

氏 名	まつもと しろう 松本 志郎
学 位 の 種 類	博士 (医学)
学 位 記 番 号	乙第 875 号
学位授与年月日	令和 6 年 12 月 23 日
学位授与の要件	自治医科大学学位規定第 4 条第 3 項該当
学 位 論 文 名	腹腔鏡手術の新規技術評価法の開発
論 文 審 査 委 員	(委員長) 教 授 力 山 敏 樹 (委 員) 教 授 山 本 真 一 准教授 宮 川 友 明

論文内容の要旨

1 研究目的

腹腔鏡手術の技術向上に繋がる新規技術評価法を開発することを目的に、二段階にわけて研究した。

第一段階：ドライボックスでの手術器具の動き、骨格座標、視線が先行研究として評価されている。これらは手術器具やポート、術者の関節にセンサーを付け、比較的大きな視線カメラを付けることで評価されている。臨床手術にそのまま実装するのは、清潔野を保つのが困難かつ、手術のパフォーマンスに影響を及ぼす可能性があり、困難である。そこで臨床手術の評価にも応用できそうな方法に限定し、器具の動き、骨格座標、視線のどの指標がスキルレベルと最もよく関連するかを評価することを目的とし、ドライボックスでの評価を行った。

第二段階：近年、人工知能(AI)の物体検出技術の発達により、手術動画から手術器具の位置を同定することが可能になった。この方法は、手術技能評価を行うために懸念されていた無菌性とパフォーマンスへの影響の問題を解決する。そこで、手術器具の先端の座標を正確に識別できる AI アルゴリズムを開発し、スキルレベルによる手術器具の運動学的差異を見つけることを目的として、臨床手術を評価した。

2 研究方法

第一段階：腹腔鏡手術の執刀経験が 200 件以上の 4 名の外科医(エキスパート)、200 件未満の外科医 6 名(中級者)、医学生 6 名(初心者)を対象にした。腹腔鏡ドライボックスで縫合パッドを針糸で縫合し、3 回結紮し糸を切断する、という作業を 3 回実行した。動画をフレームごとの静止画像に変換し、先端の位置座標を同定した。骨格座標は、Kinect®を使用して上半身の 14 座標の位置を計測した。眼鏡型視線カメラを装着し、タスク中の視線座標を計測した。合計 3 回のトライアルの中で最も短い時間のトライアルを分析した。

第二段階：100 件以上の腹腔鏡下胃切除術を行ったエキスパート 3 名、20 件未満の初心者 3 名を対象とした。各対象者から 3 例ずつ、合計 18 例の腹腔鏡下幽門側胃切除術の動画を用い、6 番リンパ節郭清シーンで評価した。アナウト株式会社(東京)が開発した AI アルゴリズムを用いた。1,080 枚の静止画像の超音波凝固切開装置(Harmonic)にアノテーションを付け、学習を行い、手術動画から Harmonic 先端領域を同定した。手術器具の移動距離を時系列に並べて折れ線グラフ

にすると、波形としてとらえることができる。波形を周波数解析（フーリエ変換）することで、どの周波数の波をどのくらい含んでいるかを表現することができ、時系列パワースペクトル密度が算出できる。対数スケール上にプロットした近似直線の傾きを揺らぎの指標 β とし、3 秒(90 フレーム)ごとに評価した。

3 研究成果

第一段階：ドライボックスでのタスク実行時間の中央値は、スキルレベル順に階層となったが、 $P=0.066$ で有意差はなかった。右手に持った持針器の先端の総移動距離は有意差を認めた($P=0.049$)。中央値は、スキルレベルが上がると短くなった。多重比較では有意差はなかったが中級者と初心者の比較で効果量大であった。位置座標、位置座標の標準偏差、速度、加速度、ピーク速度、ピーク加速度には有意差は見られなかった。左手に持った器具、骨格座標の総移動距離に有意差はなかった。

視線の総移動距離に有意差はなかった。位置座標の標準偏差の中央値は、エキスパートで 38、中級者で 55、初心者で 83 であり、有意差を認めた($P=0.017$)。多重比較はいずれも有意差を認めなかったが、中級者 vs 初心者、エキスパート vs 初心者と効果量大であった。速度、加速度、ピーク速度、ピーク加速度、視線保持時間に有意差はなかった。

第二段階：臨床手術の検討として、合計 11.6 時間(1,254,010 フレーム)の動画を分析した。エキスパートが有意に短時間であった($P<0.001$)。総移動距離はエキスパートが有意に短かった($P=0.011$)。速度、加速度、躍度に有意差はなかった。1 秒あたりの移動距離にも差はなかったが、初心者で 120 ピクセル/秒未満の、先端が停滞する時間が長い傾向があった($P=0.133$)。揺らぎの指標 β はエキスパート 1.45 に対して、初心者 1.29 と有意差を認めた($P=0.008$)。 $\beta=0$ はホワイトノイズと言われ、無秩序な状況を表す。 $\beta=1$ は $1/f$ の揺らぎで、 β が 2 に近づくと規則的な動きとなる。この結果は、エキスパートがより規則的な動きをしていたことを示している。ROC 曲線でカットオフ値を 1.4 とすると、エキスパートと初心者が 77.8%の感度、特異度で区別できた。手術時間と β は中程度の負の相関を示した。

4 考察

ドライボックスでの縫合結紮タスクの評価では、視線の位置座標の標準偏差はスキルレベルの上昇とともに減少し、距離のブレが少なく、視線が狭い領域に集中しており、エキスパートが周辺視野を活用していることを示唆する。この結果より、視線座標の標準偏差はスキルレベルを反映しており、有用であると考えられる。ドライボックスのタスクにおいて、右器具の総移動距離と視線座標の標準偏差がスキルレベルに応じて異なることが判明した。臨床手術の評価にも応用できそうな評価手法という制限下では視線と器具の動きが有用であることが分かった。そこで臨床手術動画から器具の動きを評価した。

臨床手術動画から AI 物体検出を用い、手術器具の先端位置情報を得て、その運動学的指標がスキルレベルによって異なるかを検証した。その結果、総フレーム数、総移動距離、揺らぎ指数 β に差があった。1 秒あたりの移動距離が 120 ピクセル未満の、ゆっくりとした動きの時間帯が、初心者では長く続く傾向があった。この結果は、トレーニングボックスのタスクは理解しやすいものの、初心者にとって臨床手術中は難しく、手術操作に迷い手が止まる瞬間があることを示唆している。

エキスパートの揺らぎ指数 β は初心者に比べて高く、2 に近いことから、エキスパートの手術器具の動きが規則的であることがわかった。規則的な動きとは The Global Operative Assessment of Laparoscopic Skills (GOALS) の評価基準にある「自信を持って、効率よく、安全に操作する」ことを意味し、揺らぎ指数 β はそれを定量化していると考えられる。 β は過去 3 秒間の動きを用いて算出しており、リアルタイムなスキル評価も可能である。

本研究で、AI 物体検出技術が手術器具の正確な位置を特定し、運動学的指標を取得できることを示した。さらに、揺らぎを評価することで、エキスパートの手術器具の効率的かつ規則的な動きを定量化し、これをリアルタイム評価できることを明らかにしたという点で画期的である。

本研究では、絶対的な 3 次元の先端位置ではなく、動画から 2 次元で手術器具の位置を分析したという点で、制限がある。また、この研究は外科医の右手の手術器具の動きのみに焦点を当てているが、外科医の右手の動きは手術のほんの一部の要素にすぎない。さらに、本研究は単施設での研究であり、対象者は 6 名で、評価された手術は 18 例に過ぎない。将来的には、評価方法に左手の器具の動き、術野展開を含むように拡張しながら、多施設設定でより精度の高い技術評価方法を開発していきたいと考えている。

5 結論

手術技術向上の学習曲線短縮に繋がる、腹腔鏡手術の新規技術評価法を開発することを目的に研究を行い、スキルレベルが上がると右手の器具の動きの規則性が上がることを発見した。本手法は器具や執刀医の手にセンサーを装着する必要がなく、臨床導入への親和性が高い。症例の蓄積によってリアルタイム性を持った技術評価法の確立に繋がる研究である。

論文審査の結果の要旨

本研究は、腹腔鏡下手術における手術技術の向上につながる正確かつ客観的な評価方法の開発を行う目的で行われた。二部構成となっており、一部では、ドライボックスでの縫合結紮タスクを手術器具、(器具挿入用) ポート、清潔野へセンサー等を付けずに評価し、エキスパート、研修医、医学生で比較、二部では臨床手術の動画から手術器具の位置を評価することでエキスパートと初心者を比較した。

一部では手術器具の動き、骨格座標および視線を評価することによってタスクのパフォーマンスを評価した。器具の動きを評価するために、動画をフレーム単位の静止画像に変換し、VGG image annotator® (Visual Geometry Group、英国オクスフォード大学)を用いて手動で左右の器具の先端位置に注釈を付け位置座標を算出した。合計 58,878 枚の画像に一枚ずつ、両手の 2 つの器具先端をアノテーターの画面上でクリックして注釈を付ける作業を行った。動画解析から得られる器具の動き、Kinect®から得られる骨格座標、眼鏡型視線カメラから得られる視線を同時に評価した。これにより、手術器具の総移動距離と視線座標の標準偏差が、エキスパート、中級者、初心者で差があることが判明した。

二部では、手術器具の先端の座標を正確に識別できる AI アルゴリズムを開発し、腹腔鏡下幽門側胃切除術においてスキルレベルによる手術器具の運動学的差異を見つけることを目的として研究を行った。腹腔鏡下胃切除術 100 件以上のエキスパート 3 名と、20 件未満の初心者 3 名から 3 症例ずつ、計 18 症例の動画を評価用動画とし、Harmonic のアクティブブレード、アクティブブ

レード先端、ティッシュパッドにアノテーションを付けて AI モデルを学習させるという独創的な手法で AI を開発し、この AI モデルによって手術動画を解析した。手術器具先端の動きを揺らぎで評価し、エキスパートの動きはより規則的で、総移動距離が短く、初心者の動きはそれに比べると不規則で、おそらく迷いによる先端の停滞が長くなる事が判明した。

これらの研究内容は、画像の解析や AI モデルの開発など膨大であり、かつ独創的な発想に基づいて行われており、新規制に富んだ手術技術評価方法が開発されたと考えられる。当初提出された学位論文では、その膨大な作業量や努力が一部伝わらない表現であったが、修正論文では十分に表現されており、学位に値する論文であると結論付けた。

試問の結果の要旨

上述の如く、当初提出された論文からは、画像への注釈作業や、AI アルゴリズムの開発など、その膨大な作業量や努力があまり伝わらなかったが、試問での発表は非常に具体的であり、かつ理解が進む内容であった。審査員の質疑にも十分応答し、発表と質疑によって論文内容が深く理解できた。これらを発表者に伝え、修正論文の提出となった。十分合格に値する試問結果であった。