

## 基礎論文

## 気管挿管教育のための外装型力覚提示装置の提案

ヤエム ヴィボル<sup>\*1</sup> 葛岡 英明<sup>\*1</sup> 矢野 博明<sup>\*1</sup> 渋沢 良太<sup>\*1</sup>山下 淳<sup>\*1</sup> 大田 祥一<sup>\*2</sup> 竹内 保男<sup>\*3</sup>

## Proposition of Outer-Covering Haptic Display for Tracheal Intubation Education

Vibol Yem<sup>\*1</sup> Hideaki Kuzuoka<sup>\*1</sup> Hiroaki Yano<sup>\*1</sup> Ryota Shibusawa<sup>\*1</sup>Jun Yamashita<sup>\*1</sup> Shoichi Ohta<sup>\*2</sup> and Yasuo Takeuchi<sup>\*3</sup>

**Abstract** --- Tracheal Intubation is a medical procedure in which a tube is placed into the trachea, through the mouth, to help breathing. Normally, intubation is facilitated by using a laryngoscope, and this skill is very important for an emergency practitioner to master. However, it is not easy to learn this skill because it is hard for learners to understand the way of manipulating the laryngoscope only with verbal and gestural instructions from an instructor while they train this procedure. To assist this learning process, we propose a new haptic display called Outer-Covering Haptic Display (OCHD) which covers learner's hand and applies haptic sensation to the outside of the learner's hand holding the laryngoscope. OCHD is controlled by the instructor using master-slave method so that the learner's hand movement is guided as if it is accompanied by the instructor's hand. Our preliminary experiment showed that the OCHD has a possibility to guide the learners hand with less drive force compared to the case that the laryngoscope is directly operated.

**Keywords:** Tracheal intubation, medical instruction, Outer-Covering Haptic Display

## 1 はじめに

気管挿管とは、麻酔・集中医療・救急などの医療現場において、喉頭鏡(図1左)を用いて呼吸困難に陥った患者の口を開き、気管を目視しながら気管チューブを挿入することによって人工呼吸ができる状態にする(気道確保)医療行為である(図1右)。厚生労働省は、「平成16年7月を目途に、必要な講習・実習を修了する等の諸条件を満たした救急救命士に、限定的に気管挿管を認めるべきである」と報告し[1]、それを受けて救急救命士も気管挿管を行えるようになった。この報告書ではさらに気管挿管の教育について、「特に病院における実習の成否が、救急救命士による気管挿管の制度に当たって最も重要な課題である」と報告している。しかし気管挿管は教育が容易ではなく、より効果的な教育法の開発が望まれている。

気管挿管の教育においては、これまでも 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を利用した訓練が実施されている。これらによって、習得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教育を受けても、喉頭鏡の動かし方を教示することが容易ではないため、初回の実習において気管挿管に失敗する習得者の割合は少なくない[3]。

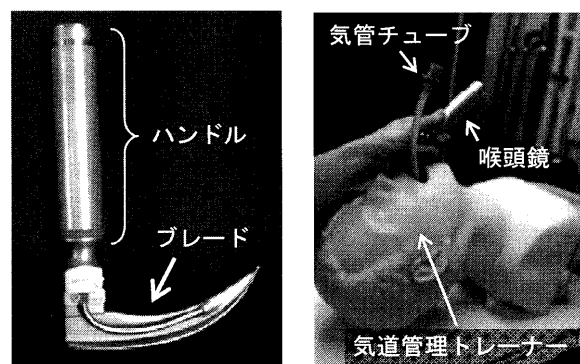


図1 喉頭鏡(左)と気道管理トレーナーを利用した気管挿管の訓練の様子(右)

Fig.1 Laryngoscope (left) and airway management training (right)

そこで本研究では、シミュレータを利用した教育において、マスタスレーブ型のマニピュレータを用いた触力覚提示によって、正しい喉頭鏡の動かし方を、教示者が

\*1 筑波大学大学院システム情報工学研究科

\*2 東京医科大学救急医学講座

\*3 帝京大学医学部救急医学講座

\*1 Graduate School of System and Information Engineering, University of Tsukuba

\*2 Emergency and Critical Care Medicine, Tokyo Medical University

\*3 Department of Emergency Medicine, Teikyo University School of Medicine

習得者に対して効果的に教示できるシステムを開発することを最終目的とする。本研究の特徴は、習得者が把持する器具を直接マニピュレータで駆動することによって触力覚を伝えようとするのではなく、器具を持つ手の外側から触力覚を提示する方法を提案している点である。本論文では、この方式を実現する外装型力覚提示装置(OCHD: Outer-Covering Haptic Display)を提案し、その基本的な性能を確認することを目的とする。本研究はまだその初期段階にあり、本論文で紹介する装置は、気管挿管教育に必要とされる機能の一部しか実装できていないため、気管挿管教育に対する効果の検証は本論文の対象外とする。

以降、第2節では一般的な気管挿管教育における課題と本研究で提案する手法について概説する。第3節では関連研究を紹介し、本研究の新規性を明確にする。第4節では本研究で提案する外装型力覚提示装置を紹介する。第5節では、この装置のpitch軸周り(図2)の触力覚提示に対する有効性を確認する実験とその結果を示す。第6節では、結果に関して考察する。

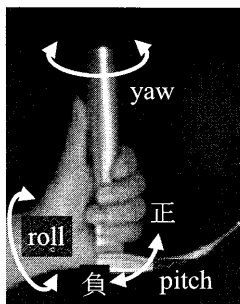


図2 喉頭鏡の回転方向

Fig.2 Rotation direction of laryngoscope

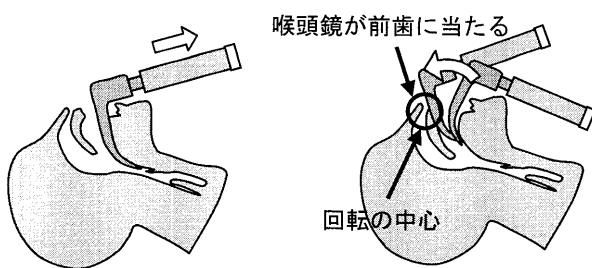


図3 喉頭鏡の正しい動作(左図の矢印方向)と誤った動作(右図の矢印方向) ([2]より修正の後転載)

Fig.3 Correct (left) and incorrect (right) manipulation of laryngoscope

## 2 気管挿管教育の課題

気管挿管において重要なのは、仰向けに寝ている患者の口腔内に喉頭鏡を差し入れ、下あごを上方に持ち上げて口を開くことによって喉頭(気管の入り口)を視認

できるようにする、喉頭展開という手技である。喉頭を視認することによってはじめて気管チューブを正確に気管に挿入することが可能となる。

気管挿管を成功させるためには、喉頭鏡を正しく操作することが重要である。しかし患者の様々な状況に対応して喉頭鏡を正しく口腔内に挿入し、安全に喉頭展開をおこなうためには、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[2]。喉頭鏡の動かし方を誤ると、気道が確保できないだけでなく、口腔内を傷つけたり、患者の歯を折ったりする可能性もある。たとえば喉頭展開においては、図3(左)に示すように、喉頭鏡をハンドルの軸方向に動かすことによって、舌とともに下あごを押し開かなければならない。しかし習得者にとっては、図3(右)のように、前歯をテコの支点にして、下顎を押し上げるように喉頭鏡を動かす方が楽であるため、初習者にはこのような操作をする例が多い。しかしそのような操作をすると、強い力が前歯にかかるために、前歯が折れてしまう可能性が高い。

現在、このような手技の教育を支援するために、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する方法が普及している。これらのシミュレータでは、前歯に強い力がかかりすぎると、クリック音が発生したり、前歯が脱落したりしている。このようなシミュレータを利用することによって、容易に気管挿管教育を実施することができるようになった。しかし、筆者らが実際の教示者に対しておこなったインフォーマルなインタビューからは、このようなシミュレータを利用した場合でも、喉頭鏡の正しい動かし方を教示することは難しいという感想が聞かれた。実際に過去の研究からも、初めて気管挿管教育を受けた習得者は喉頭鏡を正しく操作できないために、口腔内の様々な部位に必要以上の圧力をかけてしまっていることが示されている[3][17]。

以上の考察より、気管挿管教育においては、喉頭鏡の動かし方の教示が重要であることがわかる。一般的な気管挿管教育においては、まず教示者がシミュレータ等を利用して実演をしながら、言葉や身振りで喉頭鏡の動かし方を説明する。その後、習得者は喉頭鏡を持ち、シミュレータを利用して気管挿管を実施するが、この間、習得者の視線はシミュレータの口腔内に向いているため、教示者が喉頭鏡の動きを補正する指示を与える場合には、主に言葉で伝えることになる。しかし、先に述べた通り、こうした手法では喉頭鏡の動かし方を十分に理解させることができていないことが多いのである。

一方、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を教示する手段として、触力覚提示装置を利用する方法が提案されている[8]。このような装置を用いれば、習得者が自ら気管挿管を実演している最中に、教示者が触力覚提示装置を用いることによって、喉頭鏡の動かし方を教示することができると期待される。そ

ここで本研究においても、そのような方式によって気管挿管教育を支援することを試みることにした。

筆者らはすでに、教示者と習得者双方に対して、お互いが喉頭鏡を動かす力を体感可能にするマスタスレーブ型の教示システムを開発している[3]。このシステムでは6自由度の平行リンク機構を用いて、機構的にマスタ喉頭鏡とスレーブ喉頭鏡を接続している[3]。これを用いることによって、習得者と教示者がお互いの動作をリアルタイムで共有可能になり、教示者は喉頭鏡の動かし方を習得者に直接伝えられる。この手法によって従来の教示方法よりも高い学習効果が得られた。しかし同時に、装置の慣性力が大きく、喉頭鏡が操作しづらいという問題が明らかになった。そこで、この問題を解決するために、モータ駆動の6自由度マニピュレータの先に喉頭鏡を取り付けることによって、機構の慣性力をキャンセルすることとした(図4)。また、教示者がこのマニピュレータをマスタスレーブ方式で操作することによって、喉頭鏡の正しい動かし方を触力覚で提示できるようにすることを計画した(図5)。

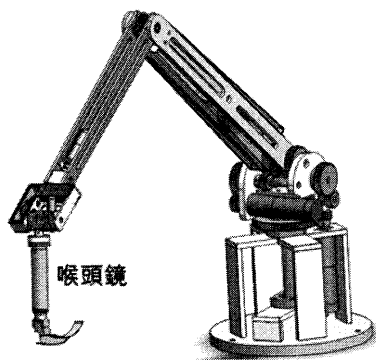


図4 教示用6自由度マニピュレータ  
Fig.4 6 DOF manipulator for instruction

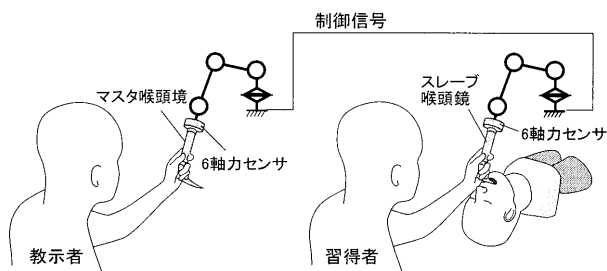


図5 マスタスレーブ方式による動作教示の概念図  
Fig.5 Schematic diagram of the motion guidance using master-slave method

本研究では、教示者は習得者の隣にいて、習得者の実演の様子を観察しながら、必要に応じてマスタを操作することを想定している。教示者のマスタとしては、スレーブと同様に6自由度マニピュレータに喉頭鏡を取り付けたものを利用する方法が一般的であると考えている。

他にも、6軸力系を用いたジョイスティックを製作し、これを利用する方法も考えられる。この場合、教示者は習得者の動作を観察しながら、喉頭鏡の動きを補正すべき方向を、ジョイスティックを用いて入力することになる。ただし、マスタ喉頭鏡の機構や制御方式に関する議論は、本論文の対象外とする。

ところで Weber の法則によれば、習得者が喉頭鏡を強く握っているときに、教示者が習得者の動作を修正するためには、把持力に比例した大きさの力の変化を与えないと、習得者に修正方向を知覚させることができないと予想される。しかし、喉頭鏡の操作には一般に大きな力を必要とするため、習得者は喉頭鏡を強く握ることになる。すると、机上におけるような、実用的な大きさのマニピュレータで十分なトルクを発生させることは容易でなく、仮に可能であったとしても高出力のマニピュレータを利用することは、安全性の点においても好ましくないと考えられる。

以上の考察に基づき、高出力のマニピュレータによって喉頭鏡を直接駆動するのではなく、喉頭鏡を持つ習得者の手の外側を覆う装置をとりつけ、あたかも教示者が手を添えるかのようにして、動作を伝えられるようにすることを提案する。強い圧力が加えられていない手の外側に誘導用の触力覚を提示することによって、小さい力で習得者に教示方向を知覚させられることが期待できる。そこでこの提案を実現するために、教示用6自由度マニピュレータの先端に取り付けて使用する、外装型力覚提示装置(OCHD)を開発することとした。

### 3 関連研究

スポーツや訓練、リハビリにおける触力覚については、國安ら[4]は前腕部皮膚を引っ張るようなゴムベルトを用い、K. Barkら[5]はひじに近い前腕部の皮膚をねじる2個のエフェクターを用いることによって、手の動作を提示可能なデバイスを開発している。これらの研究では触覚を前腕部に提示している。これに対して本論文では、手首の回転を要する6自由度の喉頭鏡の動作を伝えることを目指しているため、手の甲側に加えられた触力覚に対する効果を調査している。特に、道具を握る手のひら側と、外力の加えられていない手の甲側に提示された触力覚に関して、刺激閾を比較調査している点の特徴である。

医療以外の分野で動作の教示を支援する触力覚提示装置の研究として、正守ら[6]や Teoら[7]はペン型システムを用い、嵯峨ら[8]は PHANTOM を用いて書道の教示を行っている。これらの研究では、いずれも習得者に力を提示することの有効性が示されている。しかし、いずれも小さな力で道具を把持しながらおこなわれる動作の支援を目的としていたため、比較的小さな力で道具を直接駆動しても、習得者に触力覚を知覚させることがで

きた。これに対して、比較的大きな力で道具を操作しなければならない気管挿管においては、高出力の装置が必要となるため、システムが大型化したり、安全性の面で問題が生じたりする可能性がある。

医療分野では、野嶋ら[9]は SmartTool を用い、鈴木ら[10]は HMD を用いて作業支援のための立体視システムを開発している。野嶋らの SmartTool は、あらかじめ作業対象となる医療行為の情報を測定しておき、実際の作業時にその情報を作業員に対して、力覚の変化に応じて情報を提示することによって作業支援を行うシステムである。しかし、医療に使われる道具の動作の教示については扱っていない。一方、鈴木らのシステムは手術時の切開部位の結紮(けっさつ)を教示支援するものである[10]。このシステムでは、習得者と教示者の手をスーパーインポーズで合成することで、言葉や身振りで教示をすることは出来るが、喉頭鏡の動作を身振りや言葉だけで教示することが困難であることは医療教育の現場でも指摘されており、このシステムだけでは不十分である。

気管挿管を行う際に、挿管を支援するためのいくつかの手法や器具、装置が実用化されている。ラリンジアルマスクや Fastrach と呼ばれる特殊な器具を使う方法では、挿管を容易にすることができるが、患者の容体によってこの器具を利用できないこともあり、また胃の内容物が逆流しやすくなるという問題がある[11]。この為、喉頭鏡を用いた気管挿管の必要性は依然として高い。

口腔内の観察とその映像の共有を目的とした装置として、喉頭鏡の先端などにカメラを内蔵することにより、口腔内映像の撮影が可能なスタイレットスコープやビデオ喉頭鏡などの機材が開発されている。また、これらの機材を使用した気管挿管教育の支援も提案されている[12][13][14][15]。また、板原ら[16]は視線一致 CCD カメラとヘッドマウントディスプレイ(HMD)とを組み合わせたビデオシースルー方式の教示システムを開発している。このシステムでは、教示者が HMD を装着した状態で喉頭鏡を操作することによって、実際に気管挿管を実施するときの教示者の注目点を習得者にも見せることができる。したがって、習得者が実際に喉頭鏡を用いて実習する際にも教示時と実習時の見え方に違いが少なく、効果的に実習できると考えられる。しかしこの手法では、道具の動かし方を直接的に教えることはできない。

Y. Noh ら[17]は、喉頭鏡の操作の正しさを評価できるように、患者のモデルロボットを開発している。このロボットに組み込まれた力センサ等により、習得者の操作と教示者の操作を数値的に比較して評価することが可能となった。その評価結果からも、初心者は喉頭鏡を正しく操作できないことが示されており、喉頭鏡の動かし方を教示する手法が必要であることがわかる。

これに対して、三村ら[18]や筆者らの先行研究[3]では気管挿管教育の支援には、喉頭鏡の動きの教示が

重要であるという考え方に基づいてシステムの開発を行っている。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。一方、筆者らの先行研究で利用したマスタスレーブ型の装置は、教育に対する効果は観察されたが、モータを利用せずに機構のみで構成されているため、装置の操作性が悪いことが指摘されている。

そこで本論文では、モータ駆動されるマニピュレータと、外装型力覚提示装置(OCHD)を利用することによって、喉頭鏡の動かし方を直接教示する手法を提案する。

#### 4 OCHD のデザイン

OCHD は、教示者の手をあたかも習得者の手の上に添えるかのような方法で、喉頭鏡の操作を教示するデバイスである。したがって、OCHD は習得者の手の外側にかぶせる構造となっている(図 6)。本装置をマニピュレータに取り付けたシステム全体図を図 7 に示す。本装置は、教示用 6 自由度のマニピュレータによって駆動されるため、OCHD はなるべく軽量となるように開発し、マニピュレータに余計な負荷がかからないように考慮した。またこの場合、習得者が持つ喉頭鏡はマニピュレータには接続されず、単に習得者が保持するだけである。

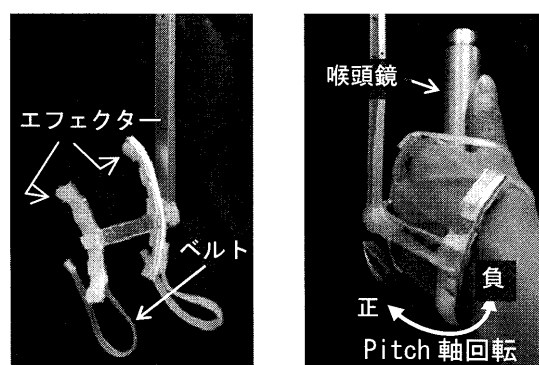


図 6 外装型力覚提示装置(左)と手に装着した様子(右)

Fig.6 OCHD(left) and a hand wearing OCHD(right)



図 7 マニピュレータに取り付けられた OCHD

Fig.7 OCHD being joined to manipulator

気管挿管教育における喉頭鏡の動きを効果的に指示するためには、6軸成分(x、y、z軸方向の並進成分と、各軸周りの回転成分)の触力覚を提示できるようにする必要があると考えている。これに対して図6のOCHDでは6軸成分を提示するに十分であるかどうかは不明である。しかし本論文では研究の初期段階として、pitch軸周りに対する提示効果を確認することによって、提案方式の可能性を早期に確認することを優先した。

#### 4.1 構造

習得者が喉頭鏡を力強く把持している時には、手のひら全体を使って喉頭鏡を把持するため、Weberの法則により、把持力が強くなるに従って、把持部から習得者の手のひらに働く力の変化を知覚しにくくなる。その為、OCHDの構造は、図6に示すように手の甲の手首に近い位置と指の付け根にフレームを軽くかぶせるような構造とした。このフレームはアルミで作られており、重さは約80gである。これはステンレス製の喉頭鏡(約500g)よりも十分軽量である。

またOCHDを装着する際は、シリコンで製作した伸縮性のベルトを2枚使って手に巻き付けるようにした。これらのベルトは幅が5mm、厚みが2mmであり、両先端にマジックテープを取り付けた。このような機構を採用することによって、習得者の手の大きさに違いに対応し、提示方向を知覚しやすく、一人でも簡単に装着できるようにした。

#### 4.2 エフェクター

佐藤らの研究[19]によれば、触覚提示装置の皮膚接触面の形状に凹凸をつけ、皮膚の変形によるひずみエネルギーを増加させることによって、平面を接触させた場合よりも強い力を知覚させられることがわかっている。このことから、OCHDを少ない接触面積で手の甲と接触させると、装置による微小な圧力変化が検知しやすくなることが期待できる。この効果を実現するために、手の甲にかぶせるアルミフレームの内側にシリコン製の小さな正方形(一辺10mm、厚み2mm)のエフェクターを一定間隔(10mm)で取り付けた。

### 5 刺激閾実験

#### 5.1 実験の目的

本実験では、OCHDの触力覚提示能力を確認することを目的として、喉頭鏡を直接駆動する教示条件(直接駆動条件)と、OCHDを用いて教示する条件(OCHD条件)の、習得者の刺激閾を比較する。本論文では研究の初期段階として、気管挿管において重要な動作であるpitch軸周り(図2)の回転に関する刺激閾のみを評価し、これによって、OCHDが、直接駆動された喉頭鏡よりも少ない駆動力で同等の触力覚を提示できることを示す。最終的には、6軸方向の成分すべてに対して同様

の効果を発揮できるOCHDを開発し、気管挿管教育に対する効果を評価する必要があるが、それは今後の課題とする。

#### 5.2 実験装置

喉頭鏡を用いて気管挿管を実施する際、喉頭鏡には強い力がかかるが、その力は習得の度合いや患者の体格によって変化する。したがって、喉頭鏡を把持する力は状態に応じて変化するようになる。こうした場合、Weberの法則によって弁別閾の値が変化することが予想されるため、本実験で0kgf、1kgf、2kgfの2つの異なる握力も条件として設定した。0kgfの握力というのは、ほとんど力を入れずに喉頭鏡を把持するように被験者に提示をした場合である。3つの握力条件に対して、OCHDを使う場合と使わない場合の2つ条件で実験を行うため、合計6条件で実験を実施した。この握力を測定するために、図8に示すような喉頭鏡の把持部のみをモデル化した喉頭鏡モデルパイプを作製し、これを利用した。このパイプの外径は喉頭鏡と等しいが、パイプを握る圧力を測定できるように、図8に示すとおり、内部の2カ所に圧力センサを取り付けた。

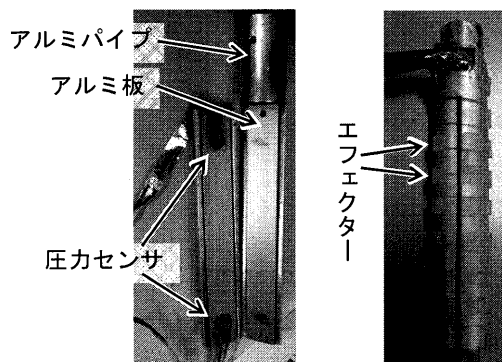


図8 喉頭鏡モデルパイプの内部(左)と外観(右)  
Fig.8 Internal structure (left) and the outside view (right) of an laryngoscope model pipe

また、OCHDと喉頭鏡モデルパイプ(図8)の把持部の触感の違いが被験者の知覚に及ぼす影響を少なくするために、このパイプの把持部にOCHDに使われているものと同じシリコン製の小さなエフェクターを取り付けた。本実験での方向提示手法は、OCHD又は喉頭鏡モデルのパイプとそれらを動かすためのモータとの間に6軸力センサを取り付け、閉ループ制御によって、常にモータに一定のトルクが加えられるようにした。

実験システムでは、目標とする刺激値(トルクが達する)まで500msかかるため、刺激を提示する時間は全て500msとした。実験装置の概念図を図9、実験の様子を図10に示す。

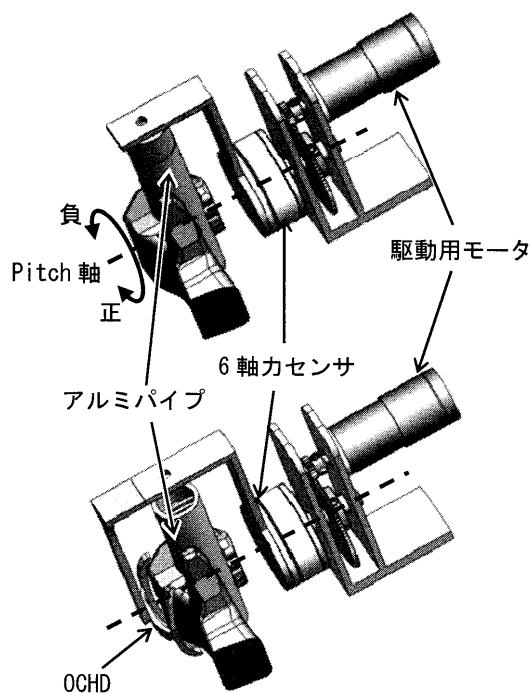


図9 直接駆動条件(上)とOCHD条件(下)の実験装置  
Fig.9 Experimental devices for direct driving condition (upper) and OCHD condition (lower)



図10 OCHD条件の実験の様子  
Fig.10 Experiment under OCHD condition

### 5.3 実験手順

まず、被験者は椅子の上に座り、ひじを机の上に置いた。6つの条件における試行ごとに喉頭鏡モデルパイプを握った。OCHD条件の場合には喉頭鏡モデルパイプはどこにも接続されていないため、垂直になるように握るように指示した(図9下)。直接駆動条件の場合、モデルパイプは装置に接続されていたため、それをそのまま握らせた(図9上)。被験者にはあらかじめ、pitch軸周りの回転を提示することは知らせていた。

刺激閾は単純上下法によって計測されたが、提示する正方向の回転と負方向の回転(図10)をランダムに混ぜることにより、被験者は正負方向のどちらが提示され

ているのが、常に予測できないようにした。被験者は、システムから指示があるたびに(後述)回転方向を答えた。このようにして、1条件あたりそれぞれの回転方向について6回ずつ計測がおこなわれ、その平均値を各回転方向の刺激閾とした。

被験者は21歳~29歳の男性8名であった。本実験では、被験者がOCHDありとなしの両条件で実験を実施する、被験者内計画で実施した。また、学習効果を避けるために、半分の被験者は徐々に握力が增加する順番で計測をし、残りの半分は徐々に減少する順番で計測をした。OCHDの有無の順番と握力の増減方向については、カウンターバランスを取った。

また、システムの動作状態や動作音が実験の結果に与える影響を考慮して、実験時には被験者にHMDとホワイトノイズが流れているヘッドセットを装着させた。HMDには、目標握力と現在の握力を棒グラフ状に表示し、これを見ながら被験者が握力を目標値に保てるようにした。被験者に対する指示や被験者が回答した回転方向もリアルタイムで表示させた(図11)。知覚した回転方向を回答するタイミングは、このHMD内のメッセージで示された。圧力センサにはFlexiForce A201-100、I/OボードにはPhidget Interface Kit 8/8/8、HMDにはeMagin Z800 3DVisor、6軸力センサにはATI Mini-40、モータにはRE-Max 11Wを使用した。

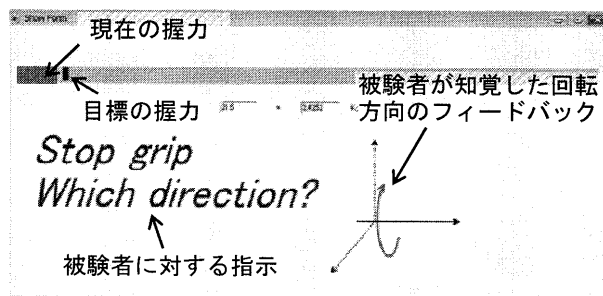


図11 HMDに表示される情報  
Fig.11 Information shown in HMD

### 5.4 実験の結果と分析

各握力における刺激閾の平均値を、OCHD条件と直接駆動条件で比較したグラフを、pitch軸周りの正方向に対する結果(図12)と負方向に対する結果(図13)に分けて示す。この分析は正方向と負方向それぞれに対して、装置条件と握力を独立変数、刺激閾を従属変数とした繰り返しのある二元配置分散分析で行った。その結果、装置の要因(正方向: $F(1, 42)=76.25, p<.01$ 、負方向: $F(1, 42)=43.02, p<.01$ )と握力の要因(正方向: $F(2, 42)=18.85, p<.01$ 、負方向: $F(2, 42)=15.52, p<.01$ )に主効果がみられ、装置と握力の要因に交互作用が認められた(正方向: $F(2, 42)=13.72, p<.01$ 、負方向: $F(2, 42)=12.07, p<.01$ )。さらに、この交互作用について、単

純主効果検定をおこなった結果、直接駆動条件では各握力における刺激閾に有意な差があるが(正方向:F(2, 42)=32.31,  $p<.01$ , 負方向:F(2, 42)=27.09,  $p<.01$ )、OCHD 条件については有意な差がなかった(正方向:F(2, 42)=.25,  $p=.78$ , 負方向:F(2, 42)=.5,  $p=.61$ )。Bonferroni の多重比較の結果、握力 0kgf については、装置条件の間に有意な差が認められなかったが(正方向:F(1, 42)=1.57,  $p=.22$ , 負方向:F(1, 42)=.27,  $p=.61$ )、握力 1kgf の場合(正方向:F(1, 42)=27.19,  $p<.01$ , 負方向:F(1, 42)=11.62,  $p<.01$ )と、握力 2kgf の場合(正方向:F(1, 42)=74.92,  $p<.01$ , 負方向:F(1, 42)=55.28,  $p<.01$ )については、有意水準 1%で正負両方向の回転に対して、OCHD 条件と直接駆動条件の間に有意な差が見られた。

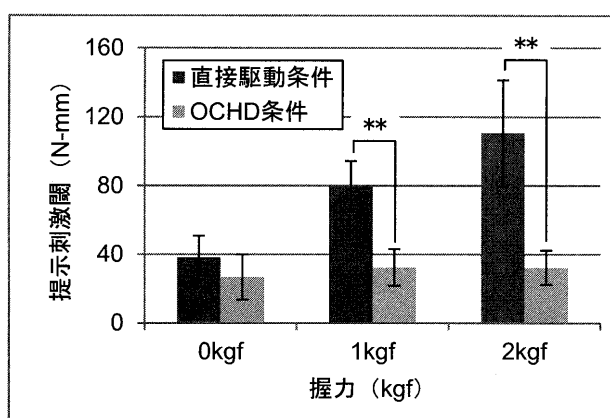


図 12 Pitch 軸周りの正方向に関する刺激閾(\*\*:  $p<.01$ )

Fig.12 Absolute threshold for stimulation of forward pitch rotation; “\*\*” denotes significant difference at  $p<.01$  level

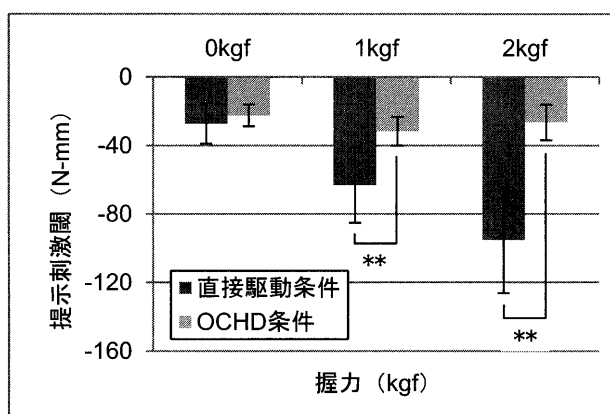


図 13 Pitch 軸周りの負方向に関する刺激閾(\*\*:  $p<.01$ )

Fig.13 Absolute threshold for stimulation of backward pitch rotation; “\*\*” denotes significant difference at  $p<.01$  level

## 6 考察

### 6.1 OCHD の有効性

5 節の実験結果が示すように、直接駆動条件では、Weber の法則の効果のため、喉頭鏡を握る力(握力)が大きくなるほど、提示方向を被験者に知覚させるために

必要な刺激の強さが大きくなった。一方、OCHD 条件では、握力が大きくなっても、方向提示の刺激の強度はほぼ変化しないことが確認できた。この結果から、今回試作した OCHD を利用することによって、喉頭鏡を直接駆動する条件と比較して小さな駆動トルクで、pitch 軸周りの回転方向の動作を習得者に伝達できることが分かった。特に握力が 2kgf の時では、OCHD 条件では、直接駆動条件と比較して必要なトルクが 1/3 以下であった。したがって、OCHD を利用することによって、気管挿管を支援するためのシステムを小型にできて、安全性も向上させられる可能性があることが分かった。

一方、本実験で確認できたのは、pitch 軸周りの回転方向成分に対する有効性のみである。しかも、被験者は pitch 軸周りの回転方向に対する力が提示されることを知っていた。しかし、実際の気管挿管教育において喉頭鏡の動かし方[2]を指示するためには、6 軸すべての成分を複合して提示する必要があると考えられる。このような場合に、現状の OCHD で未知の複合的な動作をどの程度正しく理解できるかということについては、今後の研究課題である。

ところで今回の実験結果では、握力 0kgf の場合、OCHD 条件と直接駆動条件の間に有意な差が見られないことがわかった。しかし、手の甲側は手のひら側よりも受容器が少ないため[20][21]、むしろ手のひら側に刺激が与えられる直接駆動条件の方が刺激閾が小さくなると予想される。握力 0kgf においてこのように予想に反する結果が得られた原因は今回の実験からは明らかにすることはできない。しかし、佐藤らの研究[19]では、触覚提示装置が皮膚に及ぼす変形の仕方に応じて、人の力弁別能力が変化する可能性が示されている。本実験においては、OCHD 条件の方が手に接触するエフェクターの数が少ないため、直接駆動条件と比較して、局所的により大きな圧力が皮膚の接触部に加えられた可能性がある。これによる、皮膚の変形や張力[5]によって、刺激が大きく感じられた可能性がある。より、効果的な OCHD を開発するためには、こうした点について今後の研究が必要である。

### 6.2 本実験と実際の気管挿管教育との相違点

本論文では、OCHD の提案と、その性能の一部に対して評価をおこなうことを目的としているため、実際の気管挿管教育における有効性に関しては、様々な検討課題が残されている。

まず本実験では、実験条件をなるべく等しくするために、実際の喉頭鏡(図 1 左)を使わず、エフェクターを取り付けたパイプ(図 8)を使った。しかし実際の喉頭鏡のハンドル部分は金属性であり、エフェクターよりも力覚を感じにくい可能性がある。実際の喉頭鏡を利用した場合については、今後実験により確認する必要がある。

また、先述の通り、効果的な気管挿管教育のためには、OCHD は 6 軸すべての成分を提示できる必要がある。さらに、動作方向を伝えるための触覚の提示のみで良いか、操作の強さを伝える力覚の提示も必要であるかは、明らかにできていない。本研究では、教示者と習得者が対面した状況で音声で会話をしながら実施される教育を想定している。従って、OCHD で喉頭鏡の操作方向さえ伝えられれば、力の強さについては言葉で伝えれば十分である可能性もある。これらの点については、今後検討した上で、適切な形状の OCHD を開発する必要がある。

## 7 おわりに

本研究では、直接喉頭鏡を駆動するのではなく、あたかも習得者に手を添えるかのように習得者の手の外側にかぶせる外装型力覚提示装置 (OCHD) を用いて、手の外側から力覚を提示することによって、喉頭鏡の動かし方を教示する方式を提案した。この装置の触力覚提示に対する有効性を確かめるため、刺激閾を測定する評価実験を行った。その結果、OCHD を利用することによって、喉頭鏡を直接駆動する場合よりも小さい駆動トルクで習得者に動作方向を知覚させられることが確認できた。

今後、OCHD を取り付けたマニピュレータを利用したマスタスレーブ方式の教示システムを開発する。また、開発したシステムを利用して、実際の医学生、研修医、救急救命士に対して本手法による教育を試みる予定である。

## 謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤(B)「動作教示に注目した気管挿管教育支援システムの開発」(課題番号:20390148)の助成の支援を受けて行われた。

## 参考文献

- [1] 平成 13 年度厚生科学研究「救急救命士による適切な気道確保に関する研究報告書」
- [2] 青山和義: 必ずうまくいく! 気管挿管, 羊土社, 2004
- [3] H. Kuzuoka, M. Yamaoka, J. Yamashita: Tracheal Intubation Instruction using Operation Sharing Mechanism, Proc. of ASIAGRAPH, 168-171, 2008
- [4] 國安裕生, 中田五月, 橋本悠希, 梶本裕之: 前腕部皮膚変形による疑似牽引力提示装置, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A2-E0, 2010
- [5] K. Bark, J. Wheeler, G. Lee, J. Savall: A Wearable Skin Stretch Device for Haptic Feedback, Proc. World Haptics Conf., 464-469, 2009
- [6] 正守晋, 佐久間正泰, 原田哲也: HMD を用いた遠隔書道システム, 日本バーチャルリアリティ学会第 5 回大会論文集, 119-122, 2000
- [7] C. L. Teo, E. Burdet, H. P. Lim: A Robotic Teacher of Chinese Handwriting, Proc. Of 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 335-341, 2002
- [8] 嵯峨智, 川上直樹, 館暲: 力覚の主体性を活用した教示手法に関する研究, TVRSJ, Vol.10, No.3, 363-369, 2005
- [9] 野嶋琢也, 関口大陸, 稲見昌彦, 館暲: 力覚提示を利用した実時間実環境作業支援システムの提案, TVRSJ, Vol.7, No.2, 193-199, 2002
- [10] 鈴木雅史, 葛岡英明, 行岡哲男: 遠隔医療支援システムの開発, 日本バーチャルリアリティ学会第 5 回大会論文集, 431-434, 2000
- [11] 安本 和正: 気道確保—私ならこうする— ラリンジアルマスク・Fastrach™, 日本臨床麻酔学会誌, Vol.25, No.3, 253-257, 2005
- [12] G. B. Shulman, N. G. Nordin, N. R. Connelly: Teaching with a video system improves the training period but not subsequent success of tracheal intubation with the Bullard laryngoscope, Anesthesiology, 98: 615-20, 2003
- [13] 古賀義久: これからの気管挿管教育に向けて, 日本臨床麻酔学会誌, Vol.25, No.3, 272-277, 2005
- [14] M. Weiss, U. Schwarz, C. M. Dillier, A. C. Gerber: Teaching and supervising tracheal intubation in paediatric patients using videolaryngoscopy, Paediatr Anaesth, 11: 343-8, 2001
- [15] M. B. Kaplan, D. Ward, C. A. Hagberg, G. Berci, M. Hagiike: Seeing is believing: the importance of video laryngoscopy in teaching and in management the difficult airway, Surg Endosc, 20(suppl):S479-S483, 2006
- [16] 板原達也, 葛岡英明, 太田祥一, 須田高之: 気管挿管の教示支援に関する研究, 日本バーチャルリアリティ学会研究報告 ウェアラブル/アウトドア VR 研究会, VR 学研報 G Vol.9, No.1, 25-28, 2004
- [17] Y. Noh, M. Segawa, A. Shimomura, H. Ishii, J. Solis: WKA-1R Robot assisted quantitative assessment of airway management, Int J CARS, 3:543-550, 2008
- [18] 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, Vol10, No.1, 45-50, 2008
- [19] 佐藤淑美, 橋本悠希, 梶本裕之: 皮膚接触面の形状変化による疑似的な力覚提示手法, 日本バーチャルリアリティ学会 第 13 回大会論文集, 2A2-1, 2008
- [20] R. S. JOHANSSON, A. B VALLBO: Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin, J. Physiology, 286, 283-300, 1979
- [21] J. W. Morley: Neural Aspects of Tactile Sensation, The Netherlands: Elsevier science B. V, 89-130, 1998

(2011 年 6 月 8 日)



[著者紹介]

ヤム ヴィボル (学生会員)



2010年筑波大学工学システム学類機能工学システム専攻卒業。現在、同大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻博士前期課程在学中。力覚提示、ユーザインタフェースに関する研究に従事。

葛岡 英明 (正会員)



1992年東京大学大学院工学系研究科修了。同年筑波大学構造工学系講師、現在、筑波大学大学院システム情報工学研究科教授。CSCW、HRI、ユーザインタフェースの研究に従事。博士(工学)。

矢野 博明 (正会員)



1997年筑波大学大学院工学研究科修了。同年日本学術振興会特別研究員(PD)、99年筑波大学講師、現在、同大准教授。力覚提示、移動感覚提示に関する研究に従事。博士(工学)。

渋沢 良太 (学生会員)



2009年静岡県立大学大学院経営情報学研究科修了。現在、筑波大学大学院システム情報工学研究科博士後期課程在学中。ユーザインタフェース、e-Learningに関する研究に従事。

山下 淳 (正会員)



1997年筑波大学第三学群工学システム学類卒業、1999年筑波大学大学院修士課程理工学研究科修了、2002年筑波大学大学院博士課程工学研究科単位取得退学。同年東京大学先端科学技術研究センター特任助手、2005年より現職。テレビ会議システムの開発と評価、五感インタフェースの開発など相互コミュニケーション技術の研究に従事。

大田 祥一 (非会員)



1988年東京医科大学卒業、1992年杏林大学医学部付属病院救急医学教室助手、2002年東京医科大学霞ヶ浦病院救急医療部講師、2006年東京医科大学八王子医療センター教授・救命救急センター長を経て、2009年現職。

竹内 保男 (非会員)



2004年順天堂大学大学院スポーツ健康科学研究科博士前期課程修了、2009年順天堂大学大学院医学研究科博士課程満期退学、1996年福井県大野地区消防本部、2004年湘中央生命科学技術専門学校専任教員、2006年帝京大学国際教育研究所研究員、現在に至る。心肺蘇生に関わるデバイスの評価・適正使用・普及に関わる研究に従事。修士(スポーツ健康科学)。