

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K18165

研究課題名（和文）小児内視鏡手術トレーニングのための客観性と即時性を備えた手技評価システムの開発

研究課題名（英文）Development of an objective and immediately analyzable procedure evaluation system for pediatric endoscopic surgery training.

研究代表者

高本 尚弘（Takamoto, Naohiro）

東京大学・医学部附属病院・病院診療医（大学院生）

研究者番号：60814704

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：これまでの手技評価は、ドライボックス内の単純な縫合タスクにおいて、縫合後の創の状態を静止画像から解析するという縫合後の結果を評価した方法があり、すでに市販化されている。しかし、手技中の操作評価については、特に小児外科の狭い術野においては、正確な計測ができていない上、手技操作の何を評価しているのか分かっていない。本研究は、鉗子の動きをハプティックデバイスを用いて計測したり、画像解析の手法を用いて、縫合時における鉗子のスムーズな操作や手技の正確さといった手技操作中の評価を客観的かつ迅速に行う方法を開発することを目的とする。

研究成果の学術的意義や社会的意義

小児内視鏡手術は、患者へのメリットが大きいものの、小児独自の高度な技術が伴う上、小児外科疾患が非常に希少であるため、内視鏡手術を行う機会に限られる。そのため、術前トレーニングが必要だが、これまでは真の手技評価が行えるツールがなかった。さらに、その評価結果を訓練者にすぐにフィードバックすることができず、練習が長続きしなかった。そこで、手技を点数化して評価し即座に被験者にフィードバックするシステムがあれば、自身の技能レベルを訓練者のみならず周囲スタッフも把握することができ、効率的かつ正確な訓練が促進され、強いてはon the job trainingの回避と少子化対策にも繋がるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The suturing evaluation method has been established in which the state of the wound after suturing is analyzed from images in a simple suturing training in a dry box and already commercialized. However, regarding the evaluation of the procedure itself, it is not possible to measure accurately, especially in the narrow surgical field of children, and it is not known what the surgical manipulation is being evaluated. In this study, we aim to objectively and quickly evaluate the smooth operation of forceps during suturing and the accuracy of the manipulation by measuring the movement of the forceps using sensors and by using an image analysis method.

研究分野：小児外科 内視鏡手術

キーワード：小児 内視鏡手術 トレーニング 手技評価

## 1. 研究開始当初の背景

小児領域においても内視鏡手術は、従来の開胸・開腹手術と比較し、整容性に優れ、術後回復が早く、側彎・胸郭変形といった晩期合併症が抑えられることが証明されつつある。さらに、食道閉鎖症や胆道拡張症などの疾患に対する高難易度内視鏡手術が、2016年度より保険収載され、患者のメリットを考えるならばその手技習得は必須となっている。

しかし、新生児や乳児は非常に術野が小さく、組織も脆弱であるため、繊細かつ注意深い操作や効率的な動作といった小児独自の高度な技術が医師には要求される。その上、小児外科疾患はそれぞれが非常に希少であるため、内視鏡手術を行う機会が限られ、高難易度手術を行うまでに段階的なトレーニングが積めず、on the job training となっているし、個人レベル、施設レベルで習熟度に大きな差が生じているのが現状である。

上記問題の解決のため、術前トレーニングの必要性が認識され、ドライボックスやバーチャルリアリティ(VR)シミュレータ、大動物による練習など様々なツールが開発されている。しかし、これまでのトレーニングツールは訓練者の自己満足にとどまるか、ツールを用いて手技評価をする研究はあるが正確かつ十分な方法となっておらず、真の手技評価ができていないと言いがたい。加えて、その評価結果を訓練者にすぐにフィードバックすることができず、訓練者のモチベーションを維持できていなかった。そのため、せっかくトレーニングツールが開発されても臨床に生かせていないのが現状である。

そこで、内視鏡手術手技を正確に評価するための方法とシステムの確立が重要と考え、訓練者にとって飽きのこない新しいトレーニングシステムの開発を提案するに至った。

## 2. 研究の目的

これまでの手技評価は、ドライボックス内の単純な縫合タスクにおいて、縫合後の創の状態を静止画像から解析するという縫合後の結果を評価した方法であり、すでに市販化されている。しかし、手技中の操作評価については、鉗子の先端の動きを光学センサーや磁気センサーを用いて速度・加速度を計測する研究はあるが、小児外科の狭い術野では、センサーが遮蔽物や磁性体といった影響を受けやすいため正確な計測ができていない上、これらの計測はタスク全体を評価しているため、手技操作の何を評価できているのかわかっていない。また、手技を詳細に評価する方法として、当科では独自に開発した新生児胸郭モデル内に設置した食道同士の吻合を被験者に行い、その様子を収録した動画を複数の評価者の目で点数化し、熟練医と被験者との技術の違いを明確にした経験がある(Deie, et al. JLAST 2017)。

しかし、この方法では評価するのに時間がかかる上、やや客観性を損なう可能性がある。そこで、本研究は、縫合時における鉗子のスムーズな操作や手技の正確さといった手技操作中の評価を客観的かつ迅速に行う方法を開発することを目的とする。手技中の操作を正確に評価できる方法が確立され、さらに、それを様々な小児疾患モデルに実装でき、手技を点数化して評価し即座に被験者にフィードバックすることができるシステムは今までにない独自性が高い。このシステムにより、自身の技能レベルを訓練者のみならず周囲のスタッフも把握することができ、効率的かつ正確な訓練が促進されることが期待される。

本研究では以下の点を明らかにすることを目的とする。

### 鉗子の動きを実測データとして計測し、そのデータを元に評価する

鉗子の動きのスムーズさや迅速性を計測するため、鉗子の位置や速度、加速度などを計測するが、鉗子に直接センサを取り付けることで正確なデータ測定が行えるようにする。これらのデータが熟練医と非熟練医との手技の差を見分ける要素があるかを検証し、評価方法を確立する。

### 鉗子の動きを画像情報として録画し、そのデータを元に評価する

鉗子の操作の正確性を計測するため、正しい針の把持位置や対象物への刺入角度、創部が正しく縫合できているかなどを画像認識の手法を用いて自動解析する方法を確立する。

## 3. 研究の方法

### 鉗子の動きを実測データとして計測し、そのデータを元に評価する

協力企業である三菱プレジジョンのVRシミュレータに搭載されているハプティックデバイスは直接鉗子に取り付けており、位置や速度、加速度、タスク時間を計測し、リアルタイムに結果を訓練者に表示できるシステムを有している。この計測システムは、鉗子のシャフトの根元にデバイスを取り付ける機構であり、その取り付けた部位から鉗子先端の挙動を演算処理して推定する仕組みである(図1)。速度や加速度を用いた評価方法は前述の通り確立されていないものの、ある手術操作時の鉗子の位置情報から鉗子の移動距離や操作面積を計測し鉗子が無駄なく動かしているか、加速度の変化量から鉗子を急に動かすような危険な操作をしているかといった分析を事前に取得した評価データから検討する。熟練医、非熟練医のデータから手技の優劣に関わっている要素を抽出し、評価項目を選定する。

### 鉗子の動きを画像情報として録画し、そのデータを元に評価する

被験者の操作を熟練医の目で評価する方法は、鉗子操作の正確さや安全性を詳細に評価点数化する方法として有用ではあるが、評価者側の負担が大きいため、主観的な評価となる恐れがある。そこで、これまでの評価項目を用いながらも、画像上で針や糸を認識し、アルゴリズムに基づいて自動で解析評価するシステムを開発する。針や鉗子の自動認識を行い、色や輝度勾配といった情報を用いて画像をセグメンテーションし、コンピュータに学習させ、針や糸を認識する。本研究では、主に運針操作に伴う針の刺入角度や把持位置、針を把持したまま画面外に持ち出したかどうかなど、すでに熟練医と被熟練医間で手技の差が出ている評価項目を中心に画像解析を行う企業に委託し解析し、評価系を確立する。

#### 4. 研究成果

##### 鉗子の動きを実測データとして計測し、そのデータを元に評価する

以前に取得した内視鏡手術の経験がない被験者データを用いた。被験者には専用のドライボックスでの縫合練習を行った。縫合トレーニングは2日間行ったが、そのトレーニング前後のデータを比較検討した。縫合操作を運針と糸の結紮とに分け、右手鉗子、左手鉗子のそれぞれで評価した。位置、速度、加速度、角速度などのデータを計測した。

以前の研究で、手技にかかる時間、鉗子の操作距離、鉗子の操作回数といったパラメータはトレーニング前後で有意差をもって改善しており、手技の迅速さの向上を示した (Deie, et al. Surg Endosc 2022)。

今回、手技操作の無駄のない動き、円滑な鉗子の動きを評価するため『操作のふらつき』『操作の停止時間』などを新たな評価項目として検討した。被験者は32名であった。対応のあるt検定で解析を行った。

##### A. 鉗子操作のふらつき評価

Short-Time Power of Difference (STPOD)法を用いて評価した (Ohtake et al. Int J Comput Assist Radiol Surg.2022)。短時間区間 (今回0.02[s])での2点間の鉗子の動きに区切って近似直線を求め、その誤差の総和を取る方法で、術具が揺れていると誤差が大きくなる (表1)。

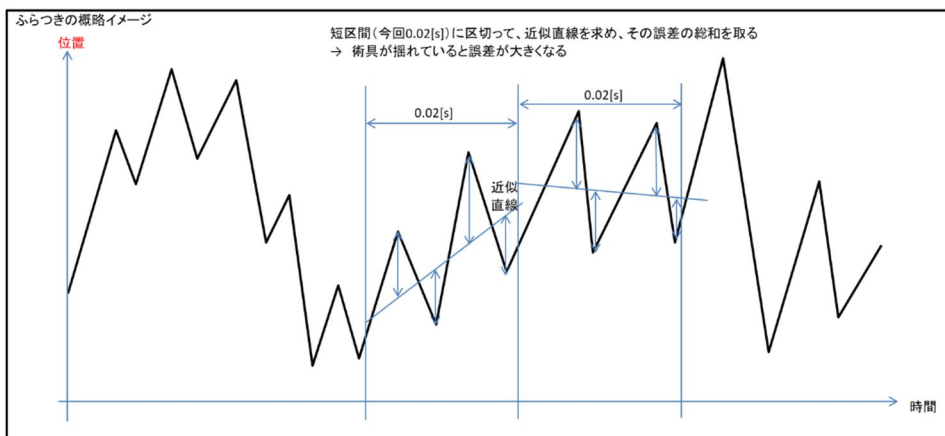
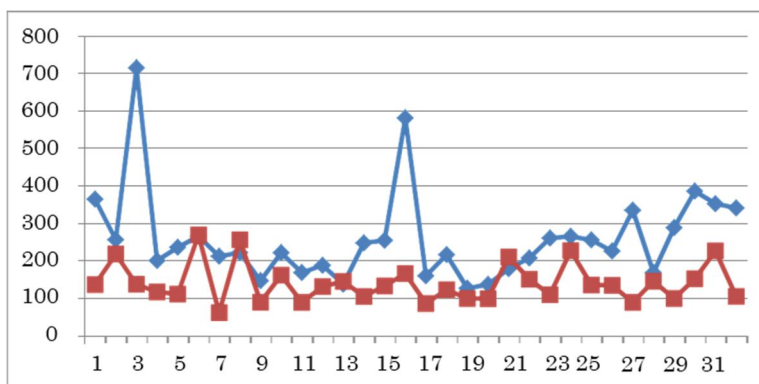


表1：ふらつき概略のイメージ

被験者のトレーニング前後での運針および結紮について評価を行ったところ、左右鉗子ともに有意差をもってトレーニング後でのふらつきの軽減が見られた。表2に各被験者の左手鉗子の運針操作時のふらつきの様子を示す。



運針 先端左 (3針縫合)

表2：左手鉗子のふらつき評価 (サンプル数 20[ms]、横軸：被験者、縦軸：ふらつきの程度[mm]) 青色：トレーニング前、赤色：トレーニング後

## B. 操作の停止時間評価

前述 A と同様に STPOD 法を用いて評価した。短時間区間（今回 0.02[s]）での 2 点間の鉗子の平均位置（中心位置）からの誤差が少ない区間（時間）をカウントする方法で、値が大きいと術具の動きが停止している時間として評価した（表 3）。

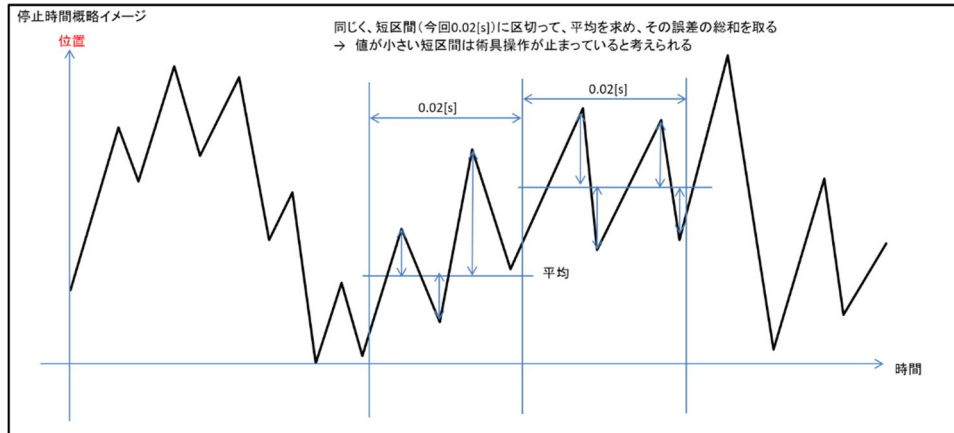


表 3：停止時間の概略のイメージ

被験者のトレーニング前後での運針および結紮について評価を行ったところ、左右鉗子ともに有意差をもってトレーニング後での停止時間の減少が見られた。表 4 に各被験者の左手鉗子の運針操作時の停止時間の様子を示す。

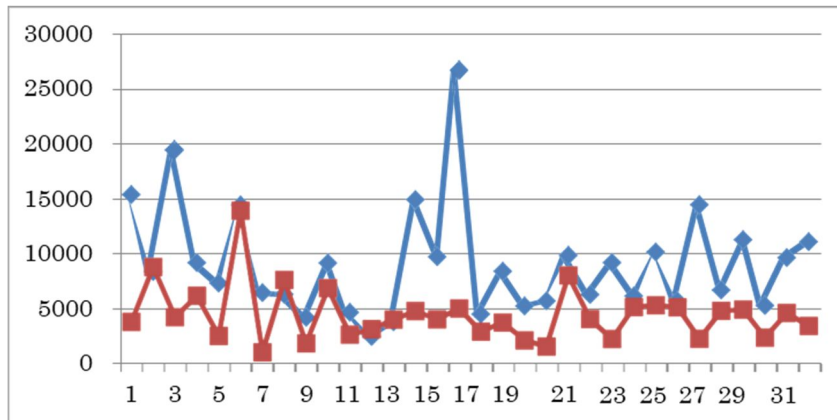


表 4：左手鉗子の停止時間の評価（サプリング 20[ms]、横軸：被験者、縦軸：count(1 カウント 20ms)、青：トレーニング前、赤：トレーニング後。10000 カウント = 200[s]。)

今後への課題：今回の検証により、これまでの研究にはない新たな手技評価項目となる可能性が示された。しかし、操作によっては、鉗子が止まる必要がある操作である場合もあり、手技をより詳細に区分し検証する必要があると思われた。

## 鉗子の動きを画像情報として録画し、そのデータを元に評価する

前述 の被験者 32 名の縫合の様子を撮影した動画データを用いた。協力企業に依頼し、動画情報から必要な情報（持針器、針、鉗子など）を抽出、トラッキングし、手技の自動解析が可能かどうか検証した。今回は、鉗子で針を持ったまま画面外に持ち出す操作の有無を検知できるかの操作に限定した。

## A. 両鉗子、針の有無に関するクラス分類



画像内に左鉗子および右鉗子の両方があるかないかを識別できるか検証した。学習データとして、両鉗子あり：約 4500 枚、両鉗子なし：約 2000 枚を用いたところ、検証精度が 96%に達したことを確認した。また、同様に画像内に針があるかないかを識別できるか検証した。学習データとして、針あり：約 5000 枚、針なし：約 4000 枚を用いたところ、検証精度が 93%に達したことを確認した。いずれも後述する機能の実装に適用可能と判断した。

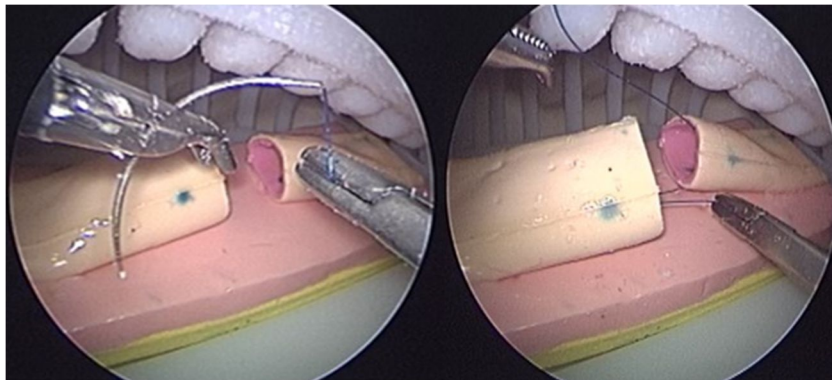


図 1：針の有無の画像例（左：針あり、右：針なし）

### B. 左鉗子、右鉗子、針の物体検出およびトラッキング

左鉗子、右鉗子、針の物体検出では、画像内のどこに左鉗子、右鉗子、針があるかを検知し、それぞれ対応する矩形で囲う検出器を作成する。検出した矩形から位置情報を取得する。物体検出イメージを図 2 に示す。

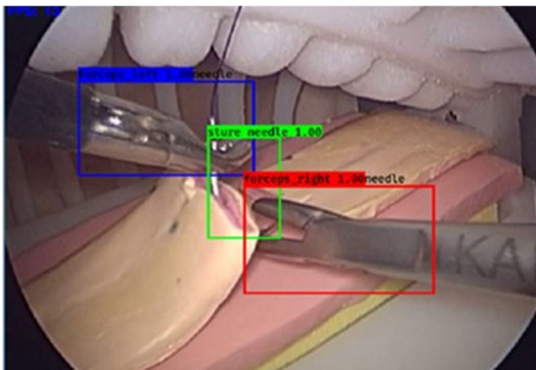


図 2：物体検出のイメージ

約 3600 枚の画像を学習データとして使用したところ、正解率は左鉗子：89.0%、右鉗子は 85.5%の精度に達した。一方、針については、検出精度が 16.0%と低値であった。

### C. 画面外への針の持ち出し検知

前述 B の針の検出精度が低値であることから、検知するケースは、『画像内から針が消えたとき、片方の鉗子しかない又は両鉗子ともない場合は持ち出しを検知』、もしくは『両鉗子がある状態から片方の鉗子になった又は両鉗子ともなくなった場合は持ち出しを検知』とした。しかし、この定義では鉗子が糸を持って持ち出したのか針を持って持ち出したのかの判断はできないため、ログとして検知前後の画像を保存することでエラーの目視確認を補助する機能ととなった。

14 症例で検証したところ、正しく検知できたのは約 50%にとどまった。正解率が低値となった理由として、糸を針と誤識別する、画面手前にある糸で、針と鉗子が隠れているなどが挙げられた。

今後への課題：針の検出精度が低く、望むべき結果が得られなかった。今後は、より細分化されたクラス分類が可能な識別器を作成する、針を検出する別の手法を検討する、より多くの学習データを用いるなど様々な検討が必要だろう。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
研究協力者	出家 亨一  (Deie Kyoichi)		

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