

調高負荷タービン翼列の2次元圧縮性流れの数値解析；出口マッハ数と入射角の影響

KURAMOTO, Yuki / 蔵本, 結生

(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/10.15002/00014110>

腹腔鏡下手術トレーニングシステムの開発 — 結紮手技に対する評価システムの提案 —

DEVELOPMENT OF A TRAINING SYSTEM FOR LAPAROSCOPIC SURGERY
- PROPOSAL OF EVALUATION SYSTEM FOR SURGICAL SKILL IN LIGATION -

小林竜也

Tatsuya KOBAYASHI

指導教員 石井千春 教授

法政大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程

In this study, a novel training system to train a ligation operation in laparoscopic surgery developed in the previous study was extended. First, the difference of the required time, operating force of the forceps, sudden operation of the forceps and position of the forceps in the ligation operated by skilled surgeon and intern surgeon was investigated. Next, the ligation operation performed by the skilled surgeon was set as target operation. Then, an evaluation system in which an operator's skill is evaluated on the basis of the target operation was developed in terms of the required time, operating force of the forceps, sudden operation of the forceps and position of the forceps in the ligation. The developed evaluation system was incorporated into the training system developed in the previous study, in which the operator's operating force of the forceps is measured by strain gauges and the operator's sudden operation of the forceps and position of the forceps are measured by PHANTOM Omni attached to the forceps. Thus, the operator can train a ligation operation under the fixed criteria.

Key Words: *Laparoscopic surgery, Training system, Strain gauge, PHANTOM Omni, Ligation*

1. 緒論

近年、腹腔鏡下手術の施術数が増加している。腹腔鏡下手術は、開腹手術とは異なり、大きく皮膚を切り開くことなく、皮膚にあけた小さな孔から鉗子と腹腔鏡を挿入し、腹腔鏡による映像を見ながら鉗子により手術を行う。低侵襲医療であるが、高い技術力が求められ、腹腔鏡下手術の安全性の向上にはトレーニングが要求される。腹腔鏡下手術のトレーニングを行う際には、腹腔鏡下手術シミュレータが用いられている。主にトレーニングボックスと呼ばれるものが多く用いられており、Endowork-ProII の様にカメラで撮影した映像をモニター上に映し、モニターを見ながら手術で使用する実際の鉗子や縫合糸を用いてボックスの中で縫合、結紮等のトレーニングを行える。また、Lap VR[™]、LAP Mentor[™] という VR (バーチャルリアリティ) シミュレータがある。触覚・視覚を疑似化したトレーニングシステムであるため、物体を動かすトレーニングや摘出手術といった様々な状況下のトレーニングが行える腹腔鏡下手術シミュレータである。

トレーニングボックスは安価であり、コストパフォー

マンスに優れた腹腔鏡下手術シミュレータである[1]が、手術操作の定量的な評価が出来ない。VR シミュレータは手術操作の定量的な評価ができ、トレーニングボックスよりも効果的に練習が出来る[1]-[3]が、大掛かりな装置であり高価である。そこで本研究では、特定の手術操作を習得するための安価で定量的な評価のできるトレーニングシステムの開発を進めている。

文献[4]では、鉗子にひずみゲージを貼り付け、鉗子の操作量を測定することで、腹腔鏡下手術における鉗子の4つの基本操作を自動分類する手法を提案しており、文献[5]は、特に繊細な手技が必要とされる縫合作業に着目し、縫合作業における鉗子操作を7つの手技に分類し、鉗子の操作量と鉗子に貼り付けたひずみゲージの測定値により手技を自動識別し、識別された手技に対して通常操作と異常操作の判別を行っている。文献[6]では、結紮操作を対象に、結紮操作における動作を7種類に分類し、動作の自動識別を行い、その中で最も危険度の高い糸結び動作に対して、異常操作判別を行い、異常操作と判定された時に術者に警告するシステムを開発している。文献[7]では、結紮操作において糸を鉗子に巻き付ける動作中

の手首の回転量を計測することで、左右鉗子の協調作業に対する評価を行えるトレーニングシステムを開発している。

トレーニングの際、熟練医が訓練者に対して「もっと強く」など、力の程度を言葉で伝えることがあるが、言葉だけでは訓練者が理解しにくいという問題点について熟練医から指摘があった。そこで先行研究[8]では、結紮操作を対象として、まず結紮操作を10種類の動作に分類し、鉗子の操作量に基づき自動動作識別を行った。次に、各動作において熟練医の鉗子操作力を目標値に設定し、動作毎に鉗子操作力の目標値と訓練者自身の鉗子操作力をモニター上に提示した。訓練者に鉗子操作力を視覚提示することにより、訓練者は適切な鉗子操作力を容易に把握できるようになった。さらに、文献[9]で指摘している、「意識してゆっくり鉗子を動かす」、「疲れない姿勢で操作する」という結紮操作時の留意点を考慮し、異常操作である突発動作と力みを検知し、訓練者に提示することで理想的な結紮操作を習得出来るトレーニングシステムを開発した。

また、トレーニングボックスを用いた訓練の際に、指導医によって評価基準が異なり、一定の評価基準で指導することが困難であるという問題点について熟練医から指摘があった。本研究では、結紮操作を対象とし、熟練医と研修医の結紮操作時間、鉗子操作力、突発動作、鉗子位置の差について検証を行う。これより、先行研究のトレーニングシステムに加え、結紮操作時間、鉗子操作力、突発動作、鉗子位置を評価項目として、特に高い技術を持つ熟練医の操作を基準として、訓練者に熟練医による操作との差を提示するシステムを提案する。これにより、一定の評価基準の下で手術操作の評価を行うことが可能になる。

これらを踏まえて、鉗子操作力の提示と突発動作に対する警告を行う、従来のトレーニングシステムをトレーニングモードとし、新たにテストモードと評価システムによる結果表示画面を導入して、計3つのモードから成るトレーニングシステムに拡張する。トレーニングモードで結紮操作をトレーニングした後、テストモードで結紮操作を行って手技データを取得し、評価システムにて評価結果を提示する。

2. トレーニングボックス

本研究では、図1に示すトレーニングボックスを用いる。鉗子として持針器を使用し、手術操作を行う際には左右の持針器を操作する。各鉗子は位置のセンシングが可能なデバイス PHANTOM Omni に接続され、鉗子の操作量を測定できるようになっている。また、図2に示すように、鉗子のハンドル部と軸にひずみゲージを貼り付けて、把持力と鉗子軸先端にかかる力を測定できるようになっている。

腹腔鏡に見立てて設置したウェブカメラの映像をモニ

ターに提示し、中央に置かれた飴ゴムに対して、縫合糸を用いて手術操作を行う。トロッカーの配置がダイヤモンド式となるようにアクリル板に穴が開けられており、ウェブカメラの取り付け位置を変えることで Co-axial position と Para-axial position による手術ポジションを変更することができる。図3に示すように、Co-axial position は術者の視線と同じく鉗子と患部を正面から覗く形に映し出しており、Para-axial position は鉗子と患部を横から覗きこむ形に映し出すポジションである。また、アクリル板は木材に取り付けており、角度と高さ調整が可能となっている。

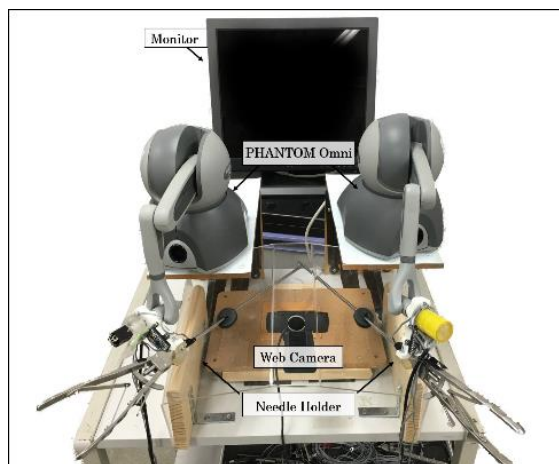


Fig.1 Training box

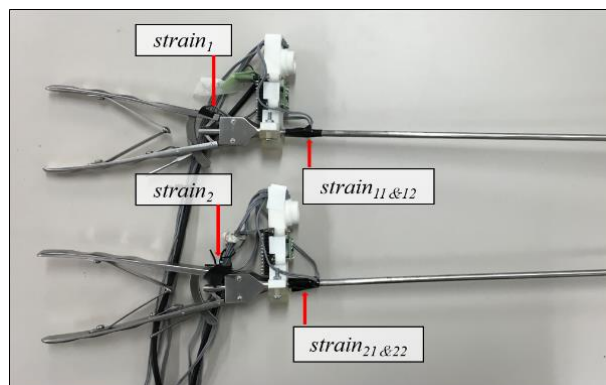


Fig.2 Position of strain gauges

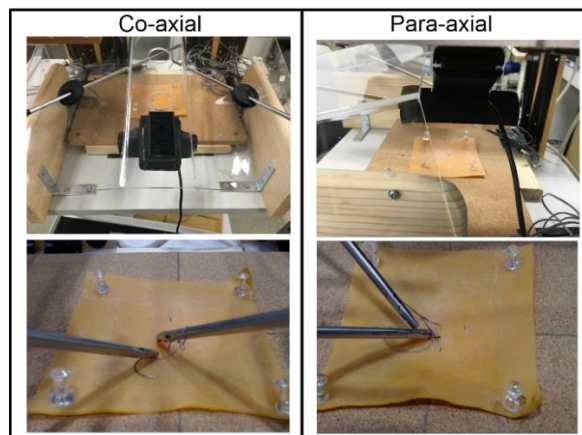


Fig.3 Co-axial position and Para-axial position

3. 結紮操作

本研究では、手術操作として結紮操作を対象とし、結紮操作の一連の動作を以下の10種類の動作に分類する。

- ① 把持(右)：右鉗子で糸を持つ動作
- ② 巻き付け(左軸)：右鉗子で持った糸を左鉗子軸に巻き付ける動作
- ③ 移動(左)：巻き付け後、左鉗子をもう一方の糸まで移動させる動作
- ④ 両手把持：両鉗子とも糸を持つ動作
- ⑤ 糸結び開始：糸を持った両鉗子を左右に引っ張り始める動作
- ⑥ 糸結び引張：糸を引っ張り、糸結び目をつくる動作
- ⑦ 把持(左)：左鉗子で糸を持つ動作
- ⑧ 巻き付け(右軸)：左鉗子で持った糸を右鉗子軸に巻き付ける動作
- ⑨ 移動(右)：巻き付け後、右鉗子をもう一方の糸まで移動させる動作
- ⑩ 中立：動作を行っていない状態

結紮操作は、①→②→③→④→⑤→⑥または⑦→⑧→⑨→④→⑤→⑥の順番で3回交互に行われる。図4に①～⑨の動作を示す。以下では、④から⑥の状態を糸結び動作として記す。

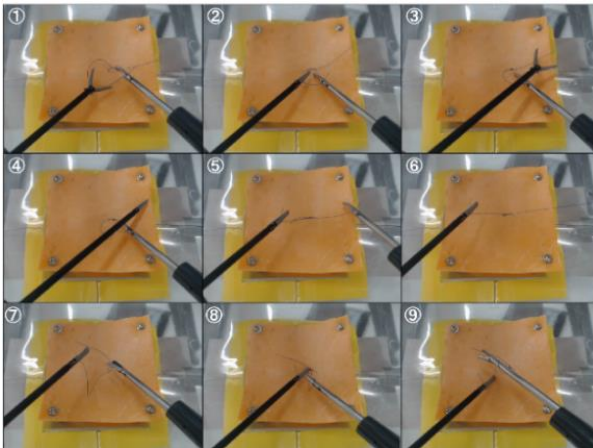


Fig.4 Operation of ligation

4. トレーニングシステムの拡張

(1) テストモードと評価システムの導入

先行研究[8]で開発したトレーニングシステムを拡張するために、結紮操作の手技データを取得するためのテストモードと、取得した手技データの評価を行い、評価結果を表示するための評価システムを新たに導入する。評価システムにおける評価項目の詳細を次節に記す。

(2) 評価項目

a) 結紮操作時間

3回の結紮操作に要した時間を評価する。

b) 鉗子操作力

鉗子操作力は、糸結び動作時の把持力と鉗子軸先端にかかる力を評価する。左右の鉗子のハンドル部に貼り付けられたひずみゲージの測定値 $strain_1$ (右) と $strain_2$ (左)

により、各鉗子の把持力が得られる。また、右鉗子の軸上部と右側部、左鉗子の軸上部と左側部に貼り付けたひずみゲージの測定値 $strain_{i1}$ と $strain_{i2}$ ($i=1$: 右, $i=2$: 左) により、鉗子軸先端にかかる力 S_i が式 (1) により算出される。

$$S_i = \sqrt{strain_{i1}^2 + strain_{i2}^2} \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

c) 突発動作

急な鉗子操作は、縫合糸に負荷をかけ、縫合糸を傷つける恐れや、鉗子を臓器等にぶつける可能性があり、危険な動作である。各鉗子を取り付けた PHANTOM Omni により得られる速度情報を鉗子の操作速度とする。

速度 $Vphantom_i$ を、PHANTOM Omni のアーム先端のそれぞれの方向速度 Vpx_i , Vpy_i , Vpz_i ($i=1$: 右, $i=2$: 左) を用いて式 (2) により算出する。

$$Vphantom_i = \sqrt{Vpx_i^2 + Vpy_i^2 + Vpz_i^2} \quad (i = 1, 2) \quad (2)$$

本測定機器では回転によって操作速度が瞬間的に大きくなる傾向がみられたので、回転の影響を低減するために、 $Vphantom_i$ の N サンプル区間 ($N=128$) におけるバッファ単位の絶対平均値を操作速度とする。

$$Vp_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Vphantom_i(n) \quad (i = 1, 2) \quad (3)$$

非医療従事者である被験者が事前に行った突発動作の操作速度データから、突発動作の操作速度閾値を設定した。結紮操作中、鉗子の操作速度が閾値以上になれば突発動作と識別され、突発動作の回数をカウントする。

d) 鉗子位置

結紮操作は、糸の結び目(結紮点)近くで行うことが理想的であり、結紮操作の巻き付け動作時の糸を持ち、巻き付ける鉗子と結紮点の最長距離によって評価する。鉗子の先端位置の座標を PHANTOM Omni のアームの関節角度から順運動学により算出する。2本の鉗子の先端位置の座標系を一致させるため、図5に示すように基準座標を結紮点に設定する。基準座標から鉗子先端までの座標変換を同次変換行列によって表す。

同次変換行列によって、基準座標から見た鉗子の先端位置の座標 (x, y, z) は式(4)で求められる。ただし、 T' は基準座標から PHANTOM Omni の設置位置までの並進及び回転を表す同時変換行列、 ${}^i T_{i+1}$ は図6の PHANTOM Omni の関節角が θ_{i+1} 回転したときの同時変換行列、 T'' は PHANTOM Omni のペン先に取り付けられた鉗子結合部から鉗子の先端位置への並進を表す同時変換行列である。図6に PHANTOM Omni の関節角、図7に鉗子と PHANTOM Omni の結合部を示す。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = T' {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 T'' \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T' = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & a \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 & -d \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & \sin \theta_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_3 & 0 & \cos \theta_3 & -e \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & 0 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & \sin \theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_5 & 0 & \cos \theta_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & f \\ 0 & \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 \\ 0 & \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T'' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -g \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

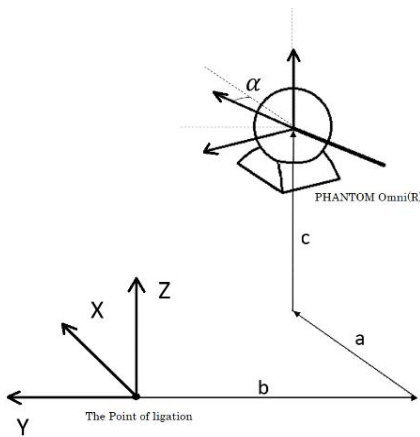


Fig.5 Reference coordinates

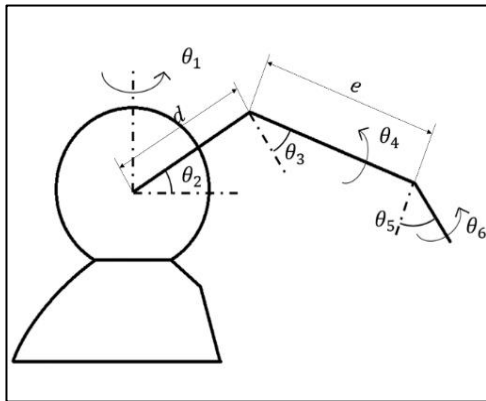


Fig.6 Joint angles of PHANTOM Omni

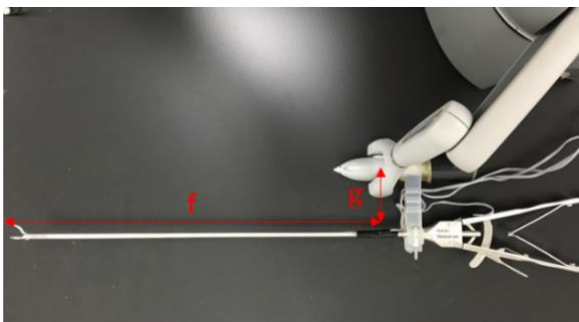


Fig.7 Attachment of forceps on PHANTOM Omni

5. 実験と考察

本研究では、以下に示す3種類の実験を行った。1つ目はトレーニングボックスを用いて結紮操作を行い、4.(2)節で設定した評価項目において、実際に熟練医と研修医にどの程度の差があるかを検証した。2つ目は糸結び動作時の鉗子操作力について、5か月後の研修医に成長具合が見られるかを検証した。3つ目は動物を対象として行った結紮操作において、熟練医と研修医の鉗子操作力にどの程度違いがあるかを検証した。

(1) トレーニングボックス実験

本実験の被験者は、腹腔鏡下手術の熟練医3名と研修医9名とした。図1の実験装置を用いて、飴ゴムに対して、Co-axial position, Para-axial positionそれぞれにおいて、ウェブカメラ映像下で結紮操作を3回ずつ行ってもらい、そのときの糸結び動作時の結紮操作時間、鉗子操作力、突発動作、鉗子位置を取得した。Co-axial positionとPara-axial positionでの違いによる結紮操作時間、鉗子操作力、突発動作、鉗子位置の差、およびこれらの評価項目における熟練医と研修医の差を比較検討した。

a) 結紮操作時間

結紮操作時間の結果を表1に示す。結紮操作時間は、Co-axial positionと比べてPara-axial positionでは熟練医と研修医ともに増加が多数みられ、平均値を比較しても増加している。また、熟練医の結紮操作時間はCo-axial positionでは平均39.1秒、Para-axial positionでは平均86.8秒であるが、研修医ではそれぞれ平均85.6秒、144.5秒であり、熟練医より研修医は時間を要している。2つのポジションにおいてそれぞれの目標時間を設定し、トレーニングシステムにより結紮操作時間の結果を表示することで、熟練医と研修医との差を埋める指標として利用できることが確認された。

Table 1 Required time for ligation

Subject	Time[s]	
	Co-axial position	Para-axial Position
Expert-1	35.9	115.5
Expert-2	43.7	62.3
Expert-3	37.6	82.6
Expert ave.	39.1	86.8
Intern-1	66.9	93
Intern-2	126.3	104.2
Intern-3	49.9	120
Intern-4	61.8	184.3
Intern-5	61.5	133.2
Intern-6	88.6	193.6
Intern-7	65.3	53.3
Intern-8	168.2	263.3
Intern-9	82.3	155.3
Intern ave.	85.6	144.5

b) 鉗子操作力

3回の結紮操作における糸結び動作時の平均鉗子操作力(保持力および鉗子軸先端にかかる力)を表2に示す。Co-axial positionとPara-axial positionでの鉗子操作力を比

較すると、熟練医と研修医ともに顕著な増減傾向は見られず、ポジションによる鉗子操作力への影響はないと考えられる。

Table 2 Average operation force of forceps for knotting

Subject	Voltage[mV]							
	Co-axial position				Para-axial position			
	Grasping(R)	Grasping(L)	Tip load(R)	Tip load(L)	Grasping(R)	Grasping(L)	Tip load(R)	Tip load(L)
Expert-1	0.129	0.236	0.373	0.403	0.099	0.341	0.267	0.395
Expert-2	0.049	0.166	0.240	0.298	0.043	0.201	0.198	0.319
Expert-3	0.106	0.187	0.321	0.520	0.089	0.271	0.315	0.560
Expert ave.	0.095	0.197	0.378	0.407	0.077	0.271	0.260	0.424
Intern-1	0.109	0.316	0.454	0.576	0.066	0.481	0.262	1.000
Intern-2	0.069	0.313	0.291	0.344	0.087	0.209	0.257	0.334
Intern-3	0.122	0.338	0.574	0.970	0.102	0.276	0.415	0.514
Intern-4	0.112	0.355	0.351	0.555	0.060	0.283	0.348	0.273
Intern-5	0.115	0.259	0.237	0.498	0.074	0.276	0.295	0.379
Intern-6	0.130	0.256	0.561	0.562	0.103	0.270	0.667	0.558
Intern-7	0.140	0.345	0.365	0.603	0.063	0.333	0.309	0.627
Intern-8	0.118	0.358	0.582	0.925	0.189	0.409	0.854	1.080
Intern-9	0.165	0.224	0.370	0.344	0.193	0.133	0.844	0.314
Intern ave.	0.120	0.307	0.421	0.597	0.104	0.297	0.472	0.564

そして、最も高い技術を持つ熟練医 1 名による 7 回の結紮操作の糸結び動作における各鉗子操作力（把持力（右）、把持力（左）、鉗子軸先端力（右）、鉗子軸先端力（左））ごとの平均値によって設定した目標値から、各鉗子操作力に対する誤差率を次式によって定める。

$$\text{誤差率} = \frac{(\text{測定値} - \text{目標値})}{\text{目標値}} \times 100 \quad (6)$$

さらに、把持力（右）、把持力（左）、鉗子軸先端にかかる力（右）、鉗子軸先端にかかる力（左）における誤差率の絶対値の平均を平均絶対誤差率とし、各被験者の Co-axial position での鉗子操作力の平均絶対誤差率を求め、熟練医と研修医の差を検討した。

結果を表 3 に示す。熟練医の平均絶対誤差率は 83%未満に収まっている。ここで、Expert-2 が目標値に設定した熟練医である。一方、研修医の平均絶対誤差率は 100%を超えてしまっている被験者が 3 名みられた。熟練医にも技術の差によりばらつきがあるものの、研修医の中には特に、鉗子軸先端にかかる力において大きな力で引っ張りすぎる傾向の医師が多く見られ、操作映像では一見同じ結紮操作に見えても、熟練医と研修医では鉗子操作力に差があることが確認された。

Table 3 Error rate of operation force of forceps for knotting

Subject	Error rate[%]				
	Grasping(R)	Grasping(L)	Tip load(R)	Tip load(L)	Absolute ave.
Expert-1	38.5	28.6	111.6	69.7	62.1
Expert-2	-47.1	-9.4	36.0	25.7	29.6
Expert-3	13.3	1.9	195.7	119.2	82.5
Intern-1	16.6	72.2	157.5	142.7	97.2
Intern-2	-25.6	70.6	65.1	44.8	51.5
Intern-3	30.9	84.2	225.8	308.6	162.4
Intern-4	20.0	93.1	99.3	134.0	86.6
Intern-5	23.1	40.8	34.4	109.7	52.0
Intern-6	39.0	39.3	218.2	136.8	108.3
Intern-7	49.8	88.0	107.3	154.2	99.8
Intern-8	26.8	95.2	230.3	289.8	160.5
Intern-9	76.3	21.8	109.8	45.0	63.2

c) 突発動作

突発動作の回数結果を表 4 に示す。突発動作の回数は、熟練医が全員 0 回であるのに対し、1, 2 回突発動作を行った研修医が 3 名見られた。突発的な動作は危険であるとされるため、研修医に突発動作の回数を提示することはトレーニングの指標になると考えられる。

Table 4 Number of times of sudden operation

Subject	Number of times of sudden operation			
	Co-axial position		Para-axial position	
	Right forceps	Left forceps	Right forceps	Left forceps
Expert-1	0	0	0	0
Expert-2	0	0	0	0
Expert-3	0	0	0	0
Intern-1	0	0	0	0
Intern-2	0	0	0	0
Intern-3	0	0	2	0
Intern-4	0	0	0	0
Intern-5	0	0	0	0
Intern-6	0	0	0	0
Intern-7	0	0	2	0
Intern-8	1	1	0	1
Intern-9	0	0	0	0

d) 鉗子位置

鉗子位置の測定結果を表 5 に示す。今回の実験では熟練医と研修医に顕著な差がみられなかった。しかし、距離を用いた定量的な評価が可能のため、評価項目とすることで、結紮点から遠いところでの結紮操作を抑制することが期待できる。

Table 5 Position of forceps

Subject	[mm]	
	Co-axial position	Para-axial position
Expert-1	44	57
Expert-2	52	60
Expert-3	48	74
Expert ave.	48	64
Intern-1	37	51
Intern-2	56	43
Intern-3	40	41
Intern-4	58	61
Intern-5	50	54
Intern-6	58	68
Intern-7	57	57
Intern-8	57	55
Intern-9	45	52
Intern ave.	51	54

(2) 成長比較実験

本実験の被験者は、腹腔鏡下手術の研修医 4 名とした。2015 年 10 月、2016 年 3 月に、図 1 の実験装置を用いてウェブカメラのみの映像下で、飴ゴムに対して結紮操作をそれぞれ 3 回ずつ行ってもらい、糸結び動作時の鉗子操作力を取得し、目標値との誤差率を算出した。5 か月の経過による研修医の鉗子操作力の成長具合を見ることで、普段のトレーニングにおける指導医の言葉による力加減の指導の効果を検討する。

実験結果を表 6 に示す。また、図 8 に Intern-D の誤差率を示す。表 6 より、5 か月後の結紮操作においては、把持力は全員が 100%未満になり、指導医である目標値に設定した熟練医に近づいているが、鉗子軸先端にかかる力は増加した研修医がおり、Intern-D のように 200%を超えるような大きい力で糸を引っ張っている研修医も見られた。糸を引っ張る力は、力加減を言葉によって伝える普段のトレーニングでは習得が難しいと考えられる。先行研究[8]では、力加減を視覚提示するトレーニングシステムを用いることで、非医療従事者が目標範囲内の力加減を習得することに効果があったため、力加減を習得するには、言葉による指導よりも、力加減を視覚提示する方が研修医のトレーニングに有効であると期待できる。

Table 6 Progress of operation force of forceps by training

Subject	Error rate[%]									
	Oct. 2015					Mar. 2016				
	Grasping(R)	Grasping(L)	Tip load(R)	Tip load(L)	Absolute ave.	Grasping(R)	Grasping(L)	Tip load(R)	Tip load(L)	Absolute ave.
Intern-A	110.4	191.1	171.8	233.8	176.8	16.6	72.2	157.5	142.7	97.2
Intern-B	80.4	62.9	3.3	-28.2	43.7	20.0	93.1	99.3	134.0	86.6
Intern-C	2.3	83.3	44.2	164.5	73.5	49.8	88.0	107.3	154.2	99.8
Intern-D	178.7	102.3	272.5	194.9	187.1	26.8	95.2	230.3	289.8	160.5

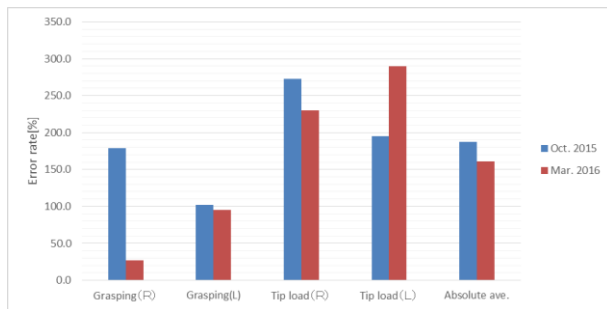


Fig.8 Error rate of Intern-D

(3) 動物を対象とした鉗子操作力の比較実験

動物を対象として、腹腔鏡下手術の熟練医 3 名と研修医 7 名に同じくカメラのみの映像下で結紮操作を 3 回ずつ行ってもらい、そのときの鉗子操作力を取得した。鉗子は動物に対しても使用することが出来る鉗子に変更し、ひずみゲージを取り付けて使用した。熟練医と研修医の鉗子操作力の平均値を比較し、結紮を行う対象物が動物の場合でも、熟練医と研修医の鉗子操作力に違いがあるかを検討した。

得られた鉗子操作力のそれぞれの平均値を表 7 に示す。研修医は熟練医と比べて、鉗子軸先端にかかる力(右)が大きい傾向が見られた。対象物が動物の内臓の場合でも、熟練医と研修医では鉗子操作力に差があることが確認された。これより、動物を対象としたトレーニングにおいても、本トレーニングシステムを用いることで鉗子の力加減を習得できることが期待できる。

Table 7 Average operation force of forceps for in vivo knotting

Subjects	Grasping(R)	Grasping(L)	Tip load(R)	Tip load(L)
	Voltage[mV]			
Expert-A	0.050	0.067	0.157	0.233
Expert-B	0.050	0.110	0.563	0.420
Expert-C	0.083	0.203	0.573	0.410
Total	0.061	0.127	0.431	0.354
Intern-A	0.070	0.043	0.597	0.257
Intern-B	0.047	0.103	1.147	0.297
Intern-C	0.067	0.097	0.970	0.653
Intern-D	0.090	0.053	0.567	0.347
Intern-E	0.047	0.050	0.517	0.637
Intern-F	0.050	0.090	0.423	0.253
Intern-G	0.073	0.080	1.010	0.337
Total	0.063	0.074	0.747	0.397

6. トレーニングシステム

先行研究で開発したトレーニングシステムを拡張したトレーニングシステムを作成した。トレーニングシステムには、トレーニングモード、テストモード、評価システムによる結果表示画面の 3 つのモードがある。図 9 に示すように、選択画面によってモードを選択できるようになっている。



Fig.9 Menu selection screen

(1) トレーニングモード

トレーニングモードは、先行研究[8]にて開発した、鉗子操作力を訓練者に視覚提示し、異常操作である突発動作や力みが検知されたときに、訓練者に聴覚提示を行えるトレーニングシステムである。

a) 自動動作識別

ひずみゲージにより測定した鉗子操作力、PHANTOM Omni により測定した鉗子の操作速度を特徴量とし、各特徴量に対して閾値を設け、閾値の大小関係の組み合わせによって動作を識別する。PHANTOM Omni の速度 V_{pxi} , V_{pyi} , V_{pzi} ($i=1$: 右, $i=2$: 左) と両鉗子のハンドル部に取り付けたひずみゲージの測定値 $strain_1$ (右), $strain_2$ (左) と右鉗子の軸上部と側部のひずみゲージの測定値 $strain_{11}$, $strain_{12}$ から式(7)~(10)の特徴量を定義する。

$$V_i = strain_i \quad (i = 1, 2) \quad (7)$$

$$V_3 = \sqrt{strain_{11}^2 + strain_{12}^2} \quad (8)$$

$$Vp_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sqrt{Vp_{xi}(n)^2 + Vp_{yi}(n)^2 + Vp_{zi}(n)^2} \quad (i = 1, 2) \quad (9)$$

$$V_4 = Vp_1 + Vp_2 \quad (10)$$

Vp_{xi} , Vp_{yi} , Vp_{zi} はサンプリング周波数 1kHz で測定される速度で、N サンプル (N=512) ごとの平均値を Vp_i としている。 V_i ($i=1\sim 4$) の閾値を、 TH_i ($i=1\sim 4$) とし、判断値 T_i を式 (11) により定義する。

$$T_i = \begin{cases} 1 & V_i > TH_i \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (11)$$

この判断値の組み合わせにより動作が識別される[8].

その際、結紮操作は一連の動作として3節で記した順に行われるものとし、結紮操作順に識別を行う。鉗子操作力の提示システムでは、結紮操作の各動作を識別し、糸結び動作(④から⑥)と糸結び動作以外の動作(④から⑥以外の動作)に分けて、目標値の範囲を提示する。

図10に示すように、トレーニングモードでは、ウェブカメラの映像を映し出すモニターに鉗子操作力をリアルタイムで提示する。操作者が結紮操作を実施する際に、自動で動作識別も行い、各動作における操作者の鉗子操作力を提示すると共に、糸結び動作と糸結び動作以外のそれぞれに対応する熟練医による目標値枠も提示し、熟練医による鉗子操作力との比較を容易に行うことができる。

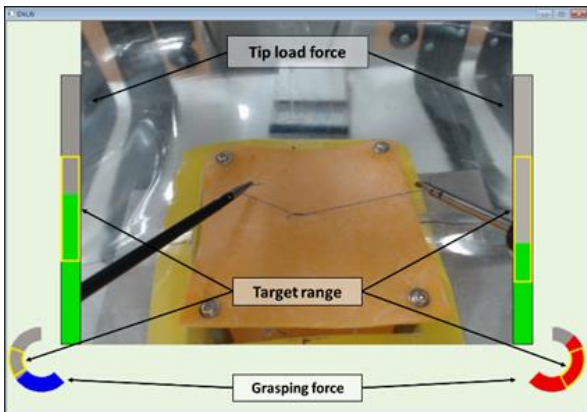


Fig.10 Training mode screen

モニター上の操作映像の左右に配置した2つの縦長のバーには、それぞれ左右の鉗子軸先端にかかる力を表示し、下部に配置した円ゲージには、左右の鉗子の把持力を表示する。それぞれ、操作者の現在の鉗子操作力をメーターの伸びにより表現する。熟練医による目標値の範囲をバー、円ゲージ上の黄色の枠により表示し、動作識別の結果に基づき、糸結び動作と糸結び動作以外のそれぞれに対して、メインウィンドウの背景色と熟練医による目標値の範囲を切り替える。現在の操作者の鉗子操作力が目標値以下である場合には青色、目標値内ならば緑色、目標値以上の場合には赤色と、メーターの色を変え

て、直感的に適切な鉗子操作力を把握可能にしている。

異常操作の提示は、スピーカーよりBGMを流し、突発動作、カミが検出されたときに、BGMにそれぞれアラーム、ノイズを挿入し、聴覚提示する。

(2) テストモード

図11に示すように、テストモードはウィンドウにウェブカメラの映像を映し出し、評価システムの対象操作である3回の結紮操作(左軸巻き付け結紮→右軸巻き付け結紮→左軸巻き付け結紮)を行うモードであり、評価項目の評価に必要なデータの取得を行う。



Fig.11 Test mode screen

(3) 評価システムによる結果表示画面

評価システムによる結果表示画面は、テストモードで取得した評価のためのデータを数値解析ソフトウェアMATLAB/Simulinkにより数値処理し、評価結果を表示するモードである。トレーニングモードでは、結紮操作の一連の動作を自動識別していたが、評価システムにおいては、評価の信頼性を上げるため、操作映像から読み取った結紮操作の巻き付け動作および糸結び動作の時間を入力することで評価を行っている。結果表示は、図12に示すように、評価対象である3回の結紮操作を5つの評価項目(結紮操作時間、鉗子操作力(把持力、鉗子軸先端にかかる力)、突発動作、鉗子位置)について、最も高い技術を持つ熟練医との差をレーダーチャート及び横長のバーにより表示する。

画面右側には、結紮操作にかかった時間、最大鉗子速度、3回の右左の鉗子の把持力と鉗子軸先端にかかった力(鉗子軸先端負荷)それぞれの目標値との誤差率、3回の鉗子位置の値が横長のバーに表示される。また、目標値以下で収まっていれば緑色のメーターで、目標値より大きい場合は赤色のメーターで表示される。把持力と鉗子軸先端負荷の項目は、バー枠中心を0とし、目標値との誤差率が正の値であれば赤いメーター、負の値であれば青いメーターで表示される。

画面左側には、5つの評価項目(結紮操作時間、把持力、鉗子軸先端負荷、突発動作、鉗子位置)について、熟練

医との差がレーダーチャートによって表示される。オレンジ色の枠は訓練者の評価結果であり、緑線の枠は熟練医による目標値となっている。把持力と鉗子軸先端負荷の項目は、3回の左右の誤差率の内、絶対値が最大のものが表示される。また、鉗子位置の項目も3回の内の最大値が表示される。

熟練医との差を表示することにより、熟練医との比較を容易に行うことができ、訓練者は一定の評価基準の下で訓練を行うことが可能となる。また、指導医が評価結果を研修医の指導に役立てることもできる。

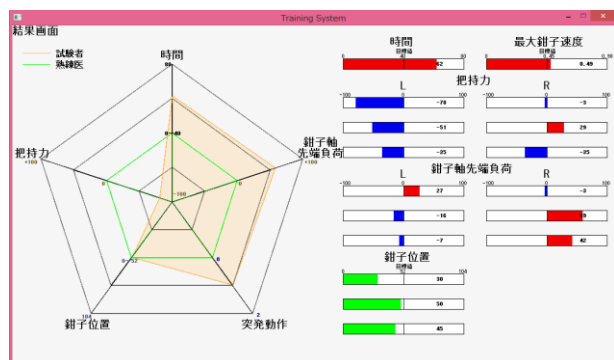


Fig.12 Results screen of evaluation system

7. 結言

本研究では、結紮操作を対象とし、熟練医と研修医の結紮操作時間、鉗子操作力、突発動作、鉗子位置の差の検証を行った。操作映像では一見同じ結紮操作に見えても、熟練医と研修医では鉗子操作力に差があることが確認された。また、突発動作の回数、結紮操作時間も、研修医は熟練医よりも増加する傾向が確認された。これらの結果を踏まえて、先行研究で開発したトレーニングシステムを拡張し、結紮操作における結紮操作時間、鉗子操作力、突発動作、鉗子位置を評価項目として、訓練者に熟練医との差を提示する評価システムを開発した。これにより、訓練者は一定の評価基準の下で訓練を行うことができ、熟練医の操作に近づくように結紮操作を習得することが期待できる。

今後は、拡張したトレーニングシステムを利用することによる訓練が、トレーニングボックスを用いた指導医の言葉による指導の下での訓練よりも、結紮操作の習得に効果があることを検証する必要がある。また、現在は評価結果を表示するために、結紮操作の巻き付け動作お

よび糸結び動作の時間を入力する必要があるが、これらの動作に対して精度の高い自動識別が可能になれば、評価結果を自動的に表示することが期待できる。

参考文献

- 1) N. Orzech, V.N. Palter, R.K. Reznick, et al. : A comparison of 2 ex vivo training curricula for advanced laparoscopic skills: a randomized controlled trial, *Ann Surg.*, Vol.255, No.5, pp.883-839, 2012.
- 2) T.P. Grantcharov, V.B. Kristiansen, J. Bendix, et al. : Randomized clinical trial of virtual reality simulation for laparoscopic skills training, *Br J Surg.*, Vol.91, No.2, pp.146-150, 2004.
- 3) A.K. Madan, C.T. Frantzides, N. Shervin and C.L. Tebbit : Assessment of individual hand performance in box trainers compared to virtual reality trainers, *Am Surg.*, Vol.69, No.12, pp.1112-1114, 2003.
- 4) 羽山裕也, 栗田雄一, 河原知洋, 岡島正純, 小笠原司 : 腹腔鏡下手術における鉗子操作の自動分類, *日本コンピュータ外科学会誌*, Vol.11, No.3, pp.328-329, 2009
- 5) 中屋友佑, 石井千春, 中荃隆, 西谷要介, 疋田光孝 : 表面筋電位を用いた手術手技に対する特異操作の判別手法, *電気学会論文誌 D (産業応用部門誌)*, Vol.132, No.2, pp.241-249, 2012
- 6) 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*, Vol.6, No.12, pp.887-898, 2015.
- 7) 村野海斗, 小林竜也, 石井千春, 川村秀樹 : 腹腔鏡下手術トレーニングシステムの開発ー左右鉗子の協調作業に対する評価方法の提案と検証ー, *電気学会研究会資料, メカトロニクス制御研究会*, pp.7-12, 2015
- 8) 小林竜也, 村野海斗, 石井千春, 川村秀樹 : 鉗子操作力を提示する腹腔鏡下手術トレーニングシステムの開発, *日本機械学会年次大会講演論文集*, J1630103-1-5, 2015
- 9) 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, *大道学館出版*, pp.26-104, 2015