

[研究助成 (A)]

AI 自動評価技術を用いた内視鏡手術技術の定量化と
次世代教育システムの開発

2241022

研究代表者
(助成金受領者)

九州大学 大学病院 小児外科

助教 福田 篤 久

[研究の目的]

狭小空間での正確な操作が求められる内視鏡手術は切開手術に比べより多くの経験を必要とする。一方で、内視鏡手術では開腹手術と比較して、外科医の感覚情報が限られていることから実際の指導では「見て学ぶ」、「慣れて学ぶ」といった主観的かつ経験的指導が主体となっている。この状況を打開すべく、限られた手術数であったとしても、その経験を共有し、技術向上に効率よく繋げるツールの開発が必要であると考え我々は様々な手術シミュレータを開発してきた。更にはシミュレータ訓練による学習効果を立証し得た。本研究では我々が取り組んできた内視鏡手術教育システムをさらに発展させ、これまで主観的かつ経験的に語られていた手術技術、感覚情報を「可視化」かつ「定量化」することで「いつでも」、「どこでも」熟練医による技術指導を再現可能な内視鏡手術シミュレータ開発を目的とした。

具体的には、これまでに開発を進めてきた内視鏡シミュレータにおいて「AIを用いた内視鏡技術自動評価システム」および「アイトラッキングシステム」の実装実験を行った。

[研究の内容、成果]

本研究では、トレーニングキットに鉗子の動きを計測する機能を実装する方法およびアイト

ラッキングシステムを実装する方法について検証を行った。

① AIを用いた鉗子軌道追跡手法

本研究では、トレーニングキットを上部から撮影した動画から鉗子の動きを計測した。

動画からの鉗子の認識と位置計測には、DeepLabCut (DLC) と呼ばれる AI (深層学習) を用いた姿勢推定手法を使用した。DLC は、マウスや猿など動物各パーツ (例えば指や尻尾など) がどのように移動しているか定量的に計測するために用いられており、特に生物の行動解析や医療領域の研究に幅広く活用されている。DLC は AI による追跡手法であり、学習データセットを必要とする。学習データセットの作成にはラベル付けが必要となる。ラベル付けとは、AI に追跡対象を学ばせるために必要となる手続きであり、動画から複数のフレーム (画像) を抽出し、抽出したフレームに映る対象物の特定の部分を選択することを指す。ラベル付けされたそれぞれの点は keypoint と呼ばれる。

検証

図 1 中の tip1-tip7, stick1-4 に示す keypoint を 300 フレーム分ラベル付けした。図 2 は、DLC が検出した鉗子上の各パーツを丸印 (●), 人によるラベル付けを十字印 (+) で示したものである。動画全体のフレームのうち、学習に使用

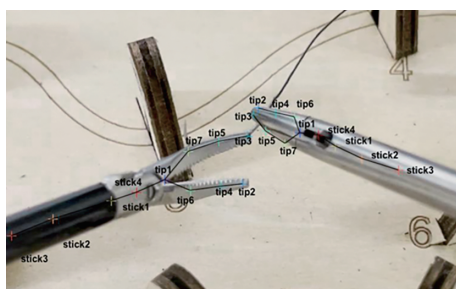


図1 ラベル付けされた鉗子の keypoints

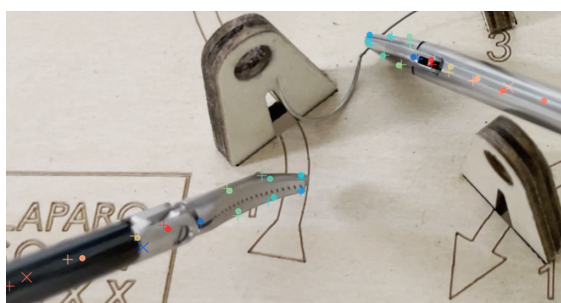


図2 ラベル付けした keypoints と検出された keypoints の比較

されていないフレーム 5% をランダムにピックアップして丸印（検出結果）と十字印（正解データ）の位置の比べた結果、ピクセル距離の差分の平均値は 9.2 ピクセルであった。

なお、図 2 中のクロス印（×）は誤検知であると判断され追跡から取り除かれた点を示す。クロス印も DLC がパーツとして検知した点ではあるが、confidence score と呼ばれる検知の信頼性を示す値が低いため、誤検知であると判断された点を示している。

②アイトラッキングシステム実装検証

本研究では食道閉鎖症モデルを訓練ボックスに設置し、シミュレーション中の眼球運動を測定するため、トレーニングボックス正面に配置したモニター下段にアイトラッキングシステム（Tobii Pro フュージョン[®]）を設置し測定を行った。併せて試技中の牽引パラメータを調べるため、上部食道モデルと下部食道モデルにレーザー距離センサーを装着し距離牽引データと眼球追跡データを記録した。

被験者は、上部食道と下部食道の前壁間の

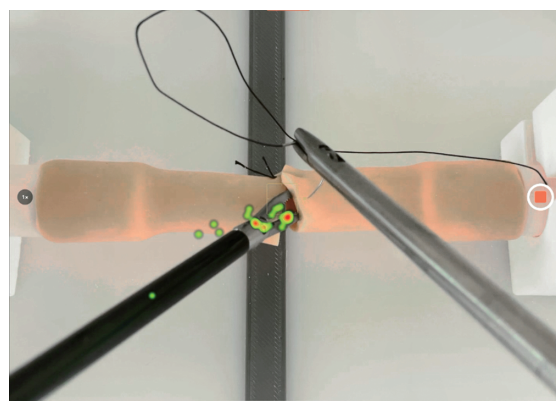


図3 作業中の視線データ

	Total (n=20)	Expert (n=12)	Trainee (n=9)	P value
Task time (sec)	568.04 [312.4 – 1081.55]	558.25 [312.4 – 1023.8]	582.5 [415.51 – 1081.55]	0.381
Traction for upper esophagus (mm)	8.15 [5.03 – 10.68]	7.98 [5.03 – 10.4]	8.64 [5.81 – 10.68]	0.161
Traction for lower esophagus (mm)	7.35 [5.51 – 15.91]	6.77 [5.51 – 8.8]	10.3 [5.74 – 15.91]	0.016
Left eye openness (mm)	10.1 [6.4 – 12.2]	9.9 [6.4 – 12.2]	10.3 [9.0 – 11.7]	0.349
Right eye openness (mm)	10.0 [6.9 – 11.3]	9.8 [6.9 – 11.1]	10.4 [9.5 – 11.3]	0.052

表1 食道吻合モデルにおける距離牽引データと眼球追跡データ

3箇所を体内縫合により吻合した。

経験レベルの異なる 20 名の被験者が本課題を実施した。牽引測定において、各被験者の牽引量の中央値は、上部食道で 7.4 ± 1.3 mm、下部食道で 8.2 ± 1.4 mm であった。

各参加者の最大牽引力は、上部食道で 21.4 ± 4.0 mm、下部食道で 23.0 ± 4.5 mm であった。視線追跡測定では、開眼度の中央値は右眼で 10.0 ± 1.26 mm、左眼で 10.2 ± 1.29 mm であり最大開眼度は右眼で 15.2 ± 2.47 mm、左眼で 16.1 ± 2.01 mm であった。

リミテーション

AI を用いた鉗子軌道検出において鉗子の検出が不安定になる要因として、大きく分けて 3 つの種類の要因が確認された。

1. Keypoint が観測不可になるケース

トレーニングキット上のオブジェクト等の遮蔽により keypoint が確認できない、鉗子の回転により keypoint が確認できない、高速移動時

の激しいブレにより keypoint が確認できないなどの要因により検出が不安定になることが確認された。

2. Keypoint の見た目上の特徴が少ないケース

図 1 中の tip1, 2, 3, stick1, 4 は比較的安定した追跡が可能であることが確認された。しかし、stick2, 3 には検出位置のずれが発生するケースが多く見られた。原因として、stick2, 3 の見た目上の特徴が tip1, 2, 3, stick1, 4 に比べて少なく、かつ stick2, 3 のそれぞれの見た目の特徴とラベル付けの位置がお互いに近いことが原因であることが想定される。

3. ラベル付けをした際の背景と追跡を行う際の背景に違いがあるケース

アイトラッキングシステムにおいて視線検出が不安定となる要因として以下の点が挙げられる。

1. 作業中にキャリブレーション時から大幅に被験者が移動するケース

トレーニングボックス正面に設置したモニター下部にアイトラッカーを設置したため作業中にモニターと被験者の距離にズレが生じた場合は検出度が極めて低下した。

2. 被験者毎の身長差が大きく異なるケース

モニター高の制限から被験者の身長が 180 cm を超えるケースでは検出度が極めて低かった。

対策

機械学習モデルは、学習をおこなったデータと実際に推論（位置計測）を行うデータが近いほど精度が向上する特徴がある。

比較的安定して計測が可能であった tip1, 2, 3, stick1, 4 のそれぞれの位置の関係（ジョイント）情報を用いて追跡を安定化させる対策が考えられる。例えば、鉗子は剛体であるため、tip1, 2, 3, stick1, 4 それぞれの検出位置の

関係が大きい歪むことは考えられない。そのため、検出された keypoints のうち 1 点のみが歪んだ位置に検出された場合には、その点が誤検知であると検知可能となる。

また、1 点がトレーニングキット上のオブジェクトによって遮蔽された場合にも、他の keypoints の位置情報を用いて視認できない keypoint の位置を推測可能となる。トレーニングキットの背景ごとの検出精度のブレに関しては、それぞれの背景を満遍なく学習データとして使用することによって解決されることが予測され、更なる改良開発中である。

今回はスクリーンベース型のアイトラッカーを用いて実装実験を行ったが、ウェアラブル型のアイトラッカーを用いることで検出の精度は向上が期待される。

まとめ

本研究では、内視鏡トレーニングシミュレータにおける鉗子軌道データを定量化する AI モデルの実現可能性および視線データ定量化の実現可能性を検討した。改善点はあるものの AI システムの改良と自己学習により熟練外科医と初心者外科医を正確に識別できるようになることが期待された。効率的で信頼性の高いトレーニング環境を確立させるべく、引き続き客観的技術評価システムの開発を継続していきたい。

[成果の発表, 論文など]

Fukuta A, Yamashita S, Maniwa J, Tamaki A, Kondo T, Kawakubo N, Nagata K, Matsuura T, Tajiri T.: Artificial intelligence facilitates the potential of simulator training: An innovative laparoscopic surgical skill validation system using artificial intelligence technology. J Laparoendosc. Int J Comput Assist Radiol Surg. doi: 10.1007/s11548-024-03253-5. 2024