Picture in Picture 形式にするなどの工夫が必要であると考えられた。また、光学系ナビゲーションシステムでは、術者の位置や動作によって鉗子の位置情報が得られないことがあった。本研究では、その中で、臓器の損傷を起こす可能性の高い、鉗子の挿入量を計測可能にする 21gf のトロッカ型デバイスを設計・開発した (Fig.5 参照)。磁石とホール素子を用いたデバイスでの有効性は動物実験でも検証された。

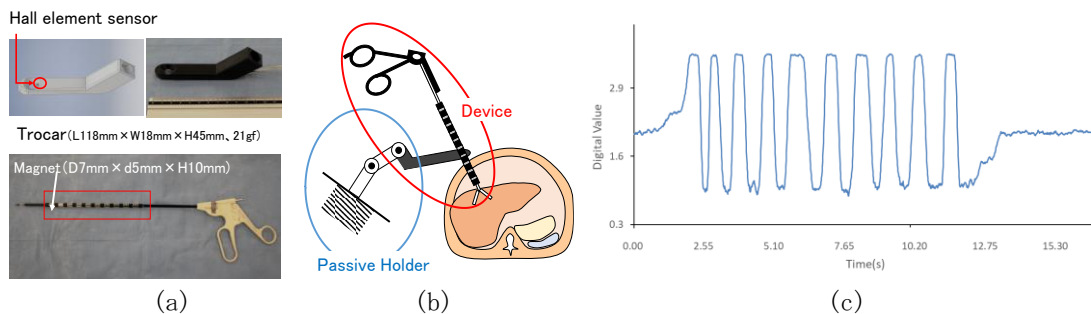


Fig.5 鉗子挿入量計測デバイス; (a) 製作したデバイス、(b) 全体図、(c) 動物実験での結果

Result		Background	
		<i>in vivo</i>	<i>ani. exp.</i>
Texture	Random	① Input: Output:	② Input: Output:
	Real	③ Input: (Cropped forceps) Output:	④ Input: Output:

Fig.6 深層学習と画像変換による腹腔鏡下手術用鉗子の位置姿勢推定

高価な外部センサを用いずに位置計測を可能とする方法として、これまでも単眼内視鏡カメラによる鉗子位置計測手法が研究されてきた。しかしながら、カメラの光軸方向、鉗子の軸回りで十分な計測精度を得ることが困難であった。この問題に対し、本研究では新たな試みとして、

ディープラーニングにより、カメラ画像から直接鉗子の位置姿勢を求める手法を検討した。手術室内にあるデバイスのみによる鉗子の位置計測・表示を目的として、深層学習を用いた単眼カメラによる、鉗子位置姿勢計測法を提案、評価を行った。ロボットにより鉗子のランダムな位置姿勢を取得し、学習を行った結果、位置誤差 3.25 mm、姿勢誤差、2.51 度、軸回りの回転角誤差 9.53 度と、他の類似研究に劣らない結果であった。その結果を Fig. 6 示す。

(3) 本研究の意義

本研究は、高価な装置や大型のロボットシステムを使わないで、術者を主役としたアシスタントシステムであることが特徴である。よって、全自動で手術の主導権を握る訳ではなく、術者により安全な動作へと誘導する。その誘導法として、術者へ力を伝える触感的な方法と画像を利用した視覚的方法を提示したことに意義があると考えている。また、その対象が一般的に市販されている鉗子にも応用が可能であり、より良い技術を広く医療社会に貢献できるのも大きな意義であると思われる。

(4) 新たな知見：機械学習の応用

当初、熟練した外科医の動作データを中心に機械学習をさせる計画であったが、そのサンプルの数が機械学習に十分ではなく、鉗子操作は熟練した外科医の動作をゴールにする方法を選択した。そこで、機械学習の対象を人間ではなく、カメラ画像から直接鉗子の位置姿勢を求める方向へと転換し、良い結果を得ることが出来た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 原 一晃、山本 賢蔵、安藤 岳洋、月原 弘之、中川 桂一、富井 直輝、赤木 友紀、竹下 修由、伊藤 雅昭、佐久間 一郎、小林 英津子	4. 巻 22
2. 論文標題 把持鉗子型牽引力・把持力計測デバイスの不偏標本較正のための半自動標本化装置	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本コンピュータ外科学会誌	6. 最初と最後の頁 102-110
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 K. Inai, D. Kim, N. Takano, M. Uno, S. Noriki, H. Naiki, E. Kobayashi
2. 発表標題 Pathological evaluation of human pancreatic tissue injuries by machine compression for computer-aided safe pancreatic compression devices
3. 学会等名 36th International Congress and Exhibition on Computer Assisted Radiology（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 巢栩嘉，富井直輝，石川宏輔，原一晃，月原弘之，佐久間一郎，小林英津子
2. 発表標題 深層学習と画像変換による腹腔鏡下手術用鉗子の位置姿勢推定
3. 学会等名 第31回日本コンピュータ外科学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuko Hatori, Etsuko Kobayashi, Daeyoung Kim
2. 発表標題 Structure of a Proper Grip-Force Guiding Forceps System using Measured Elasticity of Organs
3. 学会等名 17th Annual International Conference of Asian Conference on Computer Aided Surgery（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石川宏輔、原一晃、赤木友紀、中川桂一、佐久間一郎、富井直輝、小林英津子
2. 発表標題 in silico学習による腹腔鏡下における鉗子3次元位置姿勢推定
3. 学会等名 第29回日本コンピュータ外科学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Takai, E. Kobayashi, and D. Kim
2. 発表標題 Development of smart trocar for laparoscopic surgery - Insertion distance measurement system of forceps -
3. 学会等名 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Hatori, E. Kobayashi, and D. Kim
2. 発表標題 Development of a Device for Interference Forceps Operation using Balloons to Prevent Organ damaging,
3. 学会等名 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Kobayashi, D. Kim, X. Shan, B.N. Li, E. Kobayashi and I. Sakuma
2. 発表標題 An Elasticity-Control of Tumor Model using Agar
3. 学会等名 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Iwamoto, S. Kamei, D. Kim, K. Hara, E. Kobayashi, and I. Sakuma
2. 発表標題 Study on Forceps-mounted Measurement Device to Estimate Elasticity of Organ
3. 学会等名 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Kamei, Y. Iwamoto, D. Kim, K. Hara, E. Kobayashi and I. Sakuma
2. 発表標題 Influence of Medical Devices on Forceps-mounted Measurement System
3. 学会等名 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (国際学会)
4. 発表年 2018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	小林 英津子 (Kobayashi Etsuko) (20345268)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授 (12601)	
研究 分担者	高野 文之 (Takano Noriyuki) (30464770)	帝京平成大学・健康メディカル学部・講師 (32511)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------