

外装型力覚提示装置を用いた技能教育手法に関する研究

ヤエム ヴィボル¹, 葛岡 英明¹, 山下 直美², 大田 祥一³, 竹内 保男⁴

- 1) 筑波大学大学院システム情報工学研究科
- 2) NTT コミュニケーション科学基礎研究所
- 3) 東京医科大学救急医学講座
- 4) 帝京大学医学部救急医学講座

要約: 本論文では、技能教育における喉頭展開の仕方を学習者に指導するための、外装型触力覚提示装置 (Outer-Covering Haptic Display, OCHD) を用いた誘導手法の効果について述べる。喉頭展開とは、喉頭鏡と呼ばれる器具を用いて患者の口を開き、気道や声門を確保するような、医療行為の一種である。OCHD は、喉頭鏡を握る手の甲に触力覚を与え、学習者にその動かし方を誘導する。それにより、学習者は喉頭鏡に力を加えて動かすことで、掌に喉頭鏡の動作力を知覚することができる。これまでは、道具の操作における技能訓練を支援するために、視覚や触力覚を利用する手法が複数提案されている。触力覚を用いた誘導手法においては、アクチュエータによって道具を直接駆動し、学習者の掌に動作フィードバックを知覚させる。また、視覚を用いた誘導手法においては、学習者に動作フィードバックをモニターで示し、その視覚情報に従って道具を動かす。本論文では、この2つの手法と比較した評価実験の結果、OCHD を用いた誘導手法によってより高い学習効果がえられることを示す。

キーワード: OCHD 手法, 喉頭展開, 医療行為教示, 技能伝達手法

A Study of a Method using Outer-Covering Haptic Display for Tool Skill Education

Vibol YEM¹, Hideaki KUZUOKA¹, Naomi YAMASHITA², Shoichi OHTA³ and Yasuo TAKEUCHI⁴

- 1) Graduate School of System and Information Engineering, University of Tsukuba
- 2) NTT Communication Science Laboratories
- 3) Emergency and Critical Care Medicine, Tokyo Medical University
- 4) Department of Emergency Medicine, Teikyo University School of Medicine

Abstract: In this paper, we propose an Outer-Covering Haptic Display (OCHD) method to better teach learners how much force to apply to the tool during a laryngoscopy. Laryngoscopy is a medical procedure in which a tool called a laryngoscope is used to open a patient's mouth to view the vocal folds and glottis. A failed procedure, though, can lead to death or brain damage. The OCHD imparts haptic sensation to the back of the hand holding the laryngoscope, and guides the learner to perform the procedure. The learner moves the laryngoscope by his/her own force and receives the tool application force sensation on the palm of the hand. To evaluate the OCHD method, we conducted the comparison experiments with prior methods, the haptic guidance method, and the visual guidance method. The results showed that, the OCHD method is more effective for skill training which require learners to apply force such as in laryngoscopy.

Keywords: OCHD method, Laryngoscopy, medical instruction, hand skill training

Vibol YEM

Tenodai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-8573, Japan

Phone: +81-29-853-6187, Fax: +81-29-853-6958, E-mail: s1230202@u.tsukuba.ac.jp

1. はじめに

喉頭展開とは、喉頭鏡（図1左）と呼ばれる器具を用いて患者の口を開き、気道や声門を確保する医療行為の一種である。喉頭展開の多くは人工呼吸を目的とするが、そのためには患者の口に気管チューブを正しく挿入（気管挿管）しなければならない（図1右）。このとき、喉頭鏡の操作が正しくないと、患者の前歯を折ったり口腔内や脳を傷つけたりする可能性があるだけでなく、最悪の場合には患者の生命にかかわることもなる。このため、口頭展開において喉頭鏡を正しく操作することは非常に重要である。

喉頭展開を訓練するために、これまで Laerdal 社の SimMan や気道管理トレーナー、truCorp 社の AirSim のように、人の頭部を模したマネキンのシミュレータが開発されている。これらを利用することで、学習者は繰り返し実習をおこなえるようになった。しかしこうした装置を利用しても、学習者の手に動作を直接誘導したり、動作フィードバックをする装置がないため、喉頭鏡の正しい操作を学習者に伝えることは難しい。実際、訓練結果を見ると、気管挿管を実習する医学部学生が初回で成功する割合は、14%であり、ビデオを付ける喉頭鏡を利用する場合であっても48%[1]と、それほど高くない。

バーチャルリアリティの分野では、道具の操作における技能訓練を支援するために、視覚や触力覚または視触力覚を利用することで、正しい操作に誘導する手法が複数提案されている[2]-[6]。視覚を用いた技能教育において、Roberts ら[5]や Kumagai ら[6]は、手術の訓練を支援するために、教示されている動作をモニタに表示し、学習者は視覚情報を受け取りその誘導動作に沿って自分の力で道具を動かす（本論文では視覚による誘導手法と呼ぶ）。しかし、そのような手法では、喉頭展開のような複雑な動作の場合、道具の形や動作が3次元的であるため、2次元平面のモニタに表示すると、操作情報を十分に表現できなくなってしまうと考えられる。

触力覚を用いた技能教育手法において、従来は、アクチュエータで道具を直接駆動することによって、道具を握る学習者の手のひらに力を知覚させ、正しい動作に誘導する手法が一般的であった[3]（本論文では直接駆動による誘導手法と呼ぶ）。しかし、喉頭展開のように道具を強く握っている場合には、外力が感じにくくなるため、強い力で道具を駆動する必要があり、

装置の大型化や危険性の増加につながる[18]。また、このような直接駆動による誘導手法の場合、喉頭を展開するための力をアクチュエータが補助することになり、学習者は実際に出さなければいけない力を感じることができなくなると考えられる。

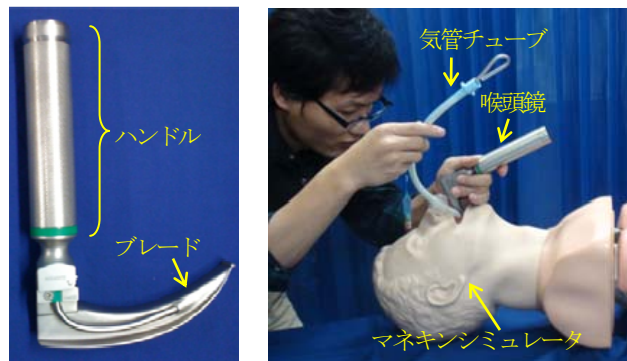


図1 喉頭鏡（左）、気管挿管のための喉頭展開（右）



図2 学習者の手に添える誘導手法

そこで本研究では、あたかも指導者が学習者の手に自分の手を添えるかのように（図2）、学習者の手の甲側の皮膚に触力覚を提示できる外装型触力覚提示装置（OCHD: Outer-Covering Haptic Display）を用いた教示手法を提案する。この方式では、学習者は自分の力で道具を動かさなければならないため、その動作力の強さや方向を正しく知覚できることになり、従って学習効果が高くなると期待できる。本論文では、従来の視覚による誘導手法および直接駆動による誘導手法と比較しながら、提案する手法の学習効果を検証する。

以下、第2節では関連研究を紹介することによって、比較的強い力を必要とする喉頭展開教育に対するOCHDの必要性を明確する。第3節では本手法の効果を確認するため、直接駆動による誘導手法と視覚による誘導手法の比較評価実験について述べる。第4節では実験結果を示し、第5節ではその結果について考察する。

2. 従来の研究

2.1 気管挿管教育支援

気管挿管における喉頭展開では、喉頭鏡のブレードを口に入れ、ハンドルと平面がなす角度が $30\sim 45^\circ$ になる状態を保ったまま、ハンドルの軸方向に動かすことによって下あごを持ち上げる。そして、その状態を保ちつつ気管チューブを気管に挿入する[7]。この喉頭展開では、患者の様々な状況に対応して喉頭鏡を様々な方向に回転、並進させながら巧みに動かす必要がある[7]。このとき喉頭鏡の動かし方を誤ると、気管チューブを正しく挿管できないだけでなく、口腔内を傷つけたり、患者の歯、特に上顎の前歯を折ったりする可能性もある。従って、正しい喉頭鏡の動かし方を身につけることが重要である。

現在、気管挿管のための喉頭展開教育では、気道管理トレーナー（図1右）、AirSimなどのマネキンのシミュレータを利用した訓練が一般的である。シミュレータを利用することで、繰り返し練習することが可能になったが、これだけでは、喉頭鏡をどのように操作すべきかということを学習者に直接的に教示することは難しく、指導者は言葉や手振りを使って複雑な動きを説明せざるをえない。この為、医学部の学生が気管挿管に成功する割合は、3回の訓練後でも33%程度であり[1]、90%程度まで上達するためには少なくとも20～60回もの訓練が必要である[8]-[10][12]。しかし間違った操作は、患者の脳を傷つけてしまう可能性もあるため、成功率が90%になっても高いとはいえない。従って、できるだけ短期間で成功率を向上させられる手法が望まれている。

Noh, Yら[11]は、力センサを内蔵させたマネキンシミュレータを開発した。このシミュレータを利用して訓練することによって、喉頭鏡により口腔内にかけている力を計測できるようにした。この実験結果から、初心者は口腔内に不適切な力を加えることが多かった[11]。このことから、マネキンシミュレータによる訓練では、習熟に時間がかかることがわかる。

一方、ブレードの先端にカメラを内蔵することにより、口腔内の映像を撮影することが可能なビデオ喉頭鏡が開発されている[13]。しかし学習者が喉頭鏡を握っている手に誘導する装置がないため、Ayoubら[1]によると、ビデオを付ける喉頭鏡を利用する場合であっても48%[1]と、ビデオなしの喉頭鏡より効果が良いが、それほど高くない。これに対して、気管挿管教育の支

援を目的とする三村らの研究[14]では、喉頭鏡に力センサおよびジャイロセンサを取りつけ、不適切な動作に警告音を発するシステムを提案している。しかし、三村らの研究では喉頭鏡を操作する際の手の動きを直接教示していない。

本研究では、バーチャルリアリティの分野において従来の技能教育手法を参考にしながら、喉頭鏡の動かし方を直接教示できるような、外装型力覚提示装置(OCHD)（図3）を開発した。

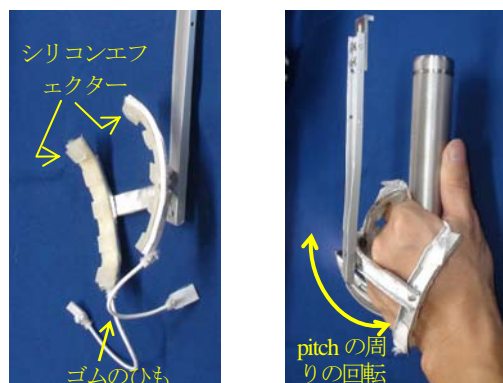


図3 OCHD(左)、手に装着した様子(右)

2.2 視覚的な動作教示

視覚的な情報提示による誘導手法では、動作方向や力の強さの目標値と、学習者による実際の値をモニタに表示することで、学習者は視覚的なフィードバックを受けながら動作を学習することができる[5][15]。しかし、気管挿管における喉頭鏡の操作のような3次元的动作を、2次元的なグラフィックス表現するためには、複数の2次元的な表示を組み合わせる必要がある、学習者にとって理解しづらくなる可能性がある。

2.3 OCHD

触力覚を用いた従来の誘導手法では、アクチュエータによって道具を直接駆動し、道具を握っている学習者の掌に誘導力を知覚させる。しかしこの方法には2つの問題がある。

まず、喉頭展開では喉頭鏡の操作に比較的大きな力を要するため（最大圧力の平均値が約40N、トルクの平均値が約4Nm）[16]、喉頭鏡を強く握らなければならない。そのとき、掌には比較的大きな力が加わることになる。ウェーバーの法則によれば、人間の知覚可能な刺激の最小の変化量は、現在与えられている刺激の強さに比例する[17]。従って、従来の動作教示手法

のように、筆の運びを訓練する習字のようなシステムであれば[3]、道具を軽く握れば良いため、小出力のアクチュエータで筆を駆動しても、学習者はその力を知覚できる。これに対して喉頭鏡の操作は強い握力がかかるため、高出力のアクチュエータで喉頭鏡を強く駆動しなければ、学習者はその力知覚できない。高い出力のアクチュエータを利用することは容易でなく、装置の大型化、高コスト化、危険性の増大につながってしまう。

次に、アクチュエータによって道具を直接駆動する方式では、学習者はアクチュエータによって駆動される道具によって、受動的に手を動かすことになる場合もあるため、実際のその道具の操作に必要な正確な力の強さを理解することができない場合がある。これに対して嗟峨らは、アクチュエータにわざと目標の動作方向とは逆方向の力を提示させ、学習者にその力を打ち消すように、能動的に目標方向に道具を操作させることによって、学習効果が高まることを示した[2]。しかしこの手法では、アクチュエータが道具を直接駆動することによって変わりはなく、喉頭展開のように強く道具を握る場合に適用すれば、高い出力のアクチュエータが必要となることには変わらない。

これに対して筆者らは、あたかも指導者が学習者の手に自分の手を添えて動きを誘導するかのように、手の甲側の皮膚に、触力覚を提示する手法を考案し、外装型触力覚提示装置 (OCHD: Outer-Covering Haptic Display) を試作した[18] (図3)。手の甲の皮膚には、喉頭鏡を操作している最中であっても外力が加えられていないため、比較的小さな刺激で誘導力を知覚させられると期待された。そこで、基礎的な実験によって pitch 軸周りの回転方向を学習者に知覚させるための刺激閾 (触力覚を感じる境界の刺激値) を調査した。その結果、アクチュエータで喉頭鏡を直接駆動して、喉頭鏡を握っている学習者の手のひらに回転方向を提示した場合は、喉頭鏡を握る強さに比例して刺激閾が大きくなった (力を知覚させるのに必要な駆動力が大きくなった) のに対して、OCHD を利用した場合は、握る強さにかかわらず刺激閾はほぼ一定であり、直接駆動する方式よりも有意に小さい力で済むことが分かった[18]。しかしこの実験では、pitch 軸周りの回転動作の刺激閾について有効性を示せてだけであり、より複雑な動作の習得に対する有効性は確認できていなかった。そこで本論文では、気管挿管に近い動作の学習に対する OCHD の効果を検討することを目的とする。

3. 動作学習実験

3.1 実験の目的

本実験は、喉頭展開を模擬した動作において、OCHD を利用した手法の学習効果を確認することを目的とする。そのために、視覚情報による誘導手法を用いて教示する条件、喉頭鏡の直接駆動による誘導手法を用いて教示する条件、そして OCHD 手法を用いて教示する条件において、被験者が喉頭鏡を操作する際に加える力の誤差を比較する。

3.2 実験装置

本実験では、喉頭展開を模擬した動作の学習に対する OCHD の効果を検証することを目的としているが、この実験のために、新たな計測装置を製作した (図4)。まず、喉頭鏡を握る握力を計測するために、圧力計を内蔵した円筒を製作し、これを喉頭鏡の代わりとした (以後、「喉頭鏡モデル」)。そしてこの喉頭鏡モデルを、バネ (ばね定数 2.5 N/mm) を介して 6 軸力センサ (ATI Mini40 FT09486, 図4中の FT sensor 2) に接続した。それにより、喉頭鏡を口腔内に挿入して軸方向に押し出したときにかかる抵抗力を模擬するとともに、そのときの力の大きさと方向を計測できるようにした。喉頭鏡モデルの動作の計測には、モーションキャプチャ装置 (サイヴァース, ステレオラベリングカメラ) を利用した。その際、喉頭鏡モデルに 3 つのマーカーを取り付けた。今回の実験において被験者に学習させた動作は 3.4 節で説明する。

この計測装置を利用して、OCHD を利用した学習手法、喉頭鏡を直接駆動する手法、そして視覚的な情報をフィードバックする手法の 3 種類条件を比較した。各条件は以下の通りである。

1) 視覚による誘導条件

図4に示すように、被験者は喉頭鏡モデルを握り、モニタに表示されている視覚情報に従って、喉頭鏡モデルを動かす (以後、視覚条件)。モニタは、学習中に十分に見やすい位置に設置した。モニタに表示される視覚情報を図5に示す。モニタには、x-z 平面と y 方向の情報が別々に表示されている。x-z 平面表示においては、バネにかかる力の方向と大きさの目標値が青で、喉頭鏡モデルの向きの目標が水色で示され、実際のバネにかかる力の方向と大きさが赤で、実際の喉頭鏡モデルの向きが黄色で示される。y 方向の情報は、

バネに実際にかかっている力のy方向成分の大きさが表示される。今回の実験ではy方向の力の大きさの目標は常に0Nであるため、目標値は視覚表示されない。喉頭鏡モデルの向きとかける力の目標値と実際の値を表示することで、被験者は視覚的フィードバックを受けながら動作を学習することができる。

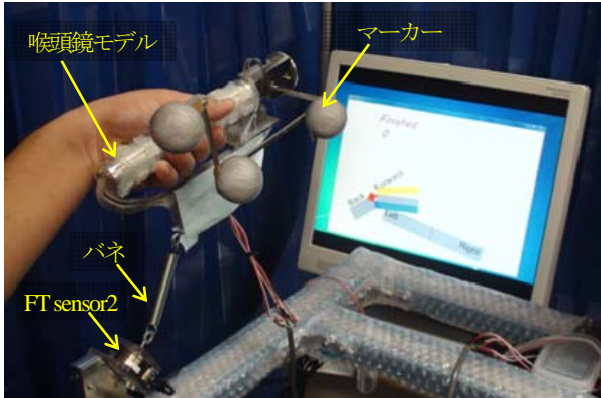


図4 視覚による誘導条件

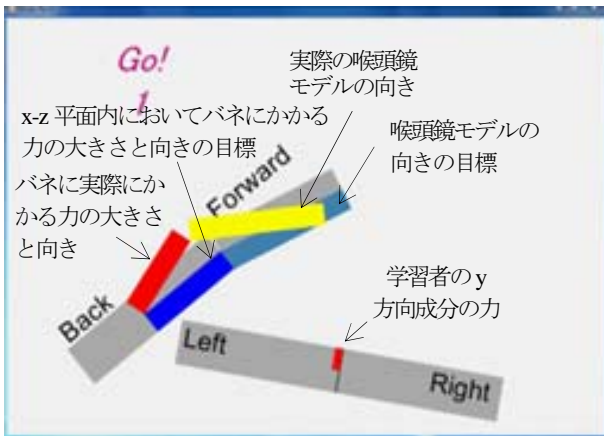


図5 視覚条件における画面表示

2) 直接駆動による誘導条件

図6に示すように、喉頭鏡モデルの先端を、6自由度のマニピュレータによって駆動し、喉頭鏡モデルの向きと、かかる力が目標値になるように誘導する（以後、直接駆動条件）。被験者は喉頭鏡モデルを把持しているため、マニピュレータが喉頭鏡モデルを駆動すれば、被験者は掌側に誘導力を感じるようになる。マニピュレータが喉頭鏡モデルを駆動する力は、6軸力センサ（ATI Mini40FT08735、図中のFT sensor1）によって検出する。この条件において被験者は、喉頭鏡モデルに接続されたバネとマニピュレータの合力を掌に知覚することになる。

実際にこのシステムが喉頭展開の動作学習に利用さ

れる場面を想定し、被験者は学習中にマニピュレータが動く様子を見たり、動作音を聞いたりすることができた。

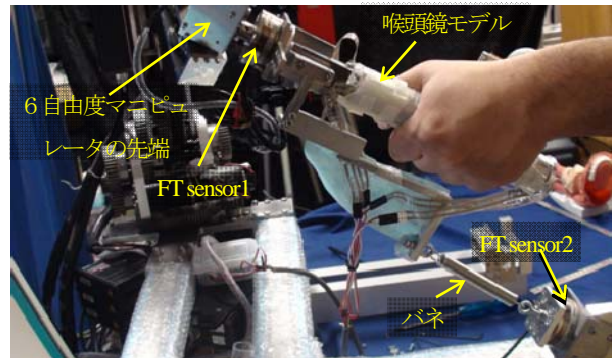


図6 直接駆動による誘導条件

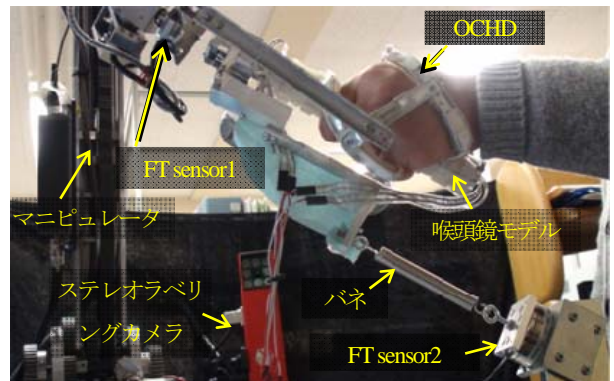


図7 OCHD条件

3) OCHDによる誘導条件

図7に示すように、6自由度マニピュレータを6軸力センサ（FT Sensor1）を介してOCHDに接続し、被験者の手を誘導するようにコントロールする（以後、OCHD条件）。被験者は手の甲側に誘導力を知覚し、それによって道具を操作する。これによって、OCHDはマニピュレータで駆動され、被験者の手をコントロールするようにする。この方式では、被験者はシステムによる誘導力はOCHDを介して手の甲に知覚し、喉頭鏡を操作するのに必要な力は喉頭鏡モデルを把持している掌に知覚する点である。

実際にこのシステムが喉頭展開の動作学習に利用される場面を想定し、被験者は学習中にマニピュレータが動く様子を見たり、動作音を聞いたりすることができた。

3.3 実験手順

まず、被験者を実験装置の前に立たせ、左手で喉頭鏡モデルを持たせた。そして、装置による誘導に慣れるように、練習の誘導動作を2回練習させた。実験タスクでは、ある誘導条件で決められた動作を誘導した後、およそ2分間で休憩させた。その後、被験者に喉頭鏡モデルを把持させ、誘導装置を取り外した状態で、学習した動作を再現させた(図8)。各被験者はすべての条件で学習タスクをおこなったが、3回の動作は異なるようにした。各誘導条件と動作の組み合わせ、および誘導条件の順番はカウンタバランスをとった。

被験者は21歳~32歳の24名(男性18名、女性6名)であった。被験者は全て右利きであり、喉頭展開訓練を受けたことがなかった。

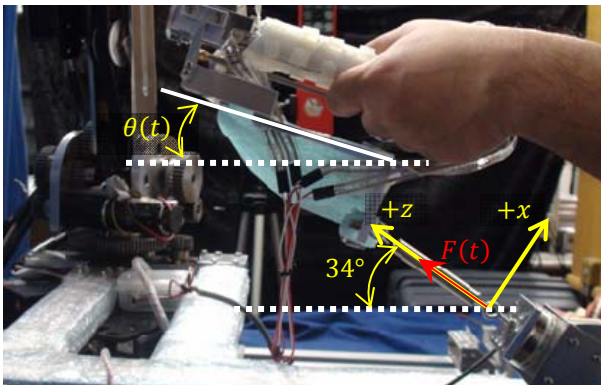


図8 実験における座標系

3.4 喉頭鏡の動作

喉頭展開では、操作に要する時間および喉頭鏡のブレードにかかる力の最大値は、それぞれおよそ10秒と38Nである[20]。Brucxらの実験結果によると、大人の患者の場合、喉頭展開の最大動作力の平均が35Nであるが、子どもの患者の場合では21Nである[21][22]。また、平面とハンドルのなす角度とハンドルを回転させる速度の平均値はそれぞれ34°(26~42°)と44%/sである[23]。これらの知見に基づき、本実験において学習させる喉頭鏡の動作を以下のようにした。

$$F(t) = \begin{cases} f_n(1 - e^{-t}) & (0 \leq t \leq 10s) \\ 0 & (t > 10s) \end{cases} \quad \dots (1)$$

$$\omega(t) = \begin{cases} 34^\circ/s & (0 \leq t \leq 1s) \\ 0 & (t > 1s) \end{cases} \quad \dots (2)$$

$$\theta(t) = \begin{cases} \omega(t) \times t & (0 \leq t \leq 1s) \\ 34^\circ & (t > 1s) \end{cases} \quad \dots (3)$$

この式における座標系を図8に示す。ここで、 $F(t)$

はz軸の正方向(水平面となす角度は34°)の力の大きさの目標値で、 $\theta(t)$ および $\omega(t)$ はハンドルの回転角度と回転速度の目標値である。 $n(=1,2,3)$ は3種類の誘導動作の種類を示し、 $f_1 = 21N, f_2 = 29.5N, f_3 = 38N$ (29.5Nは f_1 と f_2 の平均値)である。練習用の誘導動作の生成には同じ式を利用したが、このときの目標値 f_0 は10Nとした。各誘導動作の時間は10秒である。

3.5 評価

学習中に被験者が喉頭鏡モデルに加えた力の大きさ(F_{sub})と、学習中または再現中に喉頭鏡モデルのブレードに加えた力と本来加えるべき力の誤差(F_e)は、動作時間に対する平均値として以下のような計算方式で求めた。 F_{sub} の値は、力の方向とは無関係に算出されるが、 F_e の値は、目標とするハンドルの角度との誤差と、ブレードに加えた力(方向と大きさ)の誤差の両方が考慮されるように定義した。

$$F_{sub} = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \sqrt{F_{sub,x}^2(t) + F_{sub,y}^2(t) + F_{sub,z}^2(t)} dt \quad \dots (4)$$

$$\begin{cases} F_{sub,x}(t) = F_{s1,x}(t) - F_{s2,x}(t) \\ F_{sub,y}(t) = F_{s1,y}(t) - F_{s2,y}(t) \\ F_{sub,z}(t) = F_{s1,z}(t) - F_{s2,z}(t) \end{cases} \quad \dots (5)$$

$$F_e = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \sqrt{F_{e,x}^2(t) + F_{e,y}^2(t) + F_{e,z1}^2(t) + F_{e,z2}^2(t)} dt \quad \dots (6)$$

$$\begin{cases} F_{e,x}(t) = F_{s2,x}(t) \\ F_{e,y}(t) = F_{s2,y}(t) \\ F_{e,z1}(t) = F(t) - F_{s2,z}(t) \times \cos(\theta_{sub}(t) - \theta(t)) \\ F_{e,z2}(t) = F_{s2,z}(t) \times \sin(\theta_{sub}(t) - \theta(t)) \end{cases} \quad \dots (7)$$

ここで、添え字の x, y, z はそれぞれ x, y, z 軸方向の分力であることを示す。また、 sub は被験者が喉頭鏡モデルに加えた力を示し、 e は目標値に対する誤差を示す。 $s1, s2$ はそれぞれ力センサFT sensor1とFT sensor2によって測定する力であることを示す。 τ は誘導動作の時間(10秒)である。

実験結果に対する統計的検定は、3×3の繰り返しのない二元配置分散分析で行った。独立変数は学習条件(OCHD条件、視覚条件、直接駆動条件)と目標値($f_1 = 21N, f_2 = 29.5N, f_3 = 38N$)とした。

4. 結果

4.1 被験者が喉頭鏡に加えた力の大きさ

図9は学習時に被験者が喉頭鏡に加えた力の大きさを比較した結果である。繰り返しのない二元配置分散分析の結果、学習条件の要因と目標値の要因に主効果がみられた(それぞれ, $F(2, 72) = 55.40, p < .001$; $F(2, 72) = 17.41, p < .001$)。また、学習条件の要因と目標値の要因に交互作用が認められた ($F(4, 72) = 2.71, p = .038$)。そこで単純主効果の検定をおこなった結果、各学習条件において、目標値の間に有意差が認められた ($f_1 = 21N: F(2, 72) = 10.32, p < .001$; $f_2 = 29.5N: F(2, 72) = 13.44, p < .001$; $f_3 = 38N: F(2, 72) = 37.05, p < .001$)。目標値毎に Bonferroni の多重比較をした結果、OCHD 条件と直接駆動条件の間 ($f_1: p = .002$; $f_2: p = .001$; $f_3: p < .001$)、及び視覚条件と直接駆動条件の間 (各目標値間において $p < .001$) に有意差がみられたが、OCHD 条件と視覚条件の間に有意差は認められなかった。

また、OCHD 条件と、視覚条件では、目標値の間に有意差が認められたが (それぞれ $F(2, 72) = 12.87, p < .001$, 及び $F(2, 72) = 8.56, p = .001$)、直接駆動条件では有意差が認められなかった ($F(2, 72) = 1.43, p = .25$)。

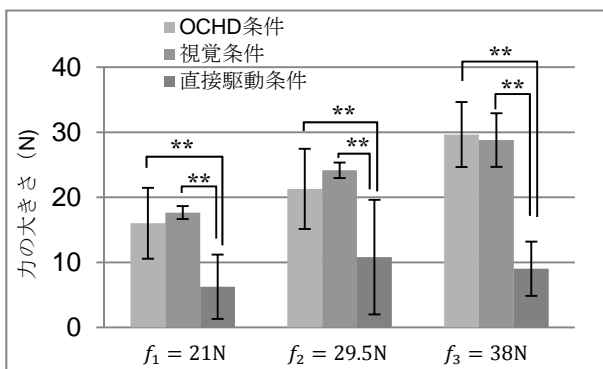


図9 学習時に被験者が喉頭鏡に加えた力の大きさ (F_{sub}) (**: $p < .01$)

4.2 学習時の力の誤差

図10は、被験者が学習している最中に、喉頭鏡モデルのブレードに加えられた力と、本来加えられるべき力の誤差 F_e を比較した結果である。繰り返しのない二元配置分散分析の結果、学習条件の要因と目標値の要因に主効果がみられた (それぞれ $F(2, 72) = 34.98, p < .001$; $F(2, 72) = 12.78, p < .001$)。また、学習条件と目標値の要因に交互作用が認められた ($F(4, 72) = 3.32, p = .016$)。そこで、単純主効果の検定をおこなった結果、

各学習条件において、目標値の間に有意さが認められた ($f_1: F(2, 72) = 5.47, p = .006$; $f_2: F(2, 72) = 6.47, p < .003$; $f_3: F(2, 72) = 29.67, p < .001$)。目標値ごとに Bonferroni の多重比較の結果、OCHD 手法と視覚による誘導手法の間 ($f_1=21N, p=.04$; $f_2=29.5N, p=.05$; $f_3=38N, p<.001$) に、及び、視覚による誘導手法と直接駆動による誘導手法の間 ($f_1=21N, p=.009$; $f_2=29.5N, p=.002$; $f_3=38N, p<.001$) に有意差がみられたが、各動作方式において OCHD 手法と視覚による誘導手法の間に有意差が認められなかった。

また、視覚条件では、目標値の間に有意差が認められたが ($F(2, 72)=16.62, p<.001$)、OCHD 条件と、直接駆動条件では、有意差が認められなかった (それぞれ $F(2, 72)=1.10, p=.34$, 及び、 $F(2, 72)=1.70, p=.19$)。

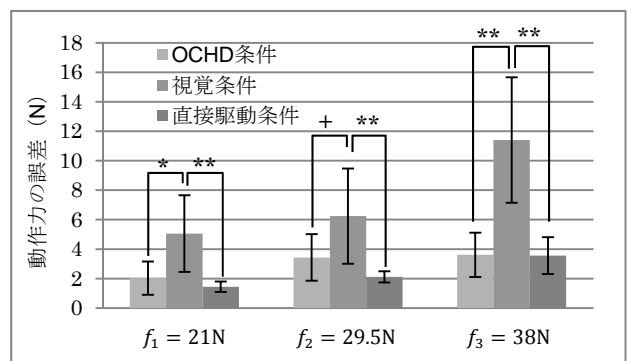


図10 学習時に喉頭鏡モデルのブレードに加えられた力の誤差 (+: $p < .05$; *: $p < .05$; **: $p < .01$)

4.3 再現時の力の誤差

図11は、被験者が学習した動作を再現した時に、喉頭鏡モデルのブレードに加えられた力と、本来加えられるべき力の誤差 F_e を比較した結果である。繰り返しのない二元配置分散分析の結果、学習条件の要因と目標値の要因に主効果がみられたが (それぞれ $F(2, 72) = 15.87, p < .001$; $F(2, 72) = 25.15, p < .001$)、それぞれの要因間に交互作用はみられなかった ($F(4, 72) = 1.07, p = .379$)。Turkey HSD の多重比較の結果、OCHD 条件と視覚条件の間、視覚条件と直接駆動条件の間、および OCHD 条件と直接駆動条件の間に有意差が認められた (それぞれ $p = 0.48, p = 0.006, p = 0.001$)。また、目標値については、 f_1 と f_2 の間に有意傾向 ($p = .06$)、 f_1 と f_3 の間、および f_2 と f_3 の間に有意差がみられた (それぞれ $p < .001, p < .001$)。

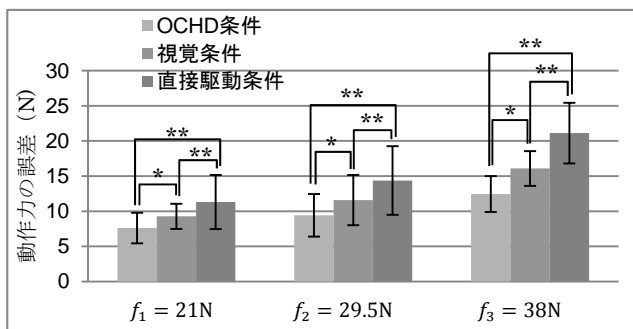


図1.1 再現時に喉頭鏡モデルのブレードに加えられた力の誤差 (* : $p < 0.05$; ** : $p < 0.01$)

5. 考察

4.1の結果から、OCHD条件または視覚条件で学習する場合は、被験者はほぼ自らの力で喉頭鏡を動作させていたことがわかる。これに対して直接駆動条件の場合は、大部分の力がマニピュレータによって出されていたことがわかる。視覚条件の場合は、マニピュレータは喉頭鏡につながれていなかったため、視覚フィードバックによって、被験者が自らの力によって喉頭鏡に力を加えなければならなかった。したがって、この条件では被験者が目標値に近い力を出したのは自然である。これに対して、OCHD条件の場合も、視覚条件とはほぼ同様の力を出して喉頭鏡を動作させていたことは興味深い。直接駆動方式の場合もOCHD方式の場合も、マニピュレータの制御アルゴリズムは同じであったが、OCHD方式の場合には、マニピュレータによる力を感じやすいため、被験者が自ら力を出すこととなり、それに応じてマニピュレータが出す力も減少したと考えられる。これに対して直接駆動条件の場合には、喉頭鏡モデルを握る掌では、マニピュレータが喉頭鏡モデルに加えている力を知覚しづらく、そのために、被験者が喉頭鏡にあまり力を加えなかったと考えられる。

4.2の結果からは、視覚条件では、学習中の誤差が他の条件よりも大きいことがわかる。直接駆動条件の場合には、誤差をなくすようにマニピュレータが喉頭鏡モデルに力を直接加えるため、他の条件と比較して誤差が小さくなるのは必然的である。これに対してOCHD条件において、視覚条件より有意に誤差が小さく、直接駆動条件と差が見られなかったことは興味深い。 F_e の計算には、ハンドルの角度の誤差も考慮されていることから、OCHD条件は手の甲に誘導力を提示しただけであるにもかかわらず、力と角度の両方について、

目標値に近い値を被験者が出すことができていたことがわかる。

一方、視覚条件の場合は、喉頭鏡に加えた力の大きさが目標値に近いにもかかわらず、誤差が大きかった。これは、 F_{sub} の計算には力の方向とハンドルの角度を考慮していなかったが、 F_e の計算には力の方向と角度の誤差が考慮されていることに起因すると考えられる。Korinik[15]の研究では、被験者にある一定の角度に膝を曲げるタスクを課した場合、足に触力覚フィードバックを与える方が、視覚フィードバックを与える場合よりも、被験者が実際に曲げた膝の角度の誤差が小さかったことが示されている。すなわち本実験においても、視覚条件の場合、ハンドルの角度まで目標に合わせることが難しかった可能性が考えられる。

4.3の結果から、動作を思い出して再現する場合には、OCHD条件では他の2つの条件よりも有意に小さい誤差で喉頭鏡を動作させられたことがわかる。直接駆動条件では、学習中にマニピュレータが被験者の力をOCHD条件よりも大きく補助してしまうことになるため、被験者は喉頭鏡を動作させるのに必要な力の大きさを正しく学習できなかつたと考えられる。一方OCHD条件の場合には、自主的に喉頭鏡モデルに力を加えることになったため、正しい力の大きさを効果的に学習できたと考えられる。

6. おわりに

本論文では、喉頭展開のような、強い力を必要とする技能教育に対して、学習者に動作を正しく学習させる手法として、OCHDを提案した。実験の結果、OCHDを利用することで、被験者が誘導されている動作に対して、自主的かつ正確に力を出すことが可能となり、その結果、道具を直接駆動する手法や、視覚情報によってフィードバックする手法よりも、正確に学習できることがわかった。

ただし、現在の実験装置では、OCHDを駆動するために大型のマニピュレータが必要となるため、実用的であるとは言いがたい。今後は、腕に全ての感覚提示機構を装着することのできるウェアラブルOCHDを開発することによって、より実用性の高いシステムを実現することを目指す。

謝辞

本研究は、挑戦的萌芽科学研究費「気管挿管における技能教育のための触力覚提示装置の開発」（課題番号「24650047」）の助成の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] Ayoub, C.M., Kanazi, G.E., Al, A.A., et al.: Tracheal Intubation Following Training with the GlideScope Compared to Direct Laryngoscopy, *Anaesthesia*, Vol.65, No.7, pp.674-678, 2010
- [2] 嵯峨智, 川上直樹, 館暲: 力覚の主体性を活用した指示手法に関する研究, *TVRSJ*, Vol.10, No.3, 363-369, 2005
- [3] Teo, C.L., Burdet, E. and Lim, H.P.: A Robotic Teacher of Chinese Handwriting, *Proc. Of 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp:335-341, 2002
- [4] Bluteau, J., Coquillart, S., Payan, Y., et al.: Haptic Guidance Improves the Visuo-Manual Tracking of Trajectories, *PloS ONE*, Vol.3, No.3, e1775, 2008
- [5] Roberts, K. E., Bell, R.L. and Duffy, A.J.: Evolution of Surgical Skills Training, *World J Gastroenterol*, Vol.12, No. 20, pp:3219-3224, 2006
- [6] Kumagai, T., Yamashita, J., Morikawa, O., et al.: Distance Education System for Teaching Manual Skills in Endoscopic Paranasal Sinus Surgery Using “HyperMirror” Telecommunication Interface, virtual reality conference, pp:233-236, Tokyo, 2008.
- [7] 青山和義: 必ずうまくいく! 気管挿管, 羊土社, pp:82-94, 2004
- [8] Kopacz, D.J., Neal, J.M. and Pollock, J.E.: The Regional Anesthesia “learning curve”. What is the Minimum Number of Epidural and Spinal Blocks to Reach Consistency?, *Reg Anesth*, Vol.21, No.3, pp:182-190, 1996
- [9] Konrad, C., Schupfer, G., Wietlisbach, M., Gerber, H.: Learning Manual Skills in Anesthesiology. Is there a recommended number of cases for anesthetic procedures?, *Anesth Analg*, Vol.86, No.3, pp: 635-639, 1998
- [10] Wang, H.E., Seitz, S.R., Hostler, D., Yealy, D.M.: Defining the learning curve for paramedic student endotracheal intubation. *Prehosp. Emerg. Care*, Vol.9, No.2, pp:156-162, 2005
- [11] Noh, Y., Segawa, M., Shimomura, A., et al: WKA-1R Robot assisted quantitative assessment of airway management, *Int J CARS*, Vol.3, No.6, pp.543-550, 2008
- [12] Wong, W., Kedarisetty, S., Delson, N., et al: The Effects of Cross-Training with Adjustable Airway Model Anatomies on Laryngoscopy Skill Transfer, *International Anesthesia Research Society*, Vol.113, No.4, pp.862-868
- [13] Van, Z.A., Stessel, B., De, R.F., et al.: Video-assisted Laryngoscopy a useful adjunct in endotracheal intubation, *Acta Anaesthesiol Belg*, Vol.58, No.2, pp:129-131, 2007
- [14] 三村 幸司, 森陽介, 三上亮, 松本尚浩, 田川善彦: 気管挿管のための喉頭鏡の操作評価と気管チューブの診断, *バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌*, Vol.10, No.1, 45-50, 2008
- [15] Koritnik, T., Koenig, A., Bajd, T., et al.: Comparison of visual and haptic feedback during training of lower extremities, *Gait Posture*, Vol.32, No.4, pp:540-546, 2010
- [16] Hastings, R.H., Hon, E.D., Nghiem, C., Wahrenbrock, E.A.: Force, Torque, and Stress Relaxation with Direct Laryngoscopy, *Anesth Analg*, Vol.82, No.3, pp:456-461, 1996
- [17] Weber’s Law of Just Noticeable Differences, USD Internet Sensation & Perception Laboratory, <http://people.usd.edu/~schieber/coglab/WebersLaw.html>.
- [18] Yem, V., Kuzuoka, H., Yamashita, N., et al.: Assisting Hand Skill Transfer of Tracheal Intubation Using Outer-Covering Haptic Display, *Proc. of the SIGCHI Conf. on Human Factors in Computing Systems*, pp:3177-3180, New York, 2012
- [19] Biggs, J. and Srinivasan, M.: Tangential Versus Normal Displacements of Skin: Relative Effectiveness for Producing Tactile Sensations, *Proc. 10th Symp. Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp:121-128, Orlando FL, 2002
- [20] Hashemi, S.J., Soltani, H. A. and Saeid, R.: Forces Applied by the Laryngoscope Blade onto the Base of The Tongue and Their Relation with Postoperative Sore Throat, *Medical Journal of Islamic World Academy of Sciences*, Vol.16, No.4, pp:189-193, 2007
- [21] Bucx, M.J., Van-Geel, R.T., Scheck, P.A., et al.: Forces applied during laryngoscopy and their relationship with patient characteristics. Influence of height, weight, age, sex and presence of maxillary incisors, *Anaesthesia*, Vol.47, No.7, pp:601-603, 1992
- [22] Bucx, M.J., Van-Geel, R.T., Meursing A.E., et al.: Forces applied during laryngoscopy in children. Are volatile anesthetics essential for suxamethonium induced muscle rigidity? *Acta Anaesthesiol Scand*, Vol.38, No.5, pp:38:448-452, 1994
- [23] Theron, A., Williams, D., Rawat, S., et al.: Evaluation of intubation techniques using a laryngoscope handle with embedded 3-axis accelerometers and Bluetooth telemetry, *European Journal of Anesthesiology*, Vol.27, No.47, pp:266, 2010