

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K12087

研究課題名(和文) 腹腔鏡下手術支援ロボットによる触診システムの開発

研究課題名(英文) Development of a palpation system using the laparoscopic surgical robot

研究代表者

石井 千春 (Ishii, Chiharu)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号：80296079

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ディープニューラルネットワークを用いてトロカールが鉗子に及ぼす影響を事前に学習させ、これを相殺することにより、トロカールを装着した時にも縦方向、横方向、斜め方向に触診を行えるロボット触診システムを構築した。また、ロボット触診システムを用いて、模擬試料を触診して模擬試料中の模擬腫瘍の位置を特定する実験を、力覚のみの提示、触覚のみの提示、力覚と触覚(力触覚)の提示による3種類の方法で実施し、力触覚提示が最も効果的であり、1mm以内という精度で腫瘍位置の特定が可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果の学術的意義として、三点が挙げられる。1つ目は、ディープニューラルネットワークの学習により、トロカールが鉗子に与える負荷を抑制して触診が可能であることを示した点である。2つ目は、力覚のみの提示、触覚のみの提示、力覚と触覚(力触覚)の提示の比較において、力触覚提示が最も効果的であることを示した点である。3つ目は、開発した触診システムを用いた実験により、がん細胞を模した腫瘍の位置を1mm以内という精度で特定できることを実証した点である。これにより、開発した触診システムが、次世代の力触覚フィードバック可能な腹腔鏡下手術支援ロボットに対する技術革新を発信できるという社会的意義を持つ。

研究成果の概要(英文)：In this study, a robotic palpation system, in which palpation in not only longitudinal and lateral directions but also diagonal direction is possible, was developed. In the palpation system, the deep neural network (DNN) was trained to output the contact forces which the trocar exerts on the forceps, and by subtracting the output of the DNN from the measured value by the force sensor, the influence of the trocar on the forceps is suppressed. Palpation experiments to specify the location of the imitation tumor were carried out using the palpation system under the following 3 conditions; (a) Only force feedback was conducted, (b) Only tactile feedback was conducted, and (c) Both force and tactile feedbacks were conducted. From experimental results, it was verified that the most exact position of the tumor was specified in shortest time in the condition (c), and it was demonstrated that the identification of location of the imitation tumor within 1 mm error is possible.

研究分野：ロボティクス

キーワード：触診システム 手術支援ロボット 腹腔鏡下手術 力覚提示 触覚提示

1. 研究開始当初の背景

近年、手術支援ロボットが臨床で使用されている。しかしながら現在普及している手術支援ロボットには触覚の感知・フィードバック機能が無く、また開発過程にある触覚のフィードバックが可能な手術支援ロボットにおいても触覚フィードバックの精度は明確にされていない。がん細胞は正常な細胞よりも硬いと言われており、手動で行う腹腔鏡下手術において、外科医は鉗子の先端を臓器に押し当てて、がん細胞であるか正常な細胞であるかを判断する触診を行っている。「手術支援ロボットを用いた腹腔鏡下手術においても、がん細胞と正常な細胞を判別する触診ができないか」という外科医からの要望を受けて、本研究を実施するに至った。

2. 研究の目的

本研究では、模擬試料に対する腹腔鏡下手術支援ロボットを用いた触診実験により、がん細胞と正常な細胞を識別可能であることを明確にすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 力覚のみ、触覚のみ、力覚と触覚の提示による比較

ロボット触診システムを用いて、模擬試料を触診して模擬試料中の模擬腫瘍の位置を特定する実験を、力覚のみの提示、触覚のみの提示、力覚と触覚(力触覚)の提示による3種類の方法で実施し、比較した。

(2) トロカールが鉗子に与える影響を抑制した縦方向と横方向のロボット触診システム

上記の(1)で実施した実験においては、トロカールを使用していなかった。トロカールは、実際の医療現場で手術器具による切開孔の拡大を防ぐために使用される医療機器である。しかし、トロカールを装着すると、鉗子がトロカールに接触した際に生じる反力が、鉗子先端で対象物に接触した際の接触力に干渉してしまい、触診が困難となる。そこで、ニューラルネットワーク(NN)を用いてトロカールが鉗子に及ぼす影響を事前に学習させ、これを相殺することにより、トロカールを装着した時にも縦方向と横方向の触診を行えるロボット触診システムを構築した。構築したロボット触診システムを用いて、(1)と同様に、模擬試料を触診して模擬試料中の模擬腫瘍の位置を特定する実験を、力覚のみの提示、触覚のみの提示、力覚と触覚(力触覚)の提示による3種類の方法で実施し、比較した。

(3) トロカールが鉗子に与える影響を抑制した斜め方向の触診も可能なロボット触診システム

上記の(2)においては、触診の方向は縦方向と横方向に限定され、トロカールが鉗子に及ぼす影響を打ち消すニューラルネットワークは、縦方向と横方向それぞれ独立に学習したものであった。そこで、1つディープニューラルネットワークを用いて、縦方向と横方向だけでなく、斜め方向の触診に対してもトロカールが鉗子に及ぼす影響を抑制できるようにロボット触診システムを改良した。改良したロボット触診システムを用いて、これまでの実験で最も効果が高かった力触覚フィードバックにより、模擬試料中の模擬腫瘍の位置を特定する触診実験を行った。

4. 研究成果

(1) 力覚のみ、触覚のみ、力覚と触覚の提示による比較

本研究で開発したロボット触診システムの概要を図1に示す。リーダー・フォロワー制御により、リーダーである力覚付き入力装置 Omega.7 を用いて、フォロワーである鉗子マニピュレータを操作する。鉗子根元には6軸力覚センサが設置されていて、鉗子先端が触れた物体の接触力を検出し、Omega.7の並進方向3自由度を用いて術者に力覚をフィードバックし、また、指先に装着した触覚デバイスにより、空気圧によって指を指圧することで術者に触覚をフィードバックする。

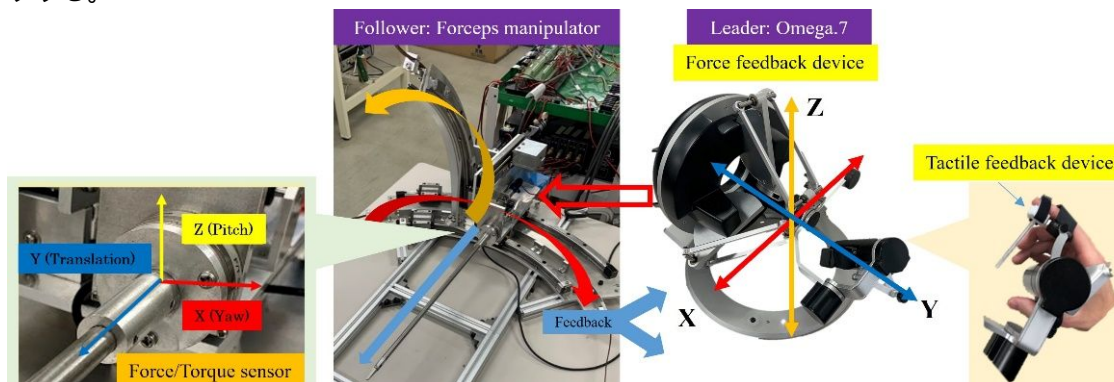


図1 ロボット触診システム

開発した触診システムにより、腫瘍の位置を正しく特定できるかを検証するため、超軟質ウレタン樹脂を用いて触診用の試料を作成した。主剤と硬化剤の混合比を変えることで硬さの異なる素材を作成でき、外径 50mm、厚さ 13mm、混合比 3:1 の円筒状試料の中に、図 2 に示す位置に、外径 10mm、混合比 1:1 の球状の模擬腫瘍を埋め込んだ 4 種類の試料を作成した。なお、本試料の表面を触診した際に、がん細胞を触診した際と同程度の硬さが得られることを外科医に確認いただいている。



図 2 触診用試料

3 名の被験者が Omega.7 を使用して、力覚のみの提示、触覚のみの提示、力覚と触覚（力触覚）の提示による 3 種類の方法で触診を実施し、模擬腫瘍の位置を特定する実験を行った。模擬腫瘍の実際の位置との誤差と、位置を特定するまでの操作時間を表 1 に示す。結果より、操作時間を考慮すると、力触覚フィードバックが最も効果的であると言える。

表 1 触診実験結果（トロカール無）

Condition	Average absolute distance deviation [mm]	Average operation time [s]
	1.04	92.8
	0.89	161.7
	0.97	91.9

(2) トロカールが鉗子に与える影響を抑制した縦方向と横方向のロボット触診システム

図 3 に示す、縦方向と横方向の触診それぞれにおいて、ニューラルネットワーク (NN) にトロカールが鉗子に与える負荷を事前に学習させ、力覚センサによる測定値から減算することにより、トロカールの影響を取り除いた。

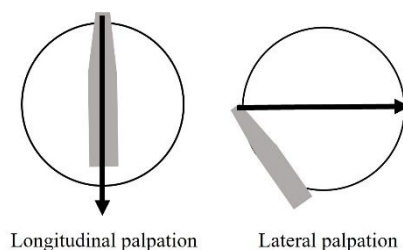


図 3 触診方向

自動操縦により鉗子マニピュレータを駆動させて、試料 1 の表面を触診した際の鉗子先端の接触力を図 4 に示す。図 4 の結果から、NN によりトロカールが鉗子に与える影響を抑制できていることが分かる。

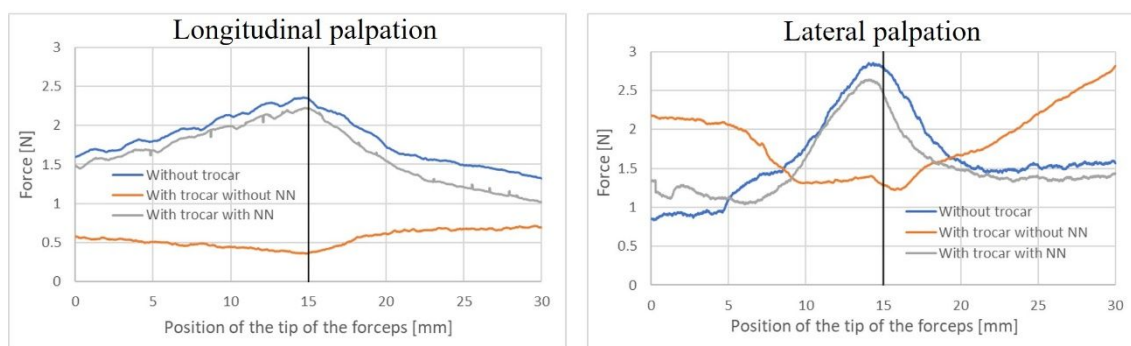


図 4 トロカールの影響の抑制

4 名の被験者に対して、(1)と同様に Omega.7 を使用して、力覚のみの提示、触覚のみの提示、力覚と触覚（力触覚）の提示による 3 種類の方法で、縦方向と横方向それぞれの触診を実施し、模擬腫瘍の位置を特定する実験を行った。模擬腫瘍の実際の位置との誤差と、位置を特定するまでの操作時間を表 2 に示す。表 2 より、縦方向と横方向ともに、1 mm 以内の誤差で

模擬腫瘍の位置を特定可能であることが検証できた。また、位置の精度と操作時間から、 の力触覚フィードバックが最も効果的である。

表 2 縦方向と横方向の触診実験結果 (トロカール有)

Condition	Longitudinal palpation		Lateral palpation	
	Average absolute distance deviation [mm]	Average operation time [s]	Average absolute distance deviation [mm]	Average operation time [s]
	0.64	71.0	0.81	70.2
	0.78	81.1	0.58	84.8
	0.34	62.0	0.58	55.0

(3) トロカールが鉗子に与える影響を抑制した斜め方向の触診も可能なロボット触診システム
 トロカールの影響を抑制する方法として、(2)と同様に NN による相殺方法を採用した。ただし、縦方向と横方向の触診の他に、斜め方向の触診にも対応できるようにするため、学習データ量が膨大になるので、ディープニューラルネットワーク (DNN) を採用した。DNN の学習には深層学習ライブラリである Keras を用い、階層型の DNN を構築した。

学習データは、縦方向、横方向、および触診角度 30° 、 60° 、 120° 、 150° における斜め方向の触診の情報とした。DNN への入力、鉗子の角度と鉗子先端の並進距離、および触診角度により割り振った、-1 から 7 までの数値とした。また、実際に鉗子マニピュレータを操作した時に力覚センサにより測定された、トロカールにより鉗子にかかる X, Y, Z 方向の負荷の値を教師データとした。

さらに、データ数が膨大であるため、教師データにおけるトロカールにより鉗子にかかる負荷の値の測定量を軽減するために、負荷の推定値を用いることにしたが、鉗子とトロカールとの摩擦により、Translation 方向の推定誤差が大きくなってしまった。そこで、Translation 方向の負荷の値 F_y を鉗子先端の接触力の算出から除くことにした。 F_y を除いて算出した接触力においても、接触力のピーク位置は試料 1 の中心付近で確認できたため、 F_x, F_z のみにより算出した接触力でも、腫瘍位置の特定が可能であることが確認できた。

構築した DNN を用いて、自動操縦による触診により、トロカールからの負荷をどの程度抑制できているか検証した。実験条件として、鉗子先端の移動速度は 5 mm/s 、押し込み量は 5 mm とした。試料 1 に対して、図 5 に示す 9 種類の軌跡により触診を行った。

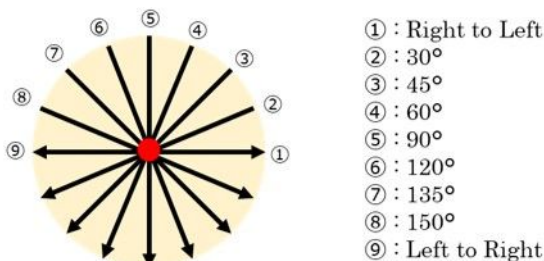


図 5 触診方向

触診角度 30° 、 45° 、 60° の時の鉗子先端の接触力を図 6 に示す。図 6 より、トロカールを設置して DNN を作用させた場合の接触力が、トロカールを設置しない場合の接触力に近づいており、トロカールによる鉗子への影響が抑制されていることが確認できた。しかし、学習データに使用していない触診角度 45° においては、ノイズが発生しているため、腫瘍位置の特定は困難であると考えられる。触診角度 120° 、 135° 、 150° に対しても同様な結果が得られた。

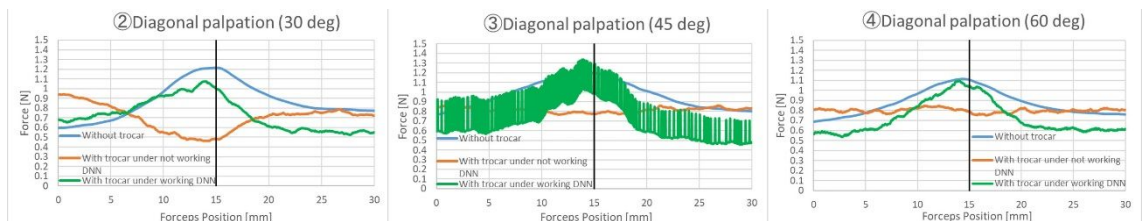


図 6 トロカールの影響の抑制

触診角度 45° と 135° においてノイズが発生した原因は、学習データに使用した斜め方向の触診における触診角度を 30° 刻みとしたため、本 DNN の汎化能力が十分でなかったためであると考えられる。触診角度の刻み幅をより細かくして、DNN による抑制の精度を向上することが今後の課題である。

Omega.7 の操作による触診により、模擬腫瘍をどの程度の精度で特定できるかを検証するため、超軟質ウレタン樹脂を用いて、外径 80mm、厚さ 13mm、混合比 3:1 の円筒状試料の中に、図 7 に示す位置に、外径 10mm、混合比 1:1 の球状の模擬腫瘍を埋め込んだ 4 種類の試料を新たに作成した。

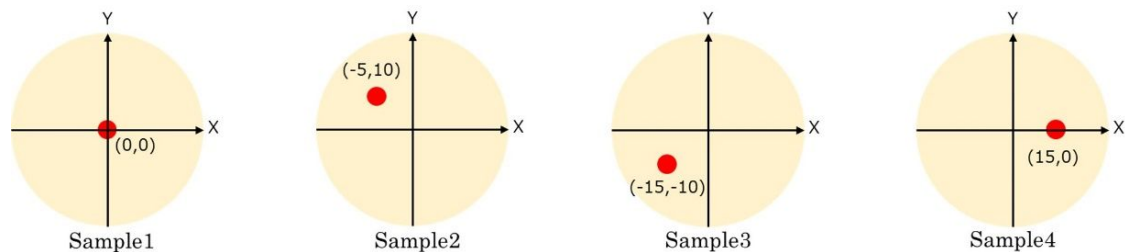


図 7 触診用試料

被験者 8 名に対して、Omega.7 を用いて鉗子マニピュレータを操作して触診を行い、腫瘍位置を特定する実験を行った。触診方法は、以下に記すように初期の触診動作を規制した。被験者は、図 8 に示す A, B, C, D のいずれかの初期位置から触診を始める。

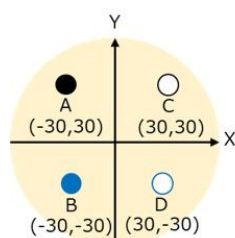


図 8 触診における初期位置

- (a) A から始める場合、縦方向（上から下）の触診を 10mm 間隔で X 軸の正の方向に鉗子の軌跡を平行移動させて初期の触診を行う。
- (b) B から始める場合、横方向（右から左）の触診を 10mm 間隔で Y 軸の正の方向に鉗子の軌跡を平行移動させて初期の触診を行う。
- (c) C から始める場合、縦方向（上から下）の触診を 10mm 間隔で X 軸の負の方向に鉗子の軌跡を平行移動させて初期の触診を行う。
- (d) D から始める場合、横方向（左から右）の触診を 10mm 間隔で Y 軸の正の方向に鉗子の軌跡を平行移動させて初期の触診を行う。

(a)から(d)のいずれにおいても、腫瘍を発見した時点で被験者が任意の方向の触診を行い、腫瘍位置を特定する。各初期位置に対して、被験者 2 人ずつ触診を行った。

被験者へのフィードバックは、Omega.7 による力覚フィードバックと触覚デバイスによる触覚フィードバックを同時に行う、力触覚フィードバックを用いた。表 3 に、8 人の被験者による 4 つの試料に対する X 座標と Y 座標における特定した腫瘍位置の平均絶対誤差、およびこれらから算出した位置誤差を、表 4 に平均操作時間を示す。

表 3 腫瘍位置の特定誤差

Sample No.	1		2		3		4	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Average error [mm]	0.39	0.46	0.55	0.43	0.28	0.54	0.49	0.49
	0.60		0.70		0.61		0.69	

表 4 平均操作時間

Sample No.	1	2	3	4
Average time [s]	196.1	237.6	203.5	203.5

表 3 より、全ての試料に対して腫瘍位置の特定誤差は 0.7mm 以内となっており、1 mm 以内という精度で腫瘍位置の特定が可能であることが確認できた。これより、DNN の作用によって、トロカールにより鉗子にかかる負荷を抑制し、トロカール装着状態でも触診を行うことができるロボット触診システムを構築することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 石井千春, 小山哲也	4. 巻 Vol.39, No.7
2. 論文標題 力触覚フィードバックを用いた手術用ロボットの触診システム	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 月刊機能材料	6. 最初と最後の頁 p.44-51
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 無
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 -
1. 著者名 Chiharu Ishii and Hideki Kawamura	4. 巻 Vol.9, No.1
2. 論文標題 Verification of Validity of Assessment Items in Training System for Laparoscopic Surgery	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Pharma Medicine and Biological Sciences	6. 最初と最後の頁 p.6-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18178/ijpmb.9.1.6-13	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 -
1. 著者名 Chiharu Ishii and Kanta Hirasawa	4. 巻 Vol.3, No.e25
2. 論文標題 The effect of a movable headrest in shoulder assist device for overhead work	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Wearable Technologies, Cambridge University Press	6. 最初と最後の頁 p.1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/wtc.2022.22	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 -
1. 著者名 Taiga Kitano, Mina Asari and Chiharu Ishii	4. 巻 Vol.1
2. 論文標題 Development of a Robotic Palpation System and Evaluation of the Burden to an Operator in the Palpation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (IEEE ICMA 2022)	6. 最初と最後の頁 p.532-537
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICMA54519.2022.9855969	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28件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 北野太雅, 石井千春
2. 発表標題 トロカールの影響を抑制したロボット触診システムの開発
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2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北野太雅, 石井千春
2. 発表標題 腔鏡下手術支援ロボットによる触診システムの開発 腫瘍位置の特定における触診方向による比較
3. 学会等名 第30回日本コンピュータ外科学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石井千春, 吉玄
2. 発表標題 腹腔鏡下手術用ロボットによる触診システムを用いた腫瘍の位置の判定
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2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Chiharu Ishii
2. 発表標題 Development of Medical and Assistive Devices in Aging Society
3. 学会等名 2019 3rd International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石井千春, 小山哲也
2. 発表標題 手術用ロボットによる触診システムにおける力触覚フィードバック
3. 学会等名 日本機械学会 2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石井千春, 川村秀樹
2. 発表標題 鉗子操作力の提示による結紮トレーニングの効果について
3. 学会等名 第28回 日本コンピュータ外科学会大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

医療・福祉ロボティクス研究室 http://mwrlab.ws.hosei.ac.jp/

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

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
---------	---------