

腹腔鏡下手術トレーニングシステムの開発： 鉗子の手首回転操作に関する評価方法の提案 と検証

村野, 海斗 / MURANO, Kaito

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

58

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

8

(発行年 / Year)

2017-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00014126>

腹腔鏡下手術トレーニングシステムの開発 - 鉗子の手首回転操作に対する評価方法の提案と検証 -

DEVELOPMENT OF A TRAINING SYSTEM FOR LAPAROSCOPIC SURGERY
- EVALUATION FOR USE OF WRIST ROTATION IN FORCEPS MANIPULATION -

村野海斗

Kaito MURANO

指導教員 石井千春

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

Surgeons are required to implement sufficient training for performing laparoscopic surgery. The objective of this study is to develop a training system so that trainees can train surgical operation of ligation by themselves without any instructions by skilled surgeon. First, difference of the surgical skill between skilled surgeon and intern surgeons is investigated by watching surgeon's forceps operation. As a result, it turned out that the amount of rotation of the wrists by intern surgeons is not as large as that of skilled surgeon in wrapping procedure of ligation. Second, a system to evaluate effective forceps operation of the right and the left forceps is proposed for the wrapping procedure in ligation, in which trainee's skill is evaluated on the basis of the amount of rotation of the skilled surgeon's wrists and the required time in the wrapping procedure performed by the skilled surgeon. In addition, an interface for representing the evaluation results to the trainee was also developed. Third, in order to verify an effectiveness of the proposed evaluation method, experiments for investigating the distinction rate of the wrapping procedure performed by skilled surgeons and the wrapping procedure performed by intern surgeons were carried out. Finally, the sensor module that can be attached to the forceps was developed for angular measurement in the realistic surgical environment and was applied to in vivo experiments.

Key Words : *Laparoscopic surgery, Surgical training, Ligation, Wrapping procedure, Skill assessment, Linear discriminant analysis*

1. 緒論

現在、従来の開腹手術に替わり、腹腔鏡下手術が一般に行われるようになってきている。腹腔鏡下手術とは、患者の腹部に 10~20mm ほど開けた数か所の孔から、鉗子と呼ばれる医療機器と腹腔鏡を挿入し、腹腔鏡の映像を見ながら鉗子を操作して手術する術式である。開腹手術に比べ、傷が小さいため、整容性に優れていることや、患者の負担が軽減されるので、術後の痛みが軽く、早期の社会復帰が見込める。しかし、術者の手の動きと鉗子の動きが異なること、映像を介する手術の為、手術難度が高く手術時間も長くなること、腹腔鏡で捉えた術野外で鉗子が臓器等を損傷する危険がある等の欠点が存在するため、医療事故を起こしやすい。そのため、腹腔鏡下手術に対する様々なトレーニング方法が存在する。代表的なものとして、Virtual-Reality (以下、VR) 技術を利用した VR シミュレータトレーニングや、臓器等を模擬したものをドライボックス内に入れて、実際の鉗子によって操作するボ

ックストレーニングがある。VR シミュレータは、VR 技術によって臓器を細部まで模擬することにより、基本的な手技から複雑な手術の術式まで幅広く訓練することが出来る上、訓練者の操作の定量的評価を行えるものも存在する。しかし、非常に高価であるので装置を導入できる施設が限られ、導入台数も制限されてしまう。このため、手軽にトレーニングを行うことが困難であり、また仮想空間上の操作であるので、実際の感触に慣れるためにはドライボックスによるトレーニングも必要であり、両方を併用して行われているのが実情である。一方で、ドライボックスのトレーニングでは、日常的にトレーニングを行いやすいが、初心者単独でのボックストレーニングでは手技技術向上が認められないという報告もあり [1]、熟練医による指導が必要不可欠となる。しかし、指導医が付き沿って指導を行うことができる時間は限られているため、ドライボックスによるトレーニングにおいても、客観的に訓練者の手技技術を評価し、訓練者にフィードバック

クすることで、指導医を必要としないトレーニングシステムが必要とされている。

栗田[2]らは、手術操作を4つの基本的な操作に分類し、ひずみゲージを取り付けた鉗子を用いて、手術操作の自動動作識別を行うとともに、医師と未経験者による牽引操作時の力情報の差異を定量的に評価する手法を提案し、その適応性を検証した。山下 [3]らは、内圧測定装置を搭載した模擬腸管を用いたデバイスを開発し、模擬腸管上の切開創を縫合して閉創する作業に対して、その内圧値から縫合不全の評価を行う方法の有効性を示している。安藤[4]らは、操作時に見本映像を重畳提示することで、手術手技の手順を習得・洗練させるシステムを開発するとともに、熟練者と初心者の運動分散の比から重要な動作を抽出する方法を提案している。Ishii[5]らは、結紮作業を6つの動作に分類し、そのうちの1つの動作を自動識別して、さらに最も危険に繋がり易い糸結び動作と識別された時に、通常行われる動作か通常の動作とは異なる異常動作であるかを判別するシステムを構築している。

本研究では、センサ類を取り付けた鉗子を用いたトレーニングボックスを使用し、熟練医の手技データに基づき、熟練医からの直接の指導なしに訓練者が腹腔鏡下手術の基本手技を自習できるトレーニングシステムを開発することを目的としている。熟練医から、手術操作において左右の鉗子の効果的な協調作業が重要であるとの指摘があった。そこで、熟練医による結紮作業に着目したところ、操作中に左右の手首を大きく回転させて作業を行っている傾向が見られた。これより、左右の鉗子の効果的な協調作業に手首の回転操作が関係していると仮定し、左右の鉗子の効果的な操作の指標として手首の回転を評価する。

本研究では、腹腔鏡下手術における結紮作業において、熟練医の手技における手首の使い方と作業時間を師範として、訓練者の手首の回転操作を評価するシステムを開発した。また、提案した評価方法により熟練医と研修医の手首の回転操作の差異を区別できるかどうかを検証するために、熟練医と研修医の識別を行った。さらに、鉗子に取付け可能な装着型の手首角度計測デバイスを開発し、実際の手術現場を模擬した腹腔鏡下手術トレーニングセンター環境内（以下、Wet環境）においても、提案した評価方法により同様の識別ができるかどうかを検証した。

2. トレーニングボックスの概要

Fig.1に、実験装置として用いたトレーニングボックスを示す。右手で操作する鉗子として持針器（日本高分子技研社製、EYP2009L-CNK）を、左手で操作する鉗子として持針器（日本高分子技研社製、EYP2009S-CNK）を使用した。これらの鉗子は、医療用途には使用できないため、Wet環境下では、右手で操作する鉗子として持針器(KARL STORZ社製、26173 KAL)を、左で操作する鉗子として補助鉗子(KARL STORZ社製、26173 DQ)を使用した。結紮

操作は、ボックス内のアメゴムシートに行う。

また、3つのデジタルエンコーダと3つのポテンシオメータを内蔵する3次元力覚デバイス PHANTOM Omni (Sensable社製、以下 Omni) に左右の鉗子をそれぞれ取り付け、Omniの点Pにおける左右の鉗子の位置 P_{xi} , P_{yi} , P_{zi} , 速度 V_{xi} , V_{yi} , V_{zi} , 角度 a_i , b_i , c_i , d_i , e_i , f_i をそれぞれ計測する。添え字の i は、Omniの左右を表す ($i=1$ は右, $i=2$ は左)。添え字の x, y, z はそれぞれ Omniの正面から横方向, Omniの正面の方向, 床から垂直の方向を表す。以後、これらの計測情報を鉗子操作情報と呼ぶことにする。各信号は、MATLAB/Simulinkを用いてサンプリング周波数 1kHz で取得する。

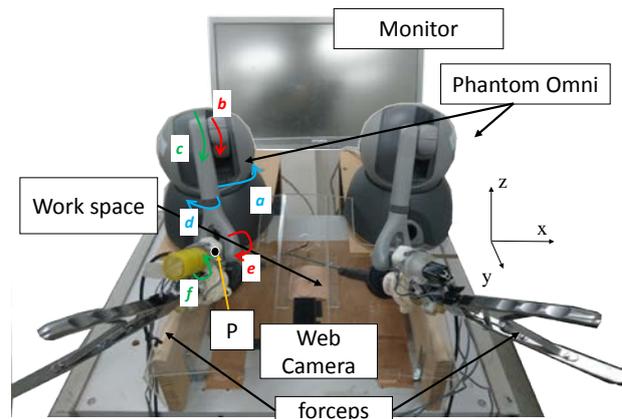


Fig.1 Training box

腹腔鏡下手術には、Co-axial position(以下、Co-axial)での操作方法と、Para-axial position(以下、Para-axial)での操作方法が存在する。Co-axialとは、左右の鉗子の間に腹腔鏡を挿入して操作を行う方法であり、Para-axialとは、Co-axialとは直行する方向から腹腔鏡を挿入して操作を行う方法である。開発したトレーニングボックスでは、Fig.2に示すように、Webカメラの配置位置を変更できるようにすることで疑似的にCo-axialとPara-axialでの操作を可能にしている。一般にPara-axialでの操作の方が難しいとされる。

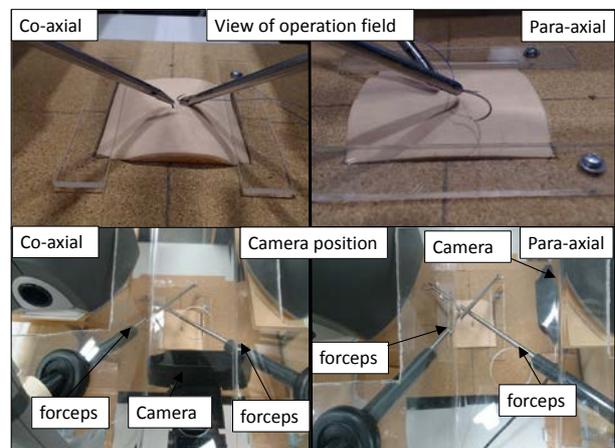


Fig.2 Co-axial position and Para-axial position

3. 鉗子の評価システム

(1) 結紮作業

結紮作業とは縫合作業の一過程であり、患部を縫合糸で縛って結ぶ一連の作業のことである。腹腔鏡下手術用鉗子を用いて手術を行う際、鉗子の作業領域は限られている。左右双方の鉗子を協調させて、効果的に動かしながら作業を行うことにより、作業領域を最大限に有効利用できるようになり、迅速な処置が可能となる。一般に、結紮作業により両手操作の協調を訓練できるため、結紮作業は左右の鉗子の効果的な使用の評価を行うのに適している。したがって、本研究でも結紮作業を対象として評価システムを開発する。

(2) 結紮作業の動作分類

木口[6]らは、刺入動作における針の先端方向と刺入合力方向についての熟練医と初心者の差異を示し、さらに、結紮作業を4つに分類し、糸を巻き付ける動作において初心者の方が操作に時間をかけていることを示した。しかし、時間の指標だけでは、訓練者にどのように操作すればよいかを示すことは出来ない。

そこで本研究では、特徴が現れる動作を明確にするため、Fig.3に示すように結紮作業を「①把持(右)、②巻き付け(左軸)、③移動(左)、④両手持持、⑤糸結び開始、⑥糸結び引張、⑦把持(左)、⑧巻き付け(右軸)、⑨移動(右)、⑩両手持持、⑪糸結び開始、⑫糸結び引張、⑬中立」の12の動作に細かく分類した。通常、結紮作業は「①～⑥」または、左右逆の動作である「⑦～⑫」の流れで行われ、一般的に「①～⑥」はCループ、「⑦～⑫」は逆Cループと呼ばれる[7]。

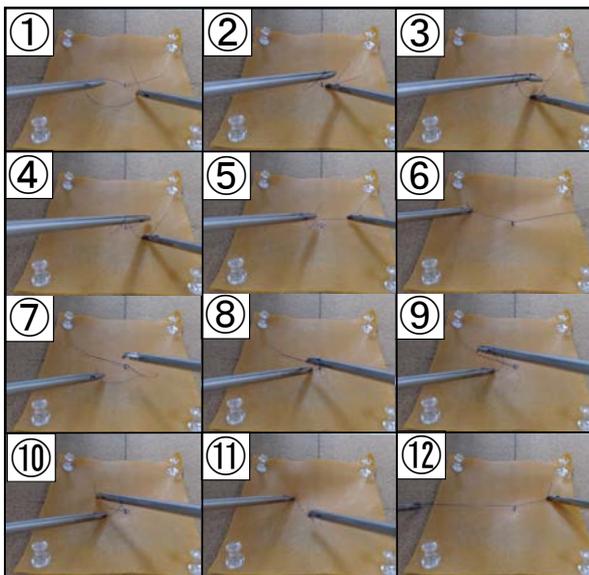


Fig.3 Classification of operation for ligation

各動作は、①は右鉗子が糸を持つ動作、②は左鉗子の軸部に糸を巻き付ける動作、③は左鉗子を逆側の糸まで移動しながらその先端部を開く動作、④は左鉗子も糸を挿入

で両手で糸を把持する動作、⑤は両手持持から結び目を作るために糸を引き始める動作、⑥は結び目が完成してから糸結びを終えるまでの動作、⑦～⑫の動作は、それぞれ①～⑥の左右逆の動作である。

(3) 評価項目の設定

上述した動作分類の下で評価項目を検討するために、熟練医と初心者が結紮作業を①～⑥および⑦～⑫の順に、それぞれ13回行い、それぞれの鉗子操作情報を計測した。計測した結果の内、熟練医と初心者の②と⑧の巻き付け時の手首角度の一例をFig.4に示す。

Fig.4より、②と⑧の巻き付け時において、熟練医は初心者に比べて左右の手首をより大きく回転させて手技を行っていた。初心者では巻き付ける鉗子を持つ側の手首を回転させずに巻き付けを行っていたが、熟練医は巻き付ける鉗子を持つ側の手首を回転させることにより鉗子をロールさせて巻き付けを行っていた。この動作により、糸の巻き付けが円滑に行えていた。また、巻き付ける側の手首だけではなく、巻き付けられる側の手首も多く動かして鉗子进行操作していた。これは、左右の鉗子を協調させて手技を行うことにより、熟練医が次の動作(③と⑨)へ移行し易くするために意図的に行っているものと考えられる。これにより、Omniで計測した熟練医の鉗子の角度 $f_i (i=1,2)$ が、②と⑧の巻き付け時に大きく変化していることが分かった。また、初心者の方が巻き付け作業の実施に時間がかかっていることが分かった。

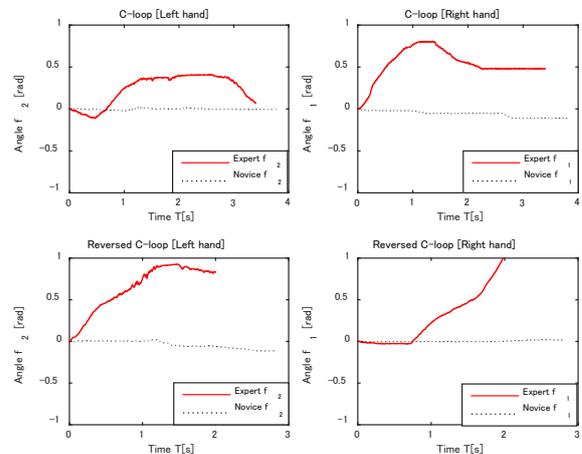


Fig.4 The amount of rotation of the wrists by skilled surgeon and novice for ② and ⑧

これより、評価対象とする動作を巻き付けとし、評価量の1つとして鉗子の角度 $f_i (i=1,2)$ を用いる。ここで、鉗子の角度 f_i の変化量を用いて、次式により MI_i , ME_i , mi_i , me_i ($i=1,2$)を定義し、この内、最大となるものを $F_i (i=1,2)$ とする。以上より、角度変化量 $F_i (i=1,2)$ と巻き付け作業時間 T の2つの量を評価項目として採用した。

$$MI_i = |\theta_{maxi} - \theta_{inii}| \quad (1)$$

$$ME_i = |\theta_{maxi} - \theta_{endi}| \quad (2)$$

$$mI_i = |\theta_{mini} - \theta_{inii}| \quad (3)$$

$$mE_i = |\theta_{mini} - \theta_{endi}| \quad (4)$$

$$F_i = \max\{MI_i, ME_i, mI_i, mE_i\} \quad (5)$$

ただし, θ_{maxi} , θ_{mini} , θ_{inii} , θ_{endi} はそれぞれ, 巻付け作業実施区間における左右の鉗子の角度の最大値, 最小値, 初期値, 最終値である.

(4) 評価方法

鉗子操作の評価は, 鉗子操作を熟練医の領域とそれ以外の操作者の領域の 2 クラスに分類し, 判別分析法を用いて識別関数 $f(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \mathbf{x} + w_0 = 0$ を求め, 訓練者の操作を識別することによって行う. 作業時間と角度変化量による評価項目 T と F_i を用いて, 特徴量を $\mathbf{x} = [T, F_i]^T$ と定義する. このとき, 2 つのクラスを正しく分離する識別関数 $f(\mathbf{x})$ を, 次式で表されるクラス間分散とクラス内分散の比 h が最大となるように求めた.

$$h = \frac{P(C_1)(m_1 - \bar{m})^2 + P(C_2)(m_2 - \bar{m})^2}{P(C_1)\sigma_1^2 + P(C_2)\sigma_2^2} \quad (6)$$

ただし, $P(C_i)$ は, 各クラス i の事前確率, m_i , σ_i^2 は, 各クラス i の \mathbf{x} を $f(\mathbf{x})$ によって線形変換した後の平均値と分散, \bar{m} は, \mathbf{x} を $f(\mathbf{x})$ によって線形変換した後の全データの平均値である.

これより, 求めるべき係数ベクトル \mathbf{w} とバイアス項 w_0 は, (7)式, (8)式で与えられる.

$$\mathbf{w} = (P(C_1)\Sigma_1 + P(C_2)\Sigma_2)^{-1}(\mu_2 - \mu_1) \quad (7)$$

$$w_0 = \frac{-\mathbf{w}^T(\mu_1 + \mu_2)}{2} \quad (8)$$

ただし, Σ_i は, 各クラス i の共分散行列, μ_i は, 各クラス i の平均ベクトルである.

求めた識別関数 $f(\mathbf{x})$ を閾値線として, 特徴量が熟練医の領域に写像された場合は, その訓練者が熟練医相当の鉗子操作を行っていると判定する. また, 特徴量が熟練医の領域に写像されなかった場合は, 熟練医の特徴量との類似度を提示することにより, 訓練者の鉗子操作を評価する.

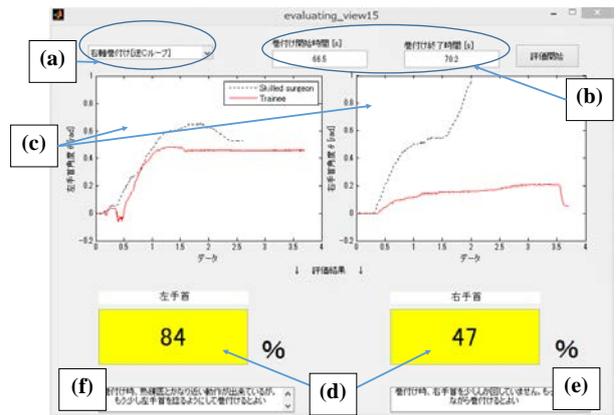
(5) 評価結果提示用インターフェース

評価システムの実際の使用方法は以下の通りである.

- (1) 結紮作業を行い, 鉗子の角度 $f_i (i=1,2)$ を Omni により計測する. また, 作業を録画する.
- (2) 録画した結紮作業の動画から, 巻付け動作の開始時間と終了時間を抽出する.
- (3) 開発した Fig.5 に示すインターフェースにおいて, 試行した巻付け方法 (左軸巻付けもしくは右軸巻付け) を選択し, 画面右上の欄に巻付け動作の開始

時間と終了時間を入力する.

- (4) 巻付け動作において, 熟練医と比較した左右の手首角度の使用状況の評価結果が表示される. 閾値線による識別に基づき, 左右の手首角度の使い方が熟練医の領域に収まる場合には青色, 回転不足の場合には黄色, 時間が長すぎる場合には評価できないとして赤色, 回転不足かつ時間が長すぎる場合は黒色を画面下段に表示する. 同時に, 青色でない場合, 熟練医による操作との差を, 訓練者による作業時間 T において閾値線から算出される鉗子角度の閾値 f_{thi} からの実際の鉗子角度 f_i のずれの割合 $f_i/f_{thi} \times 100\%$ により表示する.



- (a) Select either C-loop or Reversed C-loop.
- (b) Input start and end time of wrapping in ligation.
- (c) Displaying angle f_i of skilled surgeon and trainee at wrapping in ligation.
- (d) Presenting the difference compared with skilled surgeons by color and ratios.
- (e) Evaluation result for the right hand.
- (f) Evaluation result for the left hand.

Fig.5 Developed interface for displaying evaluation result

4. 鉗子装着型の手首角度計測デバイスの開発

開発中のトレーニングボックス環境 (以下, Dry 環境) において, 角度情報の取得のために使用している Omni は設置型の計測装置であるので, 実際の手術環境では使用することが出来ず, 実際の手術現場に近い環境下での検証が行えない. そこで, 鉗子に取付け可能な装着型の手首角度計測デバイスを開発した.

(1) Wet 環境用手首角度計測デバイス

開発した Wet 環境用の手首角度計測デバイスを Fig.6 に示す. 角度の計測には, 9 軸センサ (KP-9250) を用いて行う. KP-9250 は, 加速度センサ, ジャイロセンサ, 地磁気センサを内蔵するセンサ MPU-9250 を搭載するモジュールである. 各信号は, サンプリング周波数約 40Hz で取得している. 角度計測デバイスは, L 字金具によって鉗子に取り付けられる.

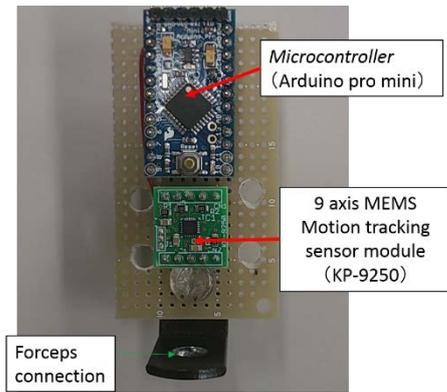


Fig.6 9 axis sensor for Wet environment

(2) Dry 環境用手首角度計測デバイス

開発中のトレーニングボックス環境においても、同様のセンサを用いた計測を行うために、専用の角度計測デバイスを開発した。開発した Dry 環境用の手首角度計測デバイスを Fig.7 に示す。Dry 環境用の角度計測デバイスでは、位置計測用に Omni を使用することもできるように、Omni 専用の取付け用の穴を備えている。

Dry 環境用, Wet 環境用それぞれの鉗子に手首角度計測デバイスを取り付けた状態の図を Fig.8 に示す。これらのセンサ付鉗子によって、手術現場に近い環境下でも熟練医や研修医の操作データを取得できる。

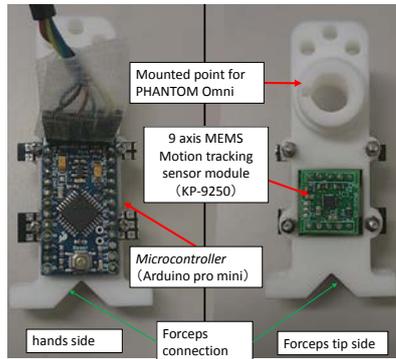


Fig.7 9 axis sensor for Dry environment



Fig.8 Forceps with which 9 axis sensor was attached (Upper: for Wet environment, Lower: for Dry environment)

(3) 手首角度算出方法

手首角度は、9 軸センサの内、加速度センサとジャイロセンサの出力値を利用して算出する。慣性座標系(x, y, z)を z, y, x 軸の順にそれぞれ ψ , θ , φ 回転させたときのセ

ンサ座標系を (x_s, y_s, z_s) とする。この時、加速度センサの出力 $[a_x, a_y, a_z]$ は、静止状態では重力加速度のみが計測される。重力加速度の値は、慣性座標系における z 軸方向に対して常に 1 となるように出力調整されるため、加速度センサの出力は、(9)式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C\psi C\theta & S\psi C\theta & -S\theta \\ -S\psi C\varphi + C\psi S\theta S\varphi & C\psi C\varphi + S\psi S\theta S\varphi & C\theta S\varphi \\ S\psi S\varphi + C\psi S\theta C\varphi & -C\psi S\varphi + S\psi S\theta C\varphi & C\theta C\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$C\varphi, C\theta, C\psi = \cos\varphi, \cos\theta, \cos\psi$$

$$S\varphi, S\theta, S\psi = \sin\varphi, \sin\theta, \sin\psi$$

したがって、(9)式の第 2 行の両辺を第 3 行の両辺で割ると(10)式が得られ、右辺の逆関数を考えると、時刻 $t=k$ における手首角度に相当する角度 φ_k は、(11)式で与えられる。

$$\frac{a_y}{a_z} = \frac{C\theta S\varphi}{C\theta C\varphi} = \tan\varphi \quad (C\theta \neq 0) \quad (10)$$

$$\varphi_k = \tan^{-1} \frac{C\theta S\varphi}{C\theta C\varphi} = \tan^{-1} \frac{a_y}{a_z} \quad (C\theta \neq 0) \quad (11)$$

加速度センサの出力値は、動加速度環境では、重力加速度以外の加速度値を含む。したがって、動加速度環境では正しい手首角度が得られない。そこで、加速度センサの出力値が 1 より δ 以上大きくなった時には、動加速度環境下であるとして、ジャイロセンサの出力値を用いて手首角度の変化を計測し、動加速度環境下になる直前の加速度センサの値と足し合わせることで手首角度の算出を行う。ここで、 δ は、予め計測により決定した定数である。

動加速度環境下における $t=k$ 時の手首角度 φ_k は、(12)式、(13)式で算出される。

$$\varphi_{gyro_k} = \varphi_{gyro_{k-1}} + \omega_{x_k} \times dt \quad (12)$$

$$\varphi_k = \varphi_{gyro_k} + \varphi_{acc} \quad (13)$$

ただし、

ω_{x_k} : $t=k$ における x 軸周りのジャイロセンサの出力値

dt : サンプル時間

$\varphi_{gyro_{k-1}}$, φ_{gyro_k} : $t=k-1$ および $t=k$ におけるジャイロセンサの出力値

φ_{acc} : 動加速度環境下になる直前の(10)式で与えられる手首角度(φ)

この手首角度 φ_k の変化から、3. (3) の計算方法を用いて、手首角度に相当する量 F_i を計算する。

5. Dry 環境下での識別率算出実験

提案した識別方法の有効性を確かめるため、識別率算

出実験を行った。ここで、計測した医師の利き手はすべて右手である。

(1) Co-axial position での実験

特に手技が優れた熟練医 1 名 4 回分、研修医 18 名 21 回分の Co-axial での結紮作業の計測データを用いて、3. (4) の評価方法に基づいて閾値線を求めた。次に、熟練医 6 名 9 回分、研修医 18 名 21 回の結紮作業の計測データが、閾値線で分離された熟練医と研修医の領域内にそれぞれのデータが収まる割合を識別率として算出した。

また、(14)式を用いて、作業時間 T において閾値線から算出される鉗子角度の閾値 f_{thi} と実際鉗子角度 f_i の差 f_{di} を算出し、これを変数として Welch の t 検定[8]を行うことで、熟練医と研修医の特徴量に有意差があるかを検証した。条件は、片側検定、有意水準 $p=0.05$ とした。Welch の t 検定とは、2つの群のデータ間の平均値の差が意味のある差(有意差)であるかを検定するものであり、実際の差が偶然発生したものである確率 p 値を求め、 p が事前に決めた優位水準以下であるとき、2つの群のデータに有意差があるとするものである。

$$f_{di} = f_i - f_{thi} \quad (i = 1,2) \quad (14)$$

求めた閾値線と全データの識別結果を Fig.9 に、それぞれの識別率と welch の t 検定による p 値を Table 1 に示す。

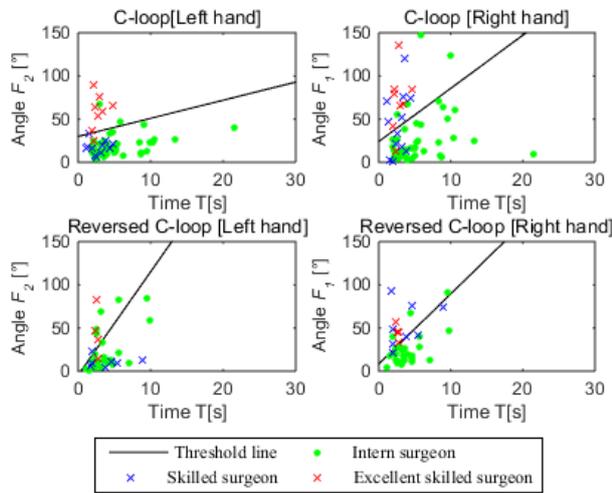


Fig.9 Distinction result for Co-axial in Dry environment

結果より、研修医においては、最低でも 83%以上の高い精度で正しく識別できている。よって、研修医がトレーニングを行う際に、熟練医と誤識別する可能性は低いいため、トレーニングの評価方法として使用できると考えられる。しかし、熟練医においては、最低で 36%という識別率であり、他の部分でも低い識別率となった。これは、閾値線の作成に使用した熟練医のデータが、指導医の中でも特に腹腔鏡下手術に精通している医師であったため、閾値が必要以上大きくなってしまい、他の熟練医の識別率が低くなってしまったものと推測される。実際に、t

検定による p 値は、逆 C ループ時の左手の f_{d2} を除いて、有意水準 0.05 以下であり、有意差が存在する結果となっている。

また、熟練医であっても利き手が右手であるため、結紮作業が簡単な状況下では、逆 C ループ時に左手をあまり動かさずに作業をしてしまう事例が見られた。このため、熟練医と研修医の逆 C ループ時の左手の f_{d2} には有意差が存在しないという結果が得られたと考えられる。

したがって、評価方法の検証については、実際の現場により近い状況下で実験を行うことで、本来の操作難度での差異を確かめる必要がある。

Table 1 Distinction rate for Co-axial in Dry environment

Skilled surgeon	C-loop		Reversed C-loop		Ave.
	forceps		forceps		
	Left	Right	Left	Right	
Count	8/20	13/20	4/11	8/11	33/62
Rate[%]	40	65	36	72	53.2
Intern surgeon	C-loop		Reversed C-loop		Ave.
	forceps		forceps		
	Left	Right	Left	Right	
Count	40/42	39/42	20/24	21/24	120/132
Rate[%]	95	93	83	88	90.9
p	0.001	0.000	0.363	0.000	

(2) Para-axial での実験

熟練医 4 名 5 回分、研修医 14 名 14 回分の Para-axial での結紮作業の計測データを用いて、3. (4) の評価方法に基づいて閾値線を求め、再代入法によって閾値線で分離された熟練医と研修医の領域内にそれぞれのデータが収まる割合を識別率として算出した。また、Para-axial では、データ点数が少ないため、外れ値の影響を小さくするために、Welch の t 検定ではなく、Mann-Whitney の U 検定[9]を行うことで、熟練医と研修医の特徴量に有意差があるかを検証した。条件は、片側検定、有意水準 $p=0.05$ とした。Mann-Whitney の U 検定とは、2つの群のデータ間の中央値の差が意味のある差(有意差)であるかを検定するものである。

求めた閾値線と全データの識別結果を Fig.10 に、それぞれの識別率と Mann-Whitney の U 検定による p 値を Table 2 に示す。

逆 C ループ時の左手に関しては、熟練医と研修医の特徴量の差異が Co-axial に比べて大きくなっており、識別率も多少向上した。また、 p 値も有意水準 0.05 以下であり、有意差は存在するといえる。これは、Para-axial での操作によって操作難易度が上がったため、特徴が大きくなったものと考えられる。しかし、使用している Web カメラでは、実際の Para-axial で使用する腹腔鏡と比較して映像の方向が異なることや、カメラが大きくて患部に近づくことが出来なかったことにより、熟練医と研修医の

双方にとって操作の難易度が上がり過ぎてしまった。そのため、右手に関しては差異があまり生じず、特に逆Cループ時には、時間と手首角度変化量が比例する閾値線とならなかった。これにより、右手は識別率も低く、U検定でも有意差が存在しないという結果となった。

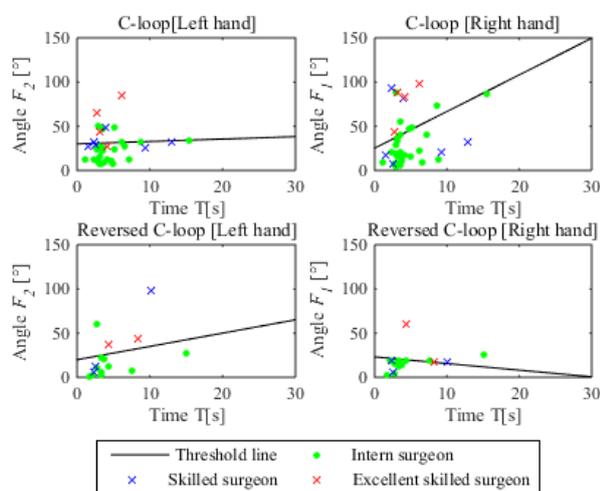


Fig.10 Distinction result for Para-axial in Dry environment

Table 2 Distinction rate for para-axial in Dry environment

Skilled surgeon	C-loop		Reversed C-loop		Ave.
	forceps		forceps		
	Left	Right	Left	Right	
Count	5/10	6/10	3/5	3/5	17/30
Rate[%]	50	60	60	60	56.7
Intern surgeon	C-loop		Reversed C-loop		Ave.
	forceps		forceps		
	Left	Right	Left	Right	
Count	25/29	22/29	10/11	9/11	66/80
Rate[%]	86	76	91	81	82.5
p	0.001	0.086	0.034	0.1337	

6. Wet 環境下での識別率算出実験

トレーニングボックス環境で見られた手首角度変化の特徴が、実際の手術現場に近い環境でも見られるかどうかを確認するために、豚の体内で操作する結紮作業のデータを計測し、Dry 環境下での識別率算出実験と同様の識別率算出を行った。ここで、計測した医師の利き手はすべて右手である。

(1) Co-axial での実験

熟練医 3 名 3 回分、研修医 9 名 9 回分の Co-axial での結紮作業の計測データを用いて、5. (2) Para-axial での実験と同様の方法で識別率と Mann-Whitney の U 検定の p 値を算出した。求めた閾値線と全データの識別結果を Fig.11 に、それぞれの識別率と p 値を Table 3 に示す。

Co-axial においては、逆 C ループ時の左手を除いて熟練医と研修医共に特徴量の差異が大きく、高い識別率が

得られ、U 検定により有意差も存在することが確認できた。しかし、逆 C ループ時の左手においては、閾値線が正しく引けず、U 検定でも有意差が存在しないという結果となった。よって、Co-axial での操作については、左手の特徴量の差異は、生じにくいといえる。

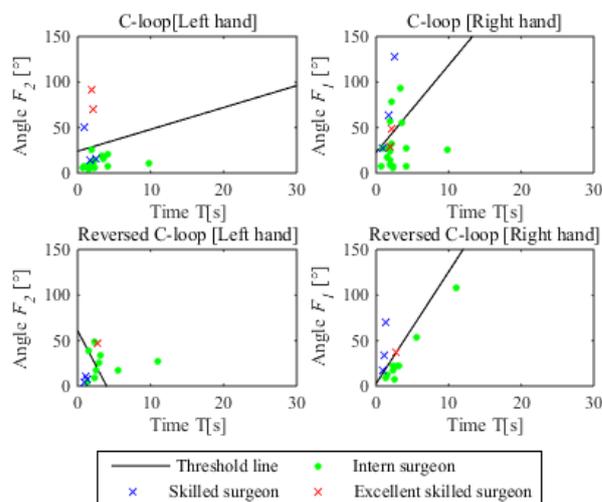


Fig.11 Distinction result for Co-axial in Wet environment

Table 3 Distinction rate for Co-axial in Wet environment

Skilled surgeon	C-loop		Reversed C-loop		Ave.
	forceps		forceps		
	Left	Right	Left	Right	
Count	3/5	3/5	1/4	3/4	10/18
Rate[%]	60	60	25	75	55.6
Intern surgeon	C-loop		Reversed C-loop		Ave.
	forceps		Forceps		
	Left	Right	Left	Right	
Count	17/17	14/17	3/9	9/9	43/52
Rate[%]	100	82	33	100	82.7
p	0.002	0.017	0.926	0.001	

(2) Para-axial での実験

熟練医 3 名 3 回分、研修医 6 名 6 回分の Para-axial での結紮作業の計測データを用いて、5. (2) Para-axial での実験と同様の方法で識別率と Mann-Whitney の U 検定の p 値を算出した。求めた閾値線と全データの識別結果を Fig.12 に、それぞれの識別率と p 値を Table 4 に示す。

Para-axial においては、逆 C ループ時の左手において熟練医と研修医共に特徴量の差異が大きく、非常に高い識別率が得られた。しかし、それ以外については、熟練医の操作が研修医の操作に誤識別された。特に、C ループ時の左手と逆 C ループ時の右手においては、U 検定により有意差は存在しないという結果となった。ただし、今回は熟練医のデータが非常に少なかったため、今後は検証データ数を増やすことが必要である。

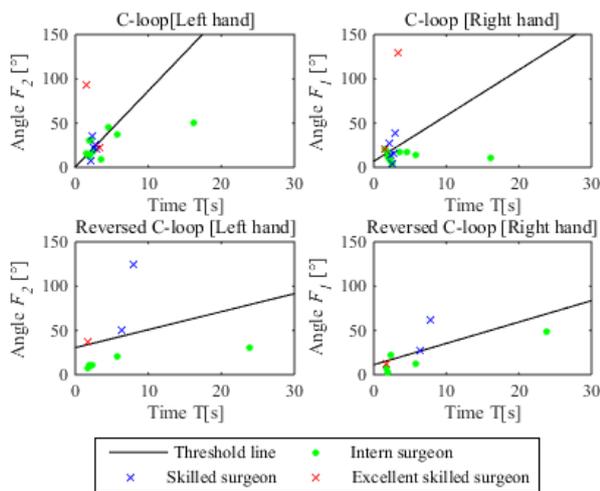


Fig.12 Distinction result for Para-axial in Wet environment

Table 4 Distinction rate for para-axial in Wet environment

Skilled surgeon	C-loop		Reversed C-loop		Ave.
	forceps		forceps		
	Left	Right	Left	Right	
Count	3/7	4/7	3/3	1/3	11/20
Rate[%]	43	57	100	33	55.0
Intern surgeon	C-loop		Reversed C-loop		Ave.
	forceps		Forceps		
	Left	Right	Left	Right	
Count	6/10	9/10	5/5	4/5	24/30
Rate[%]	60	90	100	80	80.0
p	0.268	0.017	0.018	0.071	

7. 結言

本研究では、結紮作業における巻付け動作に対して、訓練者が一人で左右の手首の使い方を訓練できるトレーニングシステムを提案し、その評価方法の有効性を Co-axial および Para-axial の双方の結紮作業で検証した。また、実際の手術現場に近い環境においても、Dry 環境下と同様に、熟練医と研修医の手首角度変化に差異が現れるかどうかを検証するために、9 軸センサを利用した手首角度計測デバイスを開発し、生体内での操作データからも、手首角度 F_i と作業時間 T が両手操作の協調トレーニングの特徴量として有効であるかどうかを検証した。結果として、特に手技が優れた熟練医以外の熟練医を研修医として識別してしまうことがあったが、研修医を熟練医として識別することはほとんどなかった。このため、今回使用した特徴量はトレーニング用途として利用できるものと考えられる。しかし、現時点では、各環境下における操作データ数が少ないため、提案した評価方法の確実な有効性が示せていない。したがって、更なるデータの計測と検証が必要である。

また、Para-axial での操作の方が一般に操作難度が高いため、利き手の逆である左手の特徴量の差が出やすい傾

向が得られた。一方 Co-axial では、熟練医の操作データの中から、より明確な差異を示す特徴量を持つデータを抽出して閾値線を作ることにより、識別率が向上すると考えられる。さらに、Para-axial での操作において、Dry 環境下よりも Wet 環境下の方が、特徴量の差異が大きく生じていることが分かった。したがって、トレーニングシステムと実際の環境には少なからずギャップがあるため、トレーニングボックスの改良も必要である。

加えて、リアルタイムで巻付け動作の自動識別ができれば、提案する評価方法により、訓練者が巻付けに手間取っている時、手首を使用するように提示するトレーニングシステムを構築することができる。そのため、今後は巻付け動作を自動識別することも求められる。

参考文献

- 1) A.K. Madan, C.T. Frantzides, N. Shervin, and C.L. Tebbitt: Assessment of individual hand performance in box trainers compared to virtual reality trainers, *The American Surgeon*, Vol.69, No.12, pp.1112-1114, 2003.
- 2) 栗田雄一, 羽山裕也, 小笠原司, 川原知洋, 吉満政義, 岡島正純, 恵木浩之, 大段秀樹: 「力に基づく内視鏡外科用鉗子操作の自動識別とスキル評価」, *生体医学工学*, Vol.50, No.6, pp.581-590, 2012
- 3) 山下実, 植村宗則, 松岡紀之, 家入里志, 大内田研宙, 赤星朋比古, 富川盛雅, 池田哲夫, 橋爪誠: 「内視鏡外科手術における縫合技術評価法の有用性に関する研究」, *日本コンピュータ外科学会誌*, Vol.17, No.1, pp.15-22, 2015
- 4) 安藤英由樹, 近藤大祐, 飯塚博之, 小濱和貴, 坂井義治, 前田太郎: 「画像合成・切替を用いた腹腔鏡手術トレーニングシステムと評価方法の提案」, *電子情報通信学会技術研究報告. HCS, ヒューマンコミュニケーション基礎*, Vol.113, No.72, pp.195-200, 2013
- 5) C. Ishii, T. Sato, K. Murano and H. Kawamura: Automatic Identification for Laparoscopic Surgical Procedure for Ligation and Online Distinction of Abnormal Manipulation for Thread Knotting, *International Journal of Clinical Medicine*, Vo.6, No.12, pp.887-898, 2015.
- 6) 木口量夫, 吉野広大, 林善章, 植村宗則, 富川盛雅, 橋爪誠: 「腹腔鏡手術における鉗子操作時の熟練医と初心者の違い」, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, pp.1P1-001(1)-1P1-001(2), 2012
- 7) 橋爪誠, 小西晃造, 岡崎賢, 田上和夫: 「安全な内視鏡外科手術のための基本手技トレーニング」, 大同学館出版, 2006
- 8) B. L. Welch: The Significance of the Difference Between Two Means when the Population Variances are Unequal, *Biometrika*, Vol. 29, No. 3/4, pp.350-362, 1938.
- 9) 森敏昭, 吉田寿夫: 「心理学のためのデータ解析テクニカルブック」, 北大路書房, 1990