

ナビゲーション情報を利用した内視鏡下副鼻腔手術における 内視鏡操作の定量分析

Quantitative analysis of a camera operation for endoscopic sinus surgery using a navigation information

杉野貴明 (学生会員)^a, 久保木章仁^b, 中山次久^b, 大村和弘^b, 浅香大也^b, 山口智子^a,
小島博己^b, 鴻信義^b, 中村亮一^{a,c*}

^a 千葉大学大学院工学研究科

^b 東京慈恵医科大学耳鼻咽喉科

^c 千葉大学フロンティア医工学センター

Takaaki Sugino^a, Akihito Kuboki^b, Tsuguhisa Nakayama^b, Kazuhiro Ohmura^b, Daiya Asaka^b,
Tomoko Yamaguchi^a, Hiromi Kojima^b, Nobuyoshi Ohtori^b, Ryoichi Nakamura^c

^a Graduate School of Engineering, Chiba University

^b Department of Otorhinolaryngology, The Jikei University School of Medicine

^c Center for Frontier Medical Engineering, Chiba University

Abstract

Endoscopic sinus surgery (ESS) has been performed with a navigation system to reduce a risk of causing injuries and complications during the surgery. However, supporting the improvement of surgeons' skill levels is important to further improve the safety of ESS. We previously developed a method for analyzing and evaluating the motion of the forceps during a glioma surgery and a laparoscopic cholecystectomy in order to help surgeons to learn surgical skills. As a surgeon need to operate an endoscopic camera and a forceps in the case of ESS, we focused on analyzing a camera operation. Therefore, in this study, we present a quantitative analysis method of a camera operation during ESS. By using the information obtained by a navigation system, we developed a method for quantifying a camera operation with five analytical parameters and estimating surgeons' skill levels based on discrimination analysis. For fundamental validation, we analyzed a camera operation during a simulated bone resection task for ESS using a nasal bone phantom. Eight surgeons (four experts and four novices) participated to the study and the task was performed five times by each surgeon. A total of forty procedures were analyzed to validate our method. Based on the validation results, we believe that our analytical method is effective for quantitatively analyzing and evaluating surgical performances without depending on years of experience.

Key words

Surgical task evaluation, Skill assessment, Endoscopic sinus surgery, Surgical navigation.

1. 背景

1.1 内視鏡下副鼻腔手術の現状

患者の負担が小さい低侵襲手術の代表例として挙げられる内視鏡下手術は、この20数年の間に各科で急速に普及し、適応拡大・高度化が進められている。例えば、鼻科領域では、1980年代に副鼻腔炎の治療

*千葉大学フロンティア医工学センター
〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33
ryoichin@faculty.chiba-u.jp

受付 2015年8月19日; 採択 2015年11月20日

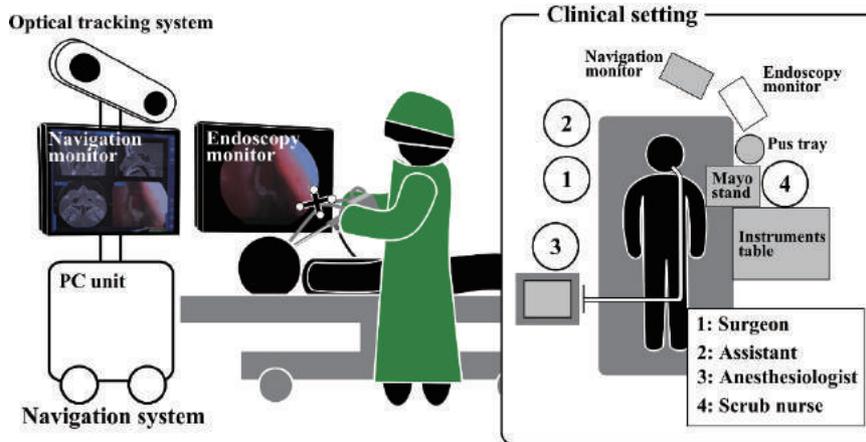


Fig.1 Navigation-guided endoscopic sinus surgery⁹⁾

として内視鏡下副鼻腔手術（Endoscopic Sinus Surgery：ESS）が導入されて以降，現在ではESSが鼻副鼻腔疾患の外科治療の標準的な術式として定着し，耳鼻咽喉科の中で最も件数の多い術式となっている^{1),2)}。副鼻腔手術は顔面や上唇の付け根等の切開創からアプローチする鼻外手術と鼻孔からアプローチする鼻内手術の2種類に大きく分類されるが，いずれにしても従来は裸眼下で行われていた。そのため，鼻外手術では非常に侵襲性が高いこと，そして鼻内手術では患部を明確に視認できないことが大きな欠点であったが，内視鏡と術具を鼻孔から挿入して行うESSの導入により，術野および手術操作を拡大明視しながら低侵襲に治療することが可能になった。近年では，ESSは副鼻腔炎・嚢胞・腫瘍等の様々な副鼻腔疾患に加え，眼窩領域や頭蓋底の疾患に対しても拡大適応されてきている^{3),4)}。

しかしながら，ESSでは低侵襲にかつ拡大明視下で手術操作を行うことができる反面，

- ・左手で内視鏡，右手で鉗子を操作して行うために片手操作になる，
- ・狭い鼻内で術具操作が制限される，
- ・副鼻腔が解剖学的に複雑でバリエーションの多い構造をもち，かつ眼窩や頭蓋等の重要な器官と隣接している。

などの点から手術中に重篤な副損傷が発生する危険性を伴う²⁾。実際，ESSが標準的に行われるようになった現在もなお，眼窩内側壁損傷，頭蓋底部の骨損傷，動脈血管の損傷等の術中副損傷あるいは術後合併症が少なからず報告されている^{2),5)}。そこで，より安全かつ正確に手術を実施するために，現在ESSでは

Fig.1に示すような手術ナビゲーションシステムを利用した手術が普及している⁶⁾。手術ナビゲーションシステムとは，術者が操作する術具の位置姿勢を患者の医用画像上に表示し，術者が現在どこを作業していて周囲に何があるのかを可視化することによって，安全な手術の施行および目的部位への誘導を支援する装置である。鼻科領域では1993年にZinreichら⁷⁾によって鼻科手術へのナビゲーションシステムの応用が報告されて以降ナビゲーション手術が普及しはじめ，現在日本では80以上の施設で鼻科手術にナビゲーションシステムが用いられており，年間3,500件以上のナビゲーション誘導下ESSが実施されている⁸⁾。ナビゲーションシステムの保有施設と使用頻度は年々増加傾向にあり，ナビゲーション誘導下ESSの実施経験のある医師の多くがナビゲーションの必要性を認めている⁸⁾が，それでも術中副損傷の報告が後を絶たないことを考慮すると，ナビゲーションの使用に加え，術中の作業評価や術者自身の技能向上が必要不可欠であるといえる。

1.2 手術作業評価

ESSに限らず，非常に高度で複雑な手技が要求される低侵襲手術が普及している昨今では，手術の質を大きく左右する術者技能の向上支援が重要視されている。そこで，近年，こうした支援を図るために，トレーニング時あるいは手術時に作業に関連する情報を計測し，その計測した作業情報を基に術者の技能レベルや手術作業を定量的に分析・評価する研究が注目されてきている^{10),11)}。現在までに特定の手術手技トレーニングから臨床の術式に至るまで様々なタ

スクが分析対象として選択されているが、その分析内容は計測情報に大きく依存するため、「いかにして作業情報を計測するか」がまず共通の課題として挙げられる。特に臨床の術式を対象とする場合には、計測条件および環境が制限されることから、作業情報の取得アプローチは非常に重要な検討課題のひとつとして考えられる。先行関連研究ではこれまで、観察者ベースの手動取得とセンサベースの自動取得の2種類の作業情報取得アプローチが提案されている¹¹⁾。

Neumuthら^{12)~14)}は手術中に観察者がその場で作業の様子を記録することができるように、タブレットPCに搭載して手術中の処置の種類/解剖部位/使用術具に関する情報を入力可能な作業情報記録用ソフトウェアを開発し、それにより得られる作業情報を基に手術プロセスをモデル化して比較・評価するための手法を考案している。こうした観察者ベースのアプローチは人的な作業情報の取得方法であるため、予期せぬインシデントの発生などに柔軟に対応することができるが、見落としや誤入力等のヒューマンエラーが生じる可能性があることや観察者の労力を必要とすることを考慮すると、臨床現場で用いるのは現実的に難しい方法であるといえる。

一方、センサベースのアプローチは、元々手術室内で使用されている機器をセンサとして利用するか、あるいは手術室内に新たに情報取得用のセンサを設置することによって、ヒューマンエラーのない自動的な情報取得を可能とする方法である。前者の例としては内視鏡^{15),16)}などの映像機器、後者の例としてはRFID (Radio Frequency Identification) タグ¹⁷⁾や3次元位置計測装置¹⁸⁾などのトラッキング機器を利用したものが挙げられる。特にトラッキング機器等のセンサを用いたアプローチの場合、術者が操作する術具の動作に関する情報など、観察者ベースの手法では取得し得ない情報を得ることができるため、より詳細な作業分析ができる可能性があるが、先行研究で提案されてきた手法の多くは新規計測装置の設置や計測のために煩雑な設定を必要とする。臨床現場で利用することを考えると、(A) 計測機器の設置・設定によって手術作業を阻害することなく、(B) 詳細な作業情報を取得・分析する、という2点を同時に満たす手法が理想的である。

そこで、我々は(A)と(B)の2点を達成するために手術ナビゲーションシステムに着目した。汎用されているナビゲーションシステムは基本的に3次元

位置計測装置・情報処理コンピュータ・表示モニタから構成され、手術中の術具位置姿勢情報(術具の先端位置座標および方向情報)を経時的に取得することによってナビゲーションを行う。したがって、ESSで行われているようなナビゲーション誘導下の手術を対象として、本来ナビゲーションのために経時的に取得される術具位置姿勢情報(以下、ログデータ)を手術作業分析に応用できれば、元の手術環境への変化・影響を最小限に抑えた作業情報の取得・分析が可能となる。また、ナビゲーションシステムを利用した場合には患者の解剖学的情報(医用画像)上での術具動作の様子がわかるため、トラッキング機器を利用した従来手法のように単に「術具をどのように操作したか」ではなく、「患部に対して術具をどのように操作したか」を含むより詳細な作業分析も可能になる。我々はこれまでに、ナビゲーション誘導下脳腫瘍摘出術あるいはより複雑な作業工程を有する腹腔鏡下胆嚢摘出術を対象に、ナビゲーション情報、すなわち医用画像と剥離・切除等の重要な操作を担う右手術具のログデータを用いて、手術作業の進捗・工程や術者の技能を定量的に分析・評価する手法を開発してきた^{19)~22)}。さらに、手術では両手での協調的な術具操作が基本であるため、我々は左手による術具操作にも着目し、腹腔鏡下胆嚢摘出術において左手で操作される把持鉗子のログデータを利用した作業分析手法の開発も行っている²³⁾。

術者が左手で内視鏡、右手で術具を用いて行うESSにおいても同様に、右手での鉗子操作だけでなく、左手での内視鏡操作の技術が非常に重要な役割をもつ。特に解剖学的に複雑な構造をもつ副鼻腔を対象とするESSでは、0°の直視鏡だけでなく、挿入方向と視野方向が異なる斜視鏡も頻繁に用いられるため、内視鏡での術野の適切な観察および視野確保の技術がESSを安全に行うポイントのひとつとして重要視されている²⁴⁾。例えば、山内ら²⁵⁾は内視鏡操作中の内視鏡先端の経路長や回転量の情報を基にESSにおけるナビゲーションシステムの有用な提示法に関する評価検証を行っている。また、橋本ら²⁶⁾はESSのトレーニングシステムを用いた手術タスク中の内視鏡先端速度を計測・分析することで術者熟達度の定量化を試みている。このように、内視鏡の操作はESS中の術者のパフォーマンスを評価するうえで非常に重要な要素となり得る。そこで、本研究ではナビゲーション情報を利用することでESSにおける左手

での内視鏡操作をより多角的に定量分析する手法の開発を目的とする。

2. 方法

2.1 内視鏡操作分析手法

2.1.1 作業特徴量の算出

定量的な作業分析を行うためには、得られるナビゲーション情報から作業内容に関連する作業特徴を定量化する必要がある。我々は先行研究の中で主に剥離作業を対象とした作業特徴量の定義・算出法について検討してきた^{21),22)}が、剥離作業と今回対象とする内視鏡操作では作業の内容・特性が異なるため、新たに内視鏡操作を定量化する特徴量として、以下に示す5種類の分析指標を定義した。

(1) 内視鏡先端速度

術者が操作する内視鏡の速度は、先行研究²⁶⁾の中で術者熟達度計測に用いられているように、内視鏡の操作を評価するうえで有効な指標であるといえるため、ログデータ $L_j = (x_j, y_j, z_j)$ ($j=1, 2, \dots, n$) から求められる平均内視鏡先端速度を分析指標のひとつとした。

(2) 分布密度

内視鏡先端速度同様、ログデータの分布密度は先行研究²²⁾にて術具操作の集中度を表すために用いられているが、内視鏡の動作を表す作業特徴量としても有効な指標になり得る。空間的な点分布解析の代表的な手法のひとつとして挙げられる最近隣距離法に基づき、平均最近隣距離 W とその期待値 $E(W)$ を用いて得られる分布密度 Z を分析指標のひとつとする：

$$W = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_j \quad (1)$$

$$E(W) = \frac{\left\{ \Gamma\left(\frac{3}{2} + 1\right) \right\}^{1/3} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{3} + 1\right)}{\rho^{1/3} \cdot \pi^{1/2}} \quad (2)$$

$$Z = \frac{W}{E(W)} \quad (3)$$

d_j はログデータの各点 L_j から最近隣点までの距離、 ρ は医用画像空間でのログデータの点密度をそれぞれ表す。この指標では値が低いほど、ログデータの分布が密集していることを表す。

(3) 内視鏡-ターゲット間距離

空間の狭い鼻内に内視鏡と鉗子を挿入して行う ESS では、患部に対する内視鏡の距離感重要な要

素であると考えられる。そこで、単なる内視鏡先端の移動距離を表す指標ではなく、患部から内視鏡先端までの距離を指標のひとつとした。ナビゲーションシステムにより記録されるログデータは画像空間座標上の点として取得可能であるため、ここでは医用画像上で選択される患部(ターゲット)の基準点の座標 $P = (p_x, p_y, p_z)$ とログデータによる術具先端の位置座標の差分を内視鏡-ターゲット間距離として定義した。

(4) 近似楕円体体積

(2) で定義した分布密度はログデータ分布の広がりの度合いを表す指標となり得るが、分布のパターンによって最近隣距離法のみでは判別が難しい場合が存在する。そこで、我々は分布密度の指標とは異なる観点から分布の分散状態を表すために、ログデータ分布を楕円体で近似したときの体積を分析指標に追加した。ここでは、3次元正規分布の等位面が楕円体と相似することを利用し、ログデータ分布の期待値 μ と共分散行列 C をもつ3次元正規分布を近似楕円体として算出する²⁸⁾。すなわち、次式によって3次元の単位球面 X を3次元正規分布 $N(\mu, C)$ に従うように変換することで楕円体 Y を求める：

$$Y = AX + \mu \quad (4)$$

A は共分散行列 C のコレスキー分解 $C = AA^T$ により得られる下三角行列を表す。これにより得られる楕円体の体積を分析指標のひとつとする。

(5) 楕円体体積

内視鏡の移動・ブレに関しては内視鏡先端速度などの指標に反映されるが、内視鏡の先端を支点として内視鏡の方向・傾きを変化させた場合の動作に関しては反映されないため、内視鏡の回転量は重要な特徴量になり得る。そこで、ログデータに含まれる内視鏡の方向ベクトル $O_j = (ox_j, oy_j, oz_j)$ を用いて次式により求められる内視鏡の回転量 R を分析指標のひとつとして定義した：

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \cos^{-1} \left(\frac{O_j \cdot O_{j-1}}{|O_j| |O_{j-1}|} \right) \quad (5)$$

2.1.2 判別分析

本研究ではさらに、前節で定義した5つの分析指標を説明変数として多変量解析を行うことで技能レベルの推定を行う手法を提案する。ここでは、目的変数である技能レベルを熟練度が高い/低いあるいは Expert/Novice のような質的な変数として扱う判別分析を利用する。判別分析では既知のデータセットか

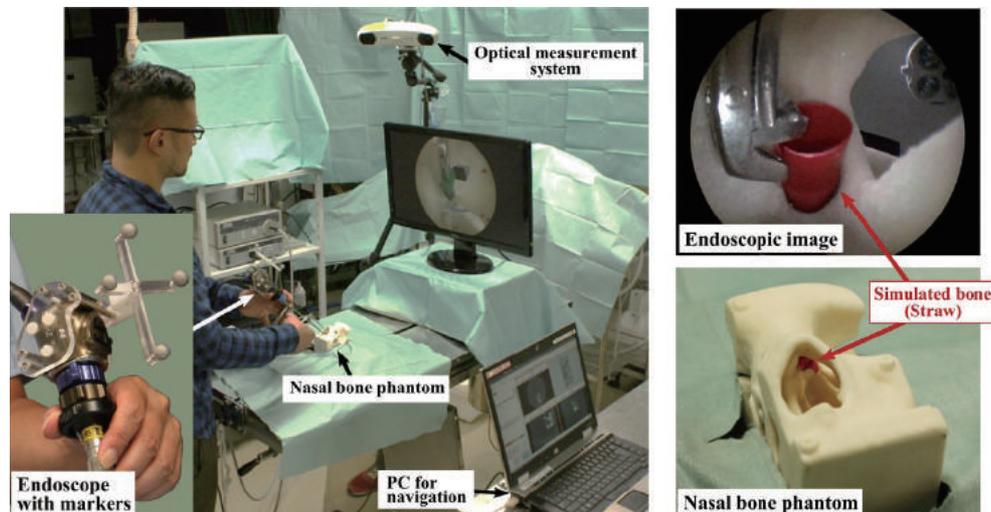


Fig.2 Experimental setup

ら、各説明変数の情報を基に目的変数の分類対象群を最適に分ける判別関数のモデルを構築することで、新規データの予測を可能とする。その判別関数の求め方は様々な手法があるが、本研究では2群から成る目的変数と最も単純な線形式での判別分析を用いる。ただし、説明変数の中に相互に相関の高い変数が含まれている場合などには、統計的に不安定な状態になり判別関数の信頼性低下の原因となる多重共線性が生じる可能性がある。この多重共線性を示す絶対的な基準はないとされるが、本研究では多重共線性を回避する明確な基準として次の基準を採用した：

- I. 説明変数 x_1, x_2, \dots, x_5 の中に相関関係が強いと考えられる絶対値 0.6 以上の相関²⁹⁾をもつ説明変数ペアがある、
- II. 判別関数における説明変数 x_i の係数の符号と分類対象の2群 (A, B) の平均の差 ($\bar{x}_{iA} - \bar{x}_{iB}$) の符号が一致しない。

この I と II を同時に満たす説明変数が存在する場合には、目的変数に対する相関が低い方の説明変数を除外したうえで判別分析を行うこととした。

2.2 評価実験

提案手法により、術者の内視鏡操作を適切に定量化および判別分析することが可能であるかを検証するために評価実験を実施した。本研究ではまずは基礎評価のため、鼻骨石膏ファントムを用いた実験環境下での模擬手術手技タスクに対して検証を行った。

その実験環境を Fig. 2 に示す。本実験では死角の多い ESS で非常に重要な役割をもつ視野角 70° の斜視鏡を使用し、ファントムに挿入したストローを骨壁に見立て、ESS で必須となる截除鉗子による骨の隔壁除去タスクを実験タスクとして設定した。我々の目標とするところはナビゲーション誘導下 ESS への本手法の適用であるが、今回は本手法により作業中の内視鏡操作を適切に分析することが可能かどうかを検証することが目的であるため、作業に直接的に関係しないナビゲーション画面の確認等の動作を排除するために、ナビゲーション画面は提示せず、ナビゲーションシステムは作業記録装置としてのみ利用した。また、タスクの実施時間を1分間と設定し、その間の内視鏡操作の分析結果のみを評価した。すなわち被験者にタスクの完遂時間を意識することなくタスクを行うことに集中してもらうため、タスクの完遂・ゴールの基準は設けず、タスクの進行具合に関しても今回は考慮しないことにした。

被験者は熟練医4名(経験年数5年以上、ESS 経験症例数300例以上の耳鼻科医)と非熟練医4名(経験年数1年未満、ESS 未経験の若手耳鼻科医)の計8名とし、各被験者に5回ずつ1分間の骨壁除去タスクを実施してもらい、計40例に対しログデータの計測および分析を行った。なお、本実験では練習施行回は設けず、タスクの流れとタスク時間に関する事前説明のみ、ただし非熟練医に対しては熟練医による術具操作等のレクチャーも行ったうえで計測を実施した。

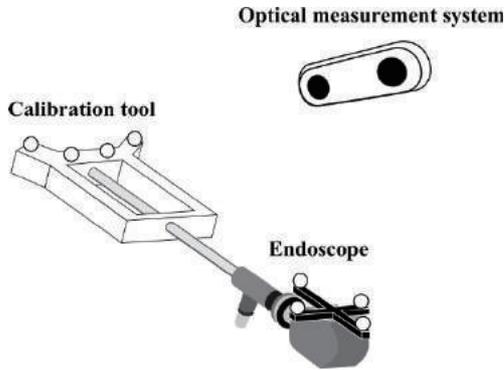


Fig.3 Calibration

本実験では光学式3次元位置計測装置 (Polaris Vi-cra, NDI Inc., Canada) とナビゲーションソフトウェア (3D Slicer, Brigham and Women's Hospital, USA) から構成されるナビゲーションシステムを使用し、医用画像はX線CT (Aquilion16, Toshiba Medical Systems Co., Ltd., Japan) により撮像された画像を用いた (撮像条件: 管電圧 120 [kV], 管電流 50 [mA], スキャン速度 0.5 [sec/rot], ピッチファクタ 0.938, 再構成視野 320 [mm], スライス厚 1.0 [mm], マトリックスサイズ 512×512). ログデータを正確に取得するために必要な画像空間と実空間のレジストレーションに関しては, ファントム上に設けられた基準点を基に, 3D Slicer を用いて選択された画像空間上のポイントとマーカプロブ (4-Marker Passive Probe, NDI Inc., Canada) を用いて Polaris により取得された実空間上のポイント間でポイントベースのレジストレーション³⁰⁾をタスク実施前に行った. また Fig. 3 に示すように内視鏡に設置されたマーカ原点から内視鏡先端までの Polaris による距離計測に基づいて内視鏡先端のログデータを取得するためのキャリブレーションも実施したうえで実験を行い, ログデータは約 1-3 mm 程度の TRE (Target Registration Error) でかつ約 10 Hz のサンプリングレートで取得された. なお本研究による分析プログラムに関しては全て MathWorks 社の Matlab を用いて実装し, ナビゲーション情報の分析を行った.

3. 結果

実験で得られたナビゲーション情報を基に, 定義した各分析指標の算出と判別分析による技能レベルの推定を行った.

Fig. 4 に熟練医 (Experts) と非熟練医 (Novices) 間

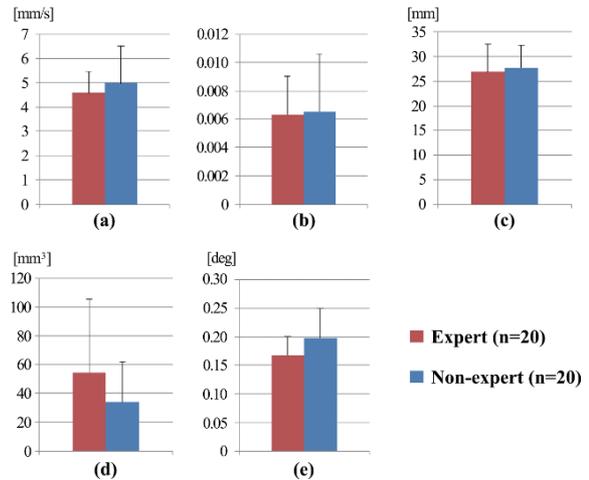


Fig. 4 Comparison of the analytical parameters between experts and novices : (a) Velocity of the tip of the endoscope, (b) Distribution density, (c) Distance from the tip of the endoscope to the target, (d) Volume of the approximate ellipsoid, and (e) Rotation of the endoscope

での算出指標の比較結果を示す. 今回設定したタスクの場合, 切除対象である模擬骨壁 (ストロー) が患部に該当するため, ターゲットの基準点をファントムに挿入されたストローの中心部に設定したうえで内視鏡-ターゲット間距離の算出を行った. 各分析指標でマン・ホイットニーのU検定 (有意水準 5%) を実施したところ, 全指標において熟練医と非熟練医で有意差はみられなかったが, 熟練医は非熟練医と比較すると近似楕円体体積では高い値を, それ以外の4つの指標では低い値を示す傾向がみられた.

また分析指標 (説明変数) の相関行列と算出された指標に基づいて行われた判別分析による各被験者の技能レベル推定結果を Table 1 と Table 2 にそれぞれ示す. この技能レベルの推定結果は, 一つ抜き交差検定により, テストデータ 1 例を除く 39 例のデータを学習データとして推定モデルを構築しテストデータの技能レベルを推定する, という作業を 40 回繰り返すことで得られた結果である. ただし, Table 1 に示すように内視鏡先端速度と分布密度の分析指標間ではほぼ全てのデータセットにおいて高い相関が確認され, 2.1.2 節で定義した I と II の条件が満たされたため, 目的変数に対する相関の低かった分布密度の変数を除外し, 残りの 4 つの指標を用いて判別分析を実施した. 全 40 例中 27 例 (67.5%) において経験症例数に基づく技能レベルの定義と一致する推定結果が得られた. Table 2 より, 各被験者の推定結果に

Table 1 Correlation matrix of the explanatory variables

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
Velocity of the tip of the endoscope	1.00				
Distribution density	0.92	1.00			
Distance from the tip of the endoscope to the target	-0.00	0.08	1.00		
Volume of the approximate ellipsoid	0.53	0.59	0.06	1.00	
Rotation of the endoscope	0.42	0.48	-0.17	0.28	1.00

Note : Strong correlations (>0.6) are highlighted in bold.

着目すると、被験者 D を除く全ての被験者において全 5 回の実験試行の過半数で技能レベルが正しく判別されており、5 回の試行による総合判定では 8 名中 7 名の熟練度を正しく判定することができた。

4. 考察

内視鏡下手術では内視鏡が捉える画面を頼りに手術操作を行うため、基本的に内視鏡の無駄な動き・ブレは最小限に抑えるべきであると考えられる。特に本研究の実験タスクのように作業領域が局所的に集中している場合には、内視鏡操作に長けた術者であるほど、内視鏡先端の無駄な動き・ブレは小さくなることが予想される。そのため、Fig. 4 の分析指標の比較結果の中で、内視鏡操作のブレの大きさに関連する内視鏡先端速度、分布密度、内視鏡回転量の指標において熟練医の方が非熟練医よりも小さい値を示したのは妥当な結果であったといえる。内視鏡回転量に関しては、本実験では光学式マーカの設置の限界から内視鏡のカメラ部にマーカを設置し、鏡筒部分の回転は無視したうえで求めたものであるが、単純な場所に位置するターゲットに対して行われた今回のタスクでは複雑な内視鏡操作は必要なかったため、鏡筒部分の回転を考慮したとしても同様の結果であったと考えられる。Fig. 4 では、内視鏡—ターゲット間距離の指標についても熟練医の方が小さい値を示している。これは熟練医の方が内視鏡をより患部に近づけ、患部を拡大視しながら手術操作を行っていることを意味する。内視鏡を近づけると患部の観察がしやすくなる反面、右手で操作する鉗子で患部

Table 2 Results of the discriminant analysis

Subject	Trial No.	Expertise	Estimate	Subject	Trial No.	Expertise	Estimate
A	1	Expert	Novice	E	1	Novice	Expert
	2	Expert	Novice		2	Novice	Novice
	3	Expert	Expert		3	Novice	Novice
	4	Expert	Expert		4	Novice	Expert
	5	Expert	Expert		5	Novice	Novice
B	1	Expert	Expert	F	1	Novice	Novice
	2	Expert	Expert		2	Novice	Novice
	3	Expert	Expert		3	Novice	Expert
	4	Expert	Expert		4	Novice	Expert
	5	Expert	Novice		5	Novice	Novice
C	1	Expert	Expert	G	1	Novice	Novice
	2	Expert	Expert		2	Novice	Novice
	3	Expert	Expert		3	Novice	Novice
	4	Expert	Expert		4	Novice	Novice
	5	Expert	Expert		5	Novice	Expert
D	1	Expert	Expert	H	1	Novice	Novice
	2	Expert	Novice		2	Novice	Expert
	3	Expert	Expert		3	Novice	Expert
	4	Expert	Novice		4	Novice	Novice
	5	Expert	Novice		5	Novice	Novice

を見にくくしてしまう恐れもあることから内視鏡および鉗子操作の技術が必要とされるため、操作に長ける熟練医の方が内視鏡—ターゲット間距離の指標が小さくなったのではないかと考えられる。ただし、一方で、楕円体体積の指標に関しては熟練医の方が高い値を示す傾向があった。これは、熟練医が無駄な動き・ブレの少ない内視鏡操作を行っている一方で、様々な方向から患部を捉えるように内視鏡を操作しているためであると考えられる。ログデータの近似楕円体の形状および体積はログデータの 3 軸方向の分散の状態によって決まるが、ログデータが 3 軸方向に均一に分散している場合に近似楕円体の体積は大きくなり、不均一に分散している場合には小さくなる傾向がある。Fig. 5 は得られたログデータ分布およびその近似楕円体を可視化した結果の一例であるが、この例のように熟練医の楕円体は球体に近くなり、非熟練医の楕円体は細長い形状になるパターンがいくつか観察された。このことから、楕円体体積の結果も術者の内視鏡操作の特徴を的確に反映したものであると推察できる。現状のナビゲーションシステムでは計測誤差が生じることは避けられず、ログデータ及びその分析指標にも少なからず誤差が含まれるが、Fig. 4 の結果から熟練医と非熟練医の作業特徴・傾向が分析指標に反映されていることが確認で

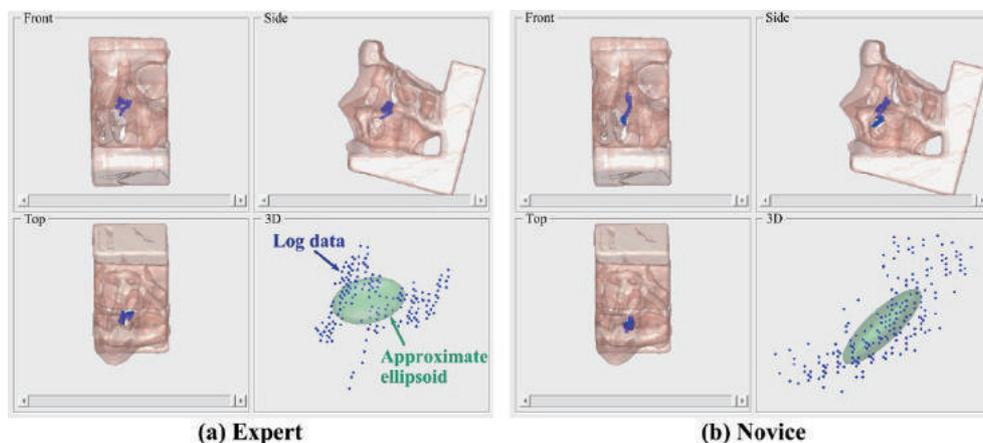


Fig.5 Examples of log data distribution and approximate ellipsoids

きる。したがって、計測データに誤差が含まれていたとしても、本研究により定義した分析指標を用いることで多角的な観点からの作業特徴の定量化は十分可能であると考えられる。

算出された分析指標を用いた判別分析による技能レベルの推定では、経験症例数により定義した技能レベルとの合致率は67.5%であったが、各被験者の全試行の推定結果に基づいた技能レベルの総合判定では、ほぼ全ての被験者で正しい判別が可能であった。本実験では被験者は5回ずつタスクを実施したが、例えば、非熟練医が回数を重ねるごとに上達し、判別分析によって熟練医と推定された例が後半の施行回に集中する、というような学習効果は確認されなかった。これは単純に5回の施行の中で分析データに明確な学習効果が現れるほど上達することは難しいためであると考えられる。熟練医の判別分析結果において後半の施行回で非熟練医と推定された例が見られることからわかるように、熟練医であっても常に一定のレベルでの操作・パフォーマンスを維持することは難しいということが推察される。このように、医師のパフォーマンスにはバラつきがあるため、少ない施行回から成るデータベースを用いた個々の手技データの評価では医師の技能・保有能力を完全に分析することは難しいが、複数の手技データを総合的に評価すれば、その医師の熟練度および手技の特徴等を明らかにすることが可能になると考えられる。すなわち、信頼できるデータベースの構築および信頼できる評価結果の導出のためには、より多くのデータを収集したうえで総合的に評価することが非常に重要となる。したがって、本実験において、

複数データから成る推定結果を総合判断した場合に概ね正しい判別が可能であった点を考慮すると、本手法による判別分析は技能レベルの判定に有用であると考えられる。また、臨床現場では合併症を起こした術者は経験の浅い若手医師から熟練医まで様々であり、経験数さえ多ければ良いわけではないということが指摘されているように⁶⁾、熟練医が常に適切な内視鏡操作を再現できるとは限らず、熟練医の中でも内視鏡操作の特徴が異なるということも起こり得る。本分析手法はこうした作業特徴・傾向の違いを識別することを可能にし、経験年数や経験症例数によって従来判断されることの多かった技能レベルの客観的かつ定量的な評価に利用できる可能性があると考えられる。

しかしながら、本研究では単純な実験タスクによる基礎評価であったため、今後はより臨床に近い複雑なタスクによる実験あるいは臨床症例での本手法の有用性の検討および発展が必要であると考えられる。本実験はESSの中の一部のタスクであったが、実際にはより様々なタスク・工程が複合して行われるため、ナビゲーション情報を基により多様な観点からの分析指標を構築し、タスク・作業部位などに合わせて最適な分析指標を選択的に利用することが望ましいと考えられる。複数の手術タスク・工程に対する作業分析を行う場合には、現在のタスク・工程の自動認識や作業過程の経時的な分析なども非常に重要となる。

また、本実験での計測中には発生しなかったが、手術中に内視鏡と術具の干渉による計測データへの影響やオクルージョンによる計測データの欠損が起こ

り得る。特に、光学式ナビゲーションシステムを利用した場合、臨床現場では右手術具や手術スタッフ等によってマーカのオクルージョンが頻繁に生じることが予想されるため、こうしたオクルージョンによるデータ欠損への対策も今後検討していく必要がある。例えば、現在、臨床現場では光学式ナビゲーションシステムの方が磁気式よりも普及している⁸⁾が、プローブ(術具)を色々な角度や向きで挿入しても機能する磁気式システムの方が使いやすいといった報告⁹⁾もあることから、磁気式ナビゲーションシステムの利用が対策のひとつとして挙げられる。さらに、先述のように本実験では内視鏡のカメラ部に光学式マーカを設置して内視鏡の回転量を求めたが、比較的サイズが小さく、向きを考慮する必要のない磁気式センサの場合、鏡筒部分に設置できる可能性もあることから、磁気式システムの利用はより正確な回転量の計測にも有効であると考えられる。

以上のような観点を踏まえ、今後は臨床の術式の分析・評価に適用可能でかつ有用な分析手法の構築を目指す。さらに、本研究では内視鏡の操作に着目したが、右手での鉗子操作も同様に極めて重要であるため、左手の内視鏡操作と共に右手の術具操作の作業分析にも着手していく予定である。

5. 結論

本研究では、手術ナビゲーションシステムにより得られる情報を利用した ESS における内視鏡操作の定量分析手法について提案し、ナビゲーション誘導下 ESS を対象とすることで、手術環境を阻害せずに内視鏡操作に関する作業情報の自動取得と作業特徴の定量化および技能レベルの推定を可能とする手法を開発した。鼻骨ファントムを用いた模擬手術タスクによる基礎実験の結果から、本研究で定義された分析指標によって術者の内視鏡操作に関する作業特徴を多角的に定量化することが可能であった。また、本分析手法による技能レベル推定を用いることで、ほぼ全ての被験者において正しい技能レベルの判別も可能であった。以上の点から、本手法が術者の経験年数だけに依存しない作業分析および技能レベルの評価に有用である可能性が示唆された。今後は、右手での鉗子操作の分析も加え、臨床の術式における全作業工程に適用可能な分析手法の構築を目指す。

謝辞

本研究は、MEXT/JSPS 科研費 23680056, 22650115, 24103704 の助成を受けて実施したものである。

文献

- 1) 森山 寛. 内視鏡下鼻内副鼻腔手術—進歩と定着—. 耳喉頭頸 1996;68:287-298.
- 2) 春名真一. ESS における合併症対策. 日耳鼻 2015;118:736-744.
- 3) 唐木将行, 森 望. 眼窩病変に対する内視鏡下経副鼻腔眼窩アプローチ法の適応と限界. 頭頸部外科 2009;19:13-18.
- 4) 鴻 信義. 頭蓋底疾患に対する内視鏡下鼻内手術. 耳展 2009;52:43-47.
- 5) 重田泰史, 大柳哲史, 吉川 衛, ほか. 内視鏡下鼻内手術における術中副損傷および術後合併症の検討. 日耳鼻 2012;115:22-28.
- 6) 鴻 信義. コンピュータ支援外科における最近の進歩—鼻科領域におけるナビゲーション手術の現状と今後の展望—. 日耳鼻 2014;117:775-781.
- 7) Zinreich SJ, Tebo SA, Long DM, et al. Frameless stereotaxic integration of CT imaging data. Radiology 1993;188:735-742.
- 8) 友田幸一, 馬場一泰. 耳鼻咽喉科ナビゲーション手術の現状—2011年全国アンケート調査結果報告—. 耳展 2012;55:392-399.
- 9) 出島健司. 手術に当たって 鼻副鼻腔手術のセッティング. JOHNS 2015;31(2):153-155.
- 10) Reiley CE, Lin HC, Yuh DD, et al. Review of methods for objective surgical skill evaluation. Surg Endosc 2011;25(2):356-366.
- 11) Lalys F, Jannin P. Surgical process modelling: a review. Int J Comput Assist Radiol Surg 2014;9(3):495-511.
- 12) Neumuth T, Durstewitz N, Fischer M, et al. Structured recording of intraoperative surgical workflows. In Proc SPIE Medical Imaging 2006;6145:54-65.
- 13) Neumuth T, Jannin P, Strauss G, et al. Validation of knowledge acquisition for surgical process models. J Am Med Inform Assoc 2009;16(1):72-80.
- 14) Neumuth T, Loebe F, Jannin P. Similarity metrics for surgical process models. Artif Intell Med 2012;54(1):15-27.
- 15) Speidel S, Delles M, Gutt C, et al. Tracking of instruments in minimally invasive surgery for surgical skill analysis. Med Imag Augment Real 2006;4091:148-155.
- 16) Bouarfa L, Dankelman J. Workflow mining and outlier detection from clinical activity logs. J Biomed Inform 2012;45(6):1185-1190.

- 17) Meißner C, Meixensberger J, Pretschner A, et al. Sensor-based surgical activity recognition in unconstrained environments. *Minim Invasive Ther Allied Technol* 2014;23(4):198-205.
- 18) Ahmidi N, Poddar P, Jones JD, et al. Automated objective surgical skill assessment in the operating room from unstructured tool motion in septoplasty. *Int J Comput Assist Radiol Surg* 2015;10(6):981-991.
- 19) 相沢知明, 中村亮一, 村垣善浩, ほか. 手術ナビゲーション情報を利用したMRI誘導下脳腫瘍摘出術の進捗工程解析法. *J JSCAS* 2011;13(1):25-32.
- 20) Nakamura R, Aizawa T, Muragaki Y, et al. Automatic surgical workflow estimation method for brain tumor resection using surgical navigation information. *J Robot Mechatron* 2012;24(5):791-801.
- 21) Sugino T, Kawahira H, Nakamura R. Surgical task analysis of simulated laparoscopic cholecystectomy with a navigation system. *Int J Comput Assist Radiol Surg* 2014;9(5):825-836.
- 22) Sugino T, Kawahira H, Nakamura R. Approach for modeling surgical processes in laparoscopic surgery based on navigation information. *Int J Comput Assist Radiol Surg* 2014;9(suppl):S117-118.
- 23) Yamaguchi T, Sugino T, Kawahira H, et al. Proposal and evaluation of surgical process analysis based on left handwork information in laparoscopic surgery using surgical navigation system. in *Proc ACCAS 2015* : ID15.
- 24) 鴻 信義. 鼻副鼻腔炎に対する内視鏡下鼻内手術—より安全で有効な術式と考え方—. *耳展* 2013;56(3):96-103.
- 25) 山内康司, 山下樹里, 持丸正明, ほか. 内視鏡下副鼻腔手術のためのナビゲーションシステムにおける操作性の比較評価. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌* 1998;3(4):221-227.
- 26) 橋本亮一, 山内康司, 持丸正明, ほか. 内視鏡先端の速度情報による術者熟達度計測の試み. *ヒューマンインターフェースシンポジウム 2002 論文集* 2002;609-612.
- 27) Clark PJ, Evans FC. Generalization of a nearest neighbor measure of dispersion for use in k dimensions. *Ecology* 1979;60(2):316-317.
- 28) 平岡和幸, 堀 玄. *プログラミングのための確率統計*. オーム社, 東京, 2009;173-270.
- 29) 山蔭道明. *コ・メディカルのための統計学入門*. 日本放射線技師会出版会 2005;83-94.
- 30) Maurer CR Jr, Fitzpatrick JM, Wang MY, et al. Registration of head volume images using implantable fiducial markers. *IEEE Trans Med Imaging* 1997;16(4):447-462.