



腹腔鏡手術の追体験トレーニングシステムのための鉗子位置再現性における遭遇型力触覚の効果

森島 暉悦¹⁾, 寺島 章宥¹⁾, 小瀨 和貴²⁾, 坂井 義治²⁾, 前田 太郎¹⁾, 安藤 英由樹¹⁾

- 1) 大阪大学 情報科学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-1, akinobu-morishima@hiel.ist.osaka-u.ac.jp)
 2) 京都大学医学部附属病院 (〒606-8507 京都府京都市左京区聖護院川原町 54)

概要: 我々は熟練者の実手術映像に学習者の鉗子を重畳することでスキルを効率的に学習する追体験型の腹腔鏡手術トレーニング装置を開発してきた。しかし、このシステムではモニタ上におけるモニタ面方向の追従性に比べ、モニタの奥方向の追従性の精度が低いという課題があることがわかった。そこで奥方向を把握する手がかりとして鉗子の触れる内臓壁を遭遇型力覚提示装置で再現し、力触覚フィードバックを学習者に与えることで鉗子位置の再現性の改善を試みる。

キーワード: 腹腔鏡手術 手術トレーニングシステム 遭遇型力触覚

1. はじめに

腹腔鏡下手術は、腹腔内にカメラと鉗子等を挿入して行う外科手術である。開腹手術に比べ低侵襲であるため患者への負担が少なく、多くの医療機関に採用され普及が進んでいる[5]。しかし鉗子の挿入孔が“てこ”の支点のように働くため独特な操作が必要であり、またモニタを通じて腹腔内を見ながら手術を行うため、方向・スケールの変換(hand-eye coordination)への適応といった特有の技能が求められることから手術難度が高い。そのため医学生への訓練には熟練医が側に付き指導することが望まれているが、腹腔鏡下手術の指導力を持った熟練医が十分に存在していないのが現状である。また、腹腔鏡手術を執り行う手法については、ロボット支援手術による手法もあるが、現状では腹腔鏡手術よりも有意に優れた手法であるとは言えず[6]、今後も多くの医療機関で主要な手術手法として採用されると考えられる。

熟練医不足の問題解決にむけ、我々は視野共有手法を用いた腹腔鏡手術トレーニングシステム(以下“追いトレ”)を既に提案している[1]。このシステムは学習者が見ているモニタ上に自身の鉗子と熟練医の鉗子を重畳して表示し、学習者が熟練医の鉗子を追従することでトレーニングを行う。独学で鉗子の動かし方を学ばなければならない従来のボックストレーナに対して、熟練医と同じ視野を共有して鉗子を重畳させるだけで正しい鉗子操作を学習できる。対象としているタスクは腹腔鏡下手術に関する技能で最も基礎的な結紮・縫合であり、追いトレを用いた訓練生は独習で訓練した医師に比べ、エラー数が有意に減少した。また約7時間独習した医師と1時間追いトレを使用した訓

練生とが同程度のタスク完了時間となった[1]。

また我々は、熟練医の実際の手術映像を追従することでトレーニングを行うシステム(以下“追いトレアドバンス”)を提案している。従来の追いトレでは腹腔鏡下の結紮・縫合についてのみの学習であったが、追いトレアドバンスにおいては手術そのものを追従することで手術に必要なスキルを包括的に獲得することが期待できる。追いトレアドバンスは鉗子とカメラの挿入孔が再現され、学習者はモニタに映る熟練者の鉗子を追従することで学習を行う[8]。しかしながら、2Dの内視鏡によるトレーニングでは奥行情報の取得が困難なため、スキル学習に時間がかかることが示されている[2]。腹腔鏡手術中に起こる執刀医のミスの多くが過度な力による体組織への接触が原因のため[7]、内臓の立体的配置を正確に把握することは特に重要である。

そこで本研究では追いトレアドバンスに遭遇型力触覚提示装置を付け加えることで、鉗子の先で内臓壁の正確な位置を知覚させることで損なわれている奥行情報を補うシステムを提案し、これによる学習効果について評価を行う。

2. 提案システム

2.1 追いトレアドバンス

追いトレアドバンスは、学習者が操作する鉗子をロボットの先に取り付けられたカメラが撮影し、その映像をモニタに再生している手術の録画映像と重畳させ、学習者は熟練医の鉗子を追いかけることでトレーニングを行う。この際、学習者の鉗子を映すカメラの位置は、手本映像で内視鏡カメラ操作者(スコピストと呼ばれる)が撮像した各時

刻と同じ位置・姿勢に移動し続けるため、学習者の鉗子は常に熟練医の行った手術と同一の位置から腹腔内に挿入されているかのように画面内に重畳することができる。これにより、学習者は熟練医の鉗子の動きを常に追いつけることができ、なめらかな動きなどのスキルを習得することができる[8]。

スコピストの動きを再現するために Novint 社の Falcon を用いている。これは位置 3 次元の自由度を持つロボットである。ただし、Falcon は腹腔鏡カメラの先端位置は再現できるが光軸まわりの回転を再現できないため、教材では撮影した学習者の鉗子映像を適切な角度になるように描画プログラム内で回転させたのち重畳させた。

2.2 遭遇型力触覚装置による内臓位置の再現

追いトレアドバンスは熟練医の手術映像に学習者の鉗子を重ね合わせて追従することで手術を追体験するかたちで学習を進めることが可能であるが、手術映像が二次元であるため奥行き情報は画像上の鉗子の大きさでのみ判断することから正しく追従する精度が欠落していた。また、触覚に関するフィードバックを得ることができなかった為、手本映像内で熟練医が電子メスで直接内臓に触れることで得られていた触覚情報の追体験、ひいてはそこから推測される奥行き情報の獲得は困難であった。そこで、本研究で提案するシステムは Falcon を限定的な遭遇型力触覚提示装置として使い、内臓の位置の再現を試みた。本来の遭遇型触覚提示装置は、ユーザの位置を計測し、ユーザがバーチャル環境内で物体に触れる前にデバイスを目標とする位置・姿勢で待機させておくものである[10]。そして、接触中のユーザの動きに合わせてデバイスが移動することで、様々な形状を表現できる。腹腔鏡手術における鉗子の内臓壁との遭遇を表現する場合、接触点は軟体である必要があるが、軟体との接触中に装置が移動すると、想定していない牽引力がユーザに与えられてしまう。このため、鉗子との接触中は装置が静止することが望ましい。

本研究の目的は、追いトレアドバンスにおける画面奥行方向への追従を改善させることである。よって、鉗子の画面奥行方向への移動に関して内臓壁との遭遇を実現すれば本装置への要求は達成されると考える。そこで、鉗子に触覚を提示する場面を Probing と呼ばれる操作に限定した。Probing とは、鉗子を内臓壁に押しつけて内臓壁の状態を把握する操作であり、腹腔鏡手術において重要な操作であるとされている[9]。また本研究で用いる教材に含まれる Probing は画面奥行方向への作業である。

追いトレアドバンスにおいて画面平面方向への追従は奥行方向に比べて容易であり、Probing のシーンに限れば内臓壁全体のうち練習者の鉗子先端が通過する部分はある半径の円内におさまることが予備実験から予想できた。また今回使用した Falcon は姿勢の自由度が無く、一定の姿勢でしか動作できない。以上の条件から、実験に使用する教材映像は、Probing 以外の操作をほとんど行っておらず内臓壁の姿勢が変わらないものを採用した。

本装置では、内臓壁と接触する鉗子の位置の計測を行わず、11 回ある Probing 操作の時刻にそれぞれの内臓壁の位置で待機するように制御しているが、以上に述べた条件下であれば、ユーザの体験としては実質的に文献[10]の遭遇型力触覚提示装置と等価であると考えられる。以下では、遭遇型力触覚提示装置とはこの条件で動作させた本実験の装置を指す。

本システムでは追いトレアドバンス同様、練習者の操作する鉗子をカメラ(Logicool HD Pro Webcam C920r)が撮像し、手本となる映像に重畳しているが、当然ながら鉗子に触れる内臓を再現した遭遇型力触覚提示装置もカメラの画角内に入ってしまう。練習者が適切に練習を行うためには①再現した内臓壁を練習者がモニタ上で視認できない、②練習者は自らが操作する鉗子を明瞭に視認できる、の 2 点を満たす必要がある。これを実現するため、カメラの画角内に入る内臓壁表現部分を黒色のつや消しラッカースプレーで塗装し、鉗子先端に反射材を塗布し、カメラの撮像の設定において明るさ、コントラスト、ホワイトバランス等の調整を行った。これにより、モニタにはカメラが撮像した映像信号が画像合成ソフトによる加工無しで重畳され、練習者は映像の遅延を最小限に抑えた環境で鉗子のみを視認可能である。また本研究で用いたシステムを図 1 に示す。

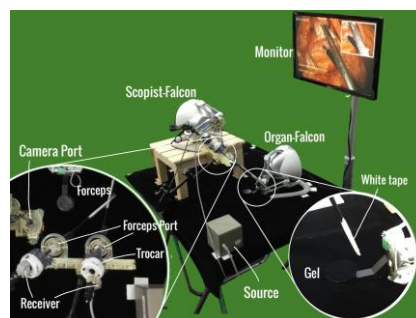


図 1 システム概要図

3. 実験

従来の追いトレでは縫合・結紮を行う際に、手本となる熟練医による術技映像を、ある区切られた手順ごとに追従することで高い学習効果を得た。追いトレは手術術技の分節ごとに追従を行っていたが、追いトレアドバンスにおいては、実際のヒト S 状結腸切除術の手術映像から重要な作業ごとに区切り、それぞれの作業において一連の分節を連続して追従する。本実験では手術映像の中でも「S 状結腸間膜の内側アプローチ、性腺動静脈の確認」の作業を教材として採用した。本シーンでは Probing 作業が多く含まれており(約 1 分間で 11 回)、Probing はモニタ奥行方向への作業となっている。また Probing は鉗子操作の中でも重要な操作であるとされている。追いトレアドバンスにおいて、練習者はモニタ奥行方向が重畳された鉗子の大きさでしか判断できないため、遭遇型力触覚提示装置を取り付けることで、奥行情報が視覚だけでなく触覚によっても得られ

ることが期待できる。

3.1 実験条件

実験では追いトレアドバンスにおいて遭遇型力触覚装置の使用、不使用の条件で比較を行う。実験前に実験参加者に対して実験者がシステムの説明と鉗子操作についてレクチャを行った後、実験者が1度だけ実演を行った。遭遇型力触覚提示装置の有無に関わらず、各試行では、まず教材動画の最初のフレームの静止画像がモニタに表示され、被験者は画面右上に表示された重量の教示にできるだけ近づくように重畳し、重量できたと判断したら実験者に申告するよう求められ、その申告の後に動画が再生された。これは、動画の開始時に被験者が自らの鉗子を見失うことを避けるためである。トレーニング中の手本となる鉗子と自らの鉗子の重畳の方略として鉗子先端の大きさが画面内で揃うように指示した。

両条件とも16回試行し、各試行の間には1分間の休憩を設けた。その際、鉗子から手を離すように指示し、hand-eye coordination を実験外で学習できないようにした。実験参加者は医学に関する専門知識を持たず、腹腔鏡に関する前知識も持たない工学系の20代の男性で各条件について3名、計6名である。

3.2 評価基準

実験では、各被験者が右手で操作する鉗子の先端の座標を計測する。右手鉗子の先端位置について、手本となる位置からの誤差をRMSEとして算出し、内臓位置提示装置の有無で比較する。ここで、手本となる位置とは、筆者らが実験に使用した動画について1秒ごとの静止画を用意して、各時刻について鉗子を重ね合わせて測定した右鉗子先端の位置である。また、今回の実験では、遭遇型の触覚提示装置によって正しい奥行き情報を学習できているかどうかを検証するため、Probingしている時刻についての位置を特に検証する。

3.3 実験結果

まず、1分間の動画の各時刻の画面上下左右及び奥行き方向の3方向について位置エラー量を図2, 3に示す。これは横軸が試行回数、縦軸がエラー量である。以降の議論では、モニタ左右方向がX軸、上下方向がY軸、奥行き方向がZ軸である。

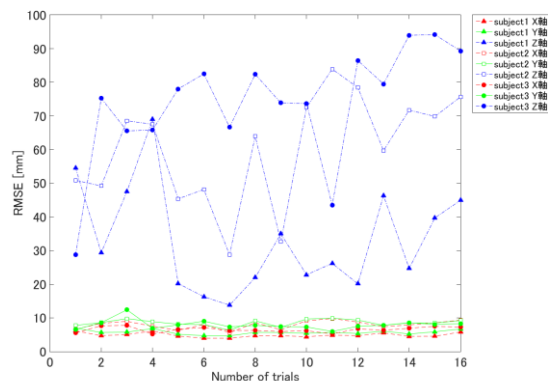


図2 遭遇型力触覚提示を行わないグループの誤差量

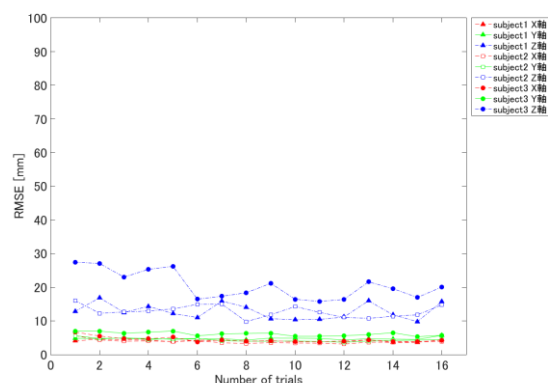
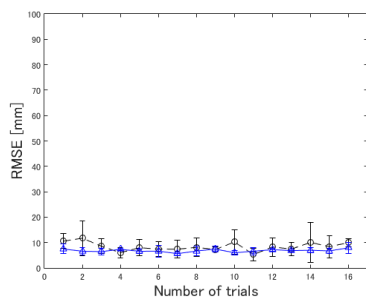
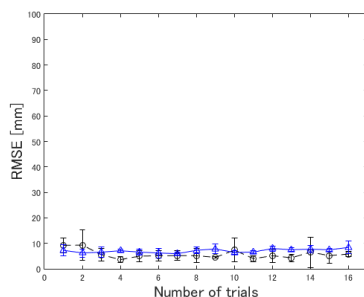


図3 遭遇型力触覚提示を行うグループの誤差量

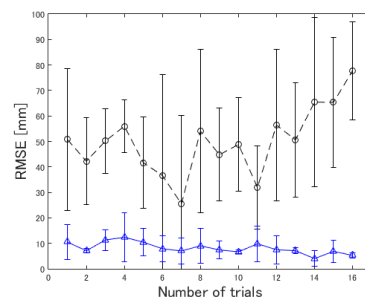
X, Y軸に関して触覚の有無の両手法とも誤差量が小さいことから追従できていると言える。一方でZ軸に関して、触覚が無いグループは触覚があるグループに比べ、誤差量が大きい。これは追いトレアドバンスにおいてモニタ奥行き方向の学習がモニタ平面方向に比べ困難であることを示し、触覚によってモニタ奥行き情報が補われたことを示す。次に、11箇所あるProbing箇所のうち1箇所(2番め)について、各軸方向の位置エラー量を追いトレアドバンスと提案システムの群間で比較したグラフを図4に示す。図2, 3については全ての時刻に対する誤差量を確認したが、習熟を目的とする技術のシーンに関しての誤差を求めた。鉗子が内臓壁に触れる瞬間から±0.5秒間、触れた瞬間の位置からの誤差量とばらつきを求めた。



(a) X軸の誤差量



(b) Y軸の誤差量



(c) Z軸の誤差量

図4 Probing時刻に関する各軸の誤差量

図 4(a)-(c)はいずれも横軸が試行回数、縦軸が誤差量である。エラーバーは標準偏差を示す。図 4(a)-(c)から X, Y 軸方向に関して触覚の有無に依らず誤差量とばらつきは少ないが、Z 軸方向に関して触覚がない場合に誤差量・ばらつき共に触覚がある場合に比べて大きいことがわかる。

4. 考察

図 2, 3 から、遭遇型力触覚提示装置の有無の両条件ともに画面の縦・横方向について追従性がトレーニングの序盤の時点で学習が進んでいることがわかる。これは追いつトレアドバンスを通じてモニタの水平・垂直方向について hand-eye coordination の学習が早期に定着したことを意味しており、それは遭遇型デバイスを付与することによって妨げられることが無かったことを示している。

また、画面奥行方向については、遭遇型力触覚提示装置の有無の条件間で大きな差が現れた。すなわち、遭遇型力触覚が無い群は奥行方向についてエラー量が大きく、その位置が収束する傾向に乏しいのに対して、遭遇型力触覚提示装置が有る群はエラー量が小さく、かつ位置も収束する傾向が見いだせる。つまり、仮想的な内臓の位置が触覚によって提示されることにより、学習者が正しい奥行き情報を獲得できていると考えられる。

次に、正しい奥行き情報を学習することが求められる鉗子の押し込み(Probing)の際の位置を正しく学習できているかを比較する。実験に用いた動画の最中に現れる 11 回の Probing のシーンのうち 2 回目について、Probing が始まる時刻から終わる時刻までの鉗子先端の位置のエラー量を各軸方向について図 4(a)-(c)に示した。図の黒線が遭遇型デバイス有り、青線が遭遇型デバイス無しの群である。図 4(a), (b)はそれぞれ画面垂直及び水平方向についてのエラー量であり、両群ともに似通った位置で Probing を追えていることがわかる。図 4(c)は画面奥行方向についてプロットしたものであるが、遭遇型デバイス無しの群はエラー量の被験者間でのばらつきが遭遇型デバイスを用いた群よりも大きいことがわかる。これは、鉗子を画面の奥へ押し込む動作を追いかけるとき、触覚の有無によって鉗子が触れる内臓位置を把握する難易度が大きく異なることを表しており、触覚によるフィードバックが無ければ、被験者間で異なる位置で学習が進んでしまうことを示している。すなわち、画面上で鉗子の先端を重畳するだけでは、正確な奥行き情報を得ることが難しいと言える。

5. まとめ

本研究では、視野共有手法を用いた追従型腹腔鏡手術トレーニングシステムである追いつトレアドバンスが画面奥行方向の情報を得にくいことを改善するため、遭遇型力触覚提示装置を用いて内臓の位置を再現したシステムを構築した。構築したシステムにおいて、鉗子の追従の際、画面奥行方向の再現性について被験者の誤差量と被験者間でのばらつきが減少したことが確認された。このことから、

奥行方向についてより正しい位置で学習できることがわかった。これは 2D モニタで欠落していた奥行情報が保管されたことを意味しており、内臓の 3 次元的な位置関係を正しく把握できるため練習者の手術エラーの減少が期待される。

謝辞 本研究は国立研究開発法人日本医療研究開発機構の補助を受けて遂行された。

参考文献

- [1] 近藤 大祐, 飯塚 博幸, 安藤 英由樹, 小濱 和貴, 坂井 義治, 前田 太郎, "腹腔鏡下手術トレーニングにおける視野共有手法による学習効果とその実証", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol. 18, No. 4, pp.487-496, 2013.
- [2] 常明, 青山一真, 古川正紘, 小濱和貴, 坂井義治, 前田太郎, 安藤英由樹: 腹腔鏡手術のボックストレーニングにおける立体情報提示が針の刺入スキルの学習に与える影響, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 20, No.4, pp.299-309, 2015.
- [3] 塚本潔, 松原長秀, 野田雅史, 山野智基, 小林政義, 馬場谷章仁, 濱中美千子, 木村慶, 富田尚裕, 杉原健一, "日本における大腸癌に対する腹腔鏡手術適応の現状—第 85 回大腸癌研究会アンケート調査より—," 日本大腸肛門病会誌, 第巻 70, pp. 205-213, 2017.
- [4] D. Jayne, "Robotic-Assisted vs Conventional Laparoscopic Surgery for Rectal Cancer," Journal of the American Medical Association, Vol.318, No.16, pp. 1569-1580, 2017
- [5] A. J. S. , . K. L. , . B. J. C. , . P. Deborah S. Keller, "Comparative effectiveness of laparoscopic versus robot-assisted colorectal resection," Surg Endosc, 第 巻 28, pp. 212-221, 2014.
- [6] Tang B, Hanna GB, Cuschieri A. Analysis of errors enacted by surgical trainees during skills training courses. *Surgery*. 2005;138:14-20.
- [7] Tang B, Hanna GB, Cuschieri A. Analysis of errors enacted by surgical trainees during skills training courses. *Surgery*. 2005;138:14-20.
- [8] A Novel Training System of Laparoscopic Surgery Using "Virtual Experience" of Real Surgery by "Superimposed View Method", Kazutaka Obama, Hideyuki Ando, Kenji Kawada, Mami Yoshitomi, Koya Hida, Taro Maeda, Yoshiharu Sakai, 25th Congress of European Association of Endoscopic Surgery, 2017
- [9] Richards C, Rosen J, Hannaford B, Pellegrini C, Sinanan M. Skills evaluation in minimally invasive surgery using force/torque signatures. *Surg Endosc*. 2000;14:791-798.
- [10] 星野 洋, 舘 暲, 遭遇型形状提示システムにおける任意曲面の形状提示に関する一考察, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 1999, 4 巻, 2 号, p. 445-454