

外装型触力覚提示装置を用いた
手技訓練手法に関する研究

2015 年 3 月

YEM VIBOL

外装型触力覚提示装置を用いた
手技訓練手法に関する研究

YEM VIBOL

システム情報工学研究科
筑波大学

2015年 3月

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 本論文の目的	3
1.3 論文の構成	5
第2章 触力覚とその応用	6
2.1 緒言	6
2.2 触力覚の生理学および人の感覚	7
2.2.1 触覚に関する受容器の特性	7
2.2.2 力覚に関する受容器の特性	8
2.2.3 人の感覚特性	9
2.3 触力覚を用いた提示装置	10
2.3.1 直接駆動方式	12
2.3.2 外装型提示方式	13
2.3.3 本研究における提示方式	13
2.4 本章のまとめ	14
第3章 外装型触力覚提示装置	16
3.1 緒言	16
3.2 OCHD の設計指針	17
3.2.1 喉頭展開における重要な動作	17
3.2.2 提示部分の選択と提示方法	19
3.3 OCHD	20
3.3.1 機構	20
3.3.2 ベルト	22

3.3.3	エフェクタ	22
3.3.4	マニピュレータ	23
3.4	本章のまとめ	25
第4章	OCHD を利用した刺激閾の実験	26
4.1	実験の目的	26
4.2	関連研究との比較	27
4.3	実験方法	27
4.3.1	刺激閾測定のための単純上下法	27
4.3.2	実験デザイン	28
4.3.3	実験装置	28
4.3.4	被験者と手順	33
4.4	実験結果	34
4.4.1	刺激閾比較結果	34
4.4.2	アンケート結果	37
4.5	考察	38
4.6	本章のまとめ	39
第5章	OCHD を利用した学習効果の実験	41
5.1	実験の目的	41
5.2	関連研究	41
5.2.1	視覚による誘導手法	41
5.2.2	直接駆動による誘導手法	42
5.2.3	OCHD による誘導	45
5.3	実験方法	45
5.3.1	学習させる動作	45
5.3.2	評価のためのパラメータ	46
5.3.3	実験デザイン	49
5.3.4	実験装置	50
5.3.5	被験者と手順	56

5.4	実験結果	57
5.4.1	学習時に被験者が喉頭鏡に加えた力の大きさ F_{sub} の比較	57
5.4.2	学習時に喉頭鏡に加えた力の誤差 F_e の比較	58
5.4.3	学習時の喉頭鏡回転角度の誤差 θ_e	58
5.4.4	学習時の誤差 P_{EF} の比較	59
5.4.5	再現時の喉頭鏡に加えた力の誤差 F_e	60
5.4.6	再現時の喉頭鏡回転角度の誤差 θ_e	61
5.4.7	再現時の誤差 P_{EF} の比較	62
5.5	考察	63
5.5.1	学習時に被験者が喉頭鏡に加えた力の大きさ F_{sub}	63
5.5.2	学習時の誤差 F_e , θ_e と P_{EF}	64
5.5.3	再現時の誤差 F_e , θ_e と P_{EF}	64
5.6	本章のまとめ	65
第6章	考察と展望	66
6.1	刺激閾の低減と装置の安全性	67
6.2	能動的な学習による有効性	67
6.3	他分野への応用	67
6.4	本実験と実際の喉頭展開手技訓練の相違点	68
第7章	結論	69
7.1	まとめ	69
7.2	OCHD のウェアラブル化と将来の展望	70
	謝辞	72
	参考文献	74

目次

図 1-1	喉頭鏡	3
図 1-2	気管挿管のための喉頭展開	3
図 1-3	学習者の手に添える誘導手法	4
図 1-4	本研究で提案する手法のコンセプト	4
図 3-1	ポジション 1	18
図 3-2	ポジション 2	18
図 3-3	ポジション 3	18
図 3-4	ポジション 4	18
図 3-5	ポジション 5	19
図 3-6	喉頭鏡の誤った動作	19
図 3-7	手の甲に pitch 方向の回転を提示する際の皮膚せん断変形方向	20
図 3-8	内側（左）と外側（右）から見た OCHD の装着部	21
図 3-9	掌（左）と手の甲に見た OCHD の装着した様子	21
図 3-10	UCHD の全体図（左）と手に装着した様子（右）	22
図 3-11	UCHD の構成	23
図 3-12	6 自由度のマニピュレータ	24
図 3-13	6 自由度のマニピュレータ機構説明図	24
図 4-1	単純上限法（[Levitt 70] より修正の後転載）	28
図 4-2	喉頭鏡モデルのパイプの内部（左）と外部（右）	29
図 4-3	UCHD 条件（上）と直接駆動条件（下）の実験装置の概念図	30
図 4-4	UCHD 条件の実験装置（左）と実験の様子（右）	31
図 4-5	HMD に表示される情報	32

図 4-6	速度・加速度フィードフォワード付き PID 位置制御	33
図 4-7	Pitch 軸周りの正方向に関する刺激閾 (** : $p < .01$)	35
図 4-8	Pitch 軸周りの負方向に関する刺激閾 (** : $p < .01$)	36
図 5-1	マスタスレーブ方式による動作教示の概念図	44
図 5-2	登録・再生による動作教示の概念図	44
図 5-3	実験における喉頭鏡の座標系	46
図 5-4	F_{sub} を求めるための座標系	47
図 5-5	P_{EF} の計算式の説明図	49
図 5-6	視覚による誘導条件	51
図 5-7	視覚条件における画面表示	51
図 5-8	直接駆動条件 (上) と OCHD 条件 (下) の実験装置の概念図	54
図 5-9	直接駆動による誘導条件	55
図 5-10	OCHD 条件	55
図 5-11	再現様子と実験における座標系	56
図 5-12	学習時に被験者が喉頭鏡に加えた力の大きさ (F_{sub}) (** : $p < .01$)	57
図 5-13	学習時の喉頭鏡に加えた力の誤差 (F_e) (+ : $p < .1$; * : $p < .05$; ** : $p < .01$)	58
図 5-14	学習時の喉頭鏡回転角度の誤差 (θ_e) (** : $p < .01$)	59
図 5-15	学習時の誤差 P_{EF} (* : $p < .05$; ** : $p < .01$)	60
図 5-16	再現時の喉頭鏡に加えた力の誤差 (F_e) (+ : $p < .1$; ** : $p < .01$)	61
図 5-17	再現時の喉頭鏡回転角度の誤差 (θ_e) (+ : $p < .1$; * : $p < .05$)	62
図 5-18	再現時の誤差 P_{EF} (* : $p < .05$; ** : $p < .01$)	63
図 7-1	wOCHD (左), wOCHD を装着した様子 (右)	71
図 7-2	x , yaw, z , roll を提示するときのボールエフェクタの回転方向	71

目次

表 2-1	無毛部における機械受容器特性[大山 94][Dahiya 10][Jones 06]	7
表 2-2	有毛部における機械受容器特性[Gilman 02][Olausson 00][Grigg 96].....	8
表 2-3	提示装置の分類.....	11
表 4-1	刺激閾実験における被験者の意見.....	37
表 5-1	学習効果の比較に関する実験結果一覧.....	65

第1章

序論

1.1 本研究の背景

描画や書道のような手技訓練を支援するため、触力覚を用いた提示手法に関する研究が多数行われている[Teo 02][David 02][野嶋 02][嵯峨 05]。こうした研究では、学習者が把持している道具を直接アクチュエータで駆動することで、道具を介して学習者の掌に触力覚を提示し、動作を正しく誘導したり、動作の修正をしたりする方法が一般的である。しかし、喉頭展開などの医療行為（図 1-1, 1-2）や突き固めの鑄造作業など、学習者が道具を強く握らなければならない作業に対する手技訓練においては、道具を駆動するために高出力のアクチュエータが必要になってしまう。なぜならば、学習者が強い力で道具を握っている場合、道具を介した触力覚を感じにくくなるためである。この現象はウェーバーの法則によって説明できる。この法則によれば、人が知覚できる刺激量の変化は、もともと加わっている刺激量の大きさに比例する[Weber 78]。すなわち、弱い力で道具を握っている場合には、アクチュエータが小さな力を道具に伝えるだけで、人はその力を感じることができるが、強い力で道具を握っている場合、その力に比例した大きな力を伝えられなければ、人はその力を感じることができない。一般的にアクチュエータに大きな力を伝えるためには、使用するモータや装置自身を大型化しなければならず、製造コスト、設置スペース、安全性の面で現実的

ではない。

また、訓練における能動性に関する問題もある。一般的に、手技訓練では操作のための力や道具の位置と速度を理解する必要があるが、アクチュエータによって訓練装置自体が能動的に動くシステムでは、学習者は手をそえるだけの受動的な訓練となり、結果として道具を操作するために必要な力を正しく知ることができない[Xing 08]。学習者自身に能動的な学習をさせる訓練システムとして、嵯峨らは、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した。学習者が能動的に目標方向に道具を操作することによって、学習効果が高まることを示した[嵯峨 05]。しかしこの手法でも、強い力が必要となる作業に適用する場合、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。

これらの問題に対して本研究では、喉頭展開の手技訓練を具体例として、新しい訓練手法を提案する。

喉頭展開は、麻酔・集中医療・救急などの現場において、喉頭鏡（図 1-1）を用いて呼吸困難に陥った患者の口を開き、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 1-2）。気管挿管における喉頭展開では、強い力が必要となり（最大圧力の平均値が約 40 N、トルクの平均値が約 4 Nm）[Hastings 96][Hasemi 07]、喉頭鏡の操作が非常に難しい[Hagberg 07]。喉頭鏡の動かし方を誤ると、気道確保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[青山 04][Achim 07]。この為、気管挿管を行う術者は喉頭鏡の動かし方を正しく身につけなければならない。

気管挿管における喉頭展開の一般的な教育では、気道管理トレーナー（図 1-2）、truCorp 社の AirSim などのマネキン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。このため、医学部の学生が気管挿管に成功する割合は、初回の訓練で 14%、3 回の訓練後でも 33% 程度である[Ayoub 10]。また、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[Kopacz 96][Konrad 98][Wang 05][Wong 11]。しかし間違った操作は、患者の命が奪われてしまう可能性もある[Achim 07]ため、成功率が 90%になっても高いとはいえない。Noh ら[Noh 08]は、力センサを内蔵したマネキンシミュレータを開発し、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。計測の結果、初心者は口腔内に不適切な力を加えていることが多かった。Van ら[Van 07]は、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を開発した。しかし、Ayoub ら[Ayoub 10]によると、この場合であっても成功率は 48%と、ビデオなしの喉頭鏡より効果が良いものの、依然としてそれほど成功率は高くない。そこで本研究では、喉頭展開における喉頭鏡の動作の教示を具体例とする。

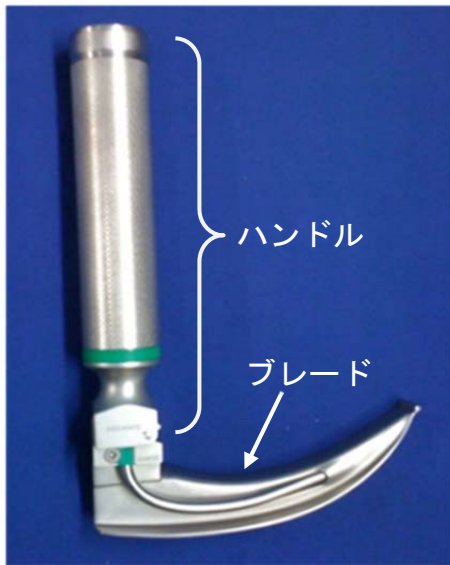


図 1-1 喉頭鏡

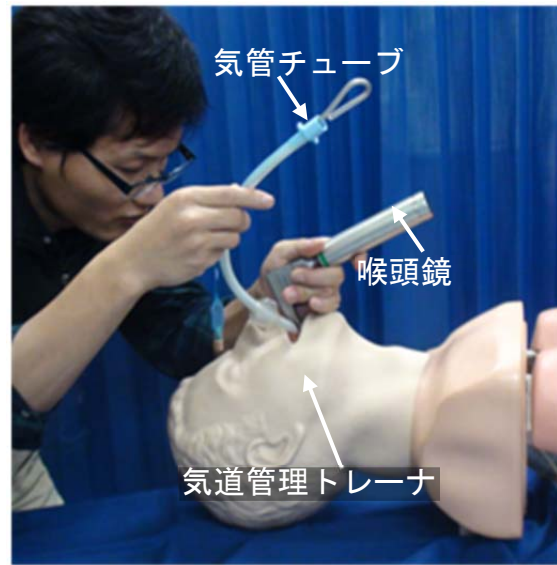


図 1-2 気管挿管のための喉頭展開

1.2 本論文の目的

前節に述べた通り，道具を直接駆動する方法では，道具を操作するための力の入れ方と動作を，道具を通じて学習者に提示するが，こうした方法にはウェーバーの法則に起因する問題と能動性に関する問題が存在する．そこで本研究では，喉頭展開の手技訓練を具体例として，新たな訓練手法を提案し，これらの問題を解決することを目的とする．

提案手法では，道具を直接駆動するのではなく，皮膚感覚提示による擬似力覚を利用する[Kuniyasu 11][昆陽 12]．具体的には，道具を把持している学習者の手に指導者が手を添えて正しい動作を誘導するかのよう（図 1-3），学習者の手の外側に触力覚を提示する．すなわち，図 1-4 に示すように，学習者の手の外側に触力覚を提示することで誘導力を知覚させ，その誘導力に従って道具を動作させる．手の外側には他の外力が加えられていないため，比較的小さな力で学習者が誘導力を知覚できると予想される．また，この手法では，学習者は自分の力で道具を能動的に動かさなければならないため，学習効果も高くなると期待される．



図 1-3 学習者の手に添える誘導手法



図 1-4 本研究で提案する手法のコンセプト

本研究では、強い力が必要となる手技訓練に対する提案手法の有効性を確認するために、以下の3項目を実施した。

- ① 手の外側に触力覚を与えることによって、学習者の手の動作を誘導可能な、外装型触力覚提示装置（OCHD: Outer-Covering Haptic Display）の開発

- ② OCHD による触力覚提示の有効性を確認するための、刺激閾実験の実施
- ③ OCHD の学習効果を確認する実験の実施

1.3 論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第 2 章では、触力覚と人の感覚特性について明らかにし、先行研究における触力覚の提示手法とその応用について紹介する。また、本研究で利用する触力覚特性について述べる。第 3 章では、第 2 章に紹介する触力覚の特性に基づいて、開発した外装型触力覚提示装置 (OCHD: Outer-Covering Haptic Display) の設計とその実装について述べる。

続く 3 つの章は、OCHD の有効性を示す実験、結果、そして考察である。まず第 4 章では、OCHD を利用した刺激閾の実験について述べ、OCHD は従来の直接駆動方式よりも小さな力でも学習者に誘導力を知覚させることができることを示す。第 5 章では、OCHD を利用した学習効果の実験について述べ、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確認する。第 6 章では、4 章、5 章の実験結果にもとづいて、提案手法の効果について考察する。

最後に第 7 章で本研究の結論を述べる。また、今後 OCHD の実用性を高める方法として、OCHD のウェアラブル化の構想について紹介する。

第2章

触力覚とその応用

2.1 緒言

触覚 (tactile sensation) とは、人が物体に触った際に感じる、滑らかさやざらざら感などの皮膚感覚（皮膚表面における感覚）を指す。これは、皮膚変形や振動のような機械的刺激を検知することで知覚される。これに対して、力覚 (force sensation) とは、人が何らかの物体に力を加えた際に感じる反力感覚を指す。例えば物体を掴んだ際に、手が物体表面から反力を受け、物体の硬さや重さを知覚し、指の関節角度から物体の形状を知ることができるのは、力覚によるものである。力覚は、深部感覚（身体内部の感覚）であり、筋、腱や関節の感覚をもとに、身体の運動や身体部位の位置についての情報が知覚される[岩村 01][下条 14].

人間は、外界からの刺激情報および体内で生じる刺激情報を受け入れる受容器を持ち、これによって環境の情報を受容することで、様々な感覚を知覚する。例えば、触った対象物のテクスチャや形状、反力などを知覚できるのは、指の皮膚や腱、間接にある受容器によるものである。人の受容器は人の中のセンサのようなものであると考えられ、反応特性は種類によって異なる。

皮膚や身体内に存在する受容器の種類とその特性についてはこれまでに広く研究さ

れている[Dahiya 10][Jones 06][Gilman 02]. これに対して、バーチャルリアリティ分野では、力覚の主体性や皮膚せん断変形のような、人の受容器特性を活用する触力覚提示手法が多数開発されている[嵯峨 05][Bark 08]. しかし、人には受容器特性の他、錯覚やウェーバーの法則(後述)のような一般感覚特性も存在する[岩村 01][Weber 78]. 本研究では、触力覚を用いた手技訓練において、人の受容器特性以外の感覚特性も考慮して、学習者が道具を強く握らなければならない作業に対する手技訓練に対して、より有効な提示手法を明らかにする.

本章では、先行研究において確認された触力覚に関する受容器特性および人の感覚特性を説明し、この特性に関する本研究の課題および解決手法について述べる. そして、スポーツや手技訓練などのための触覚や触力覚の提示に関する従来の研究を紹介し、提案する手法の新規性について述べる.

2.2 触力覚の生理学および人の感覚

2.2.1 触覚に関する受容器の特性

触覚は、皮膚内部に位置する機械受容器によって皮膚変形や振動などの物理刺激の情報を受容することにより知覚されていると考えられている. 指腹部など無毛部皮膚では、マイスナー小体 (Meissner corpuscle) ・パチニ小体 (Pacinian corpuscle) ・メルケル触盤 (Merkel disk) ・ルフィニ終末 (Ruffini ending) の4種類の特殊機構を持つ機械受容器が存在する[大山 94]. 手の甲のような有毛部皮膚にはマイスナー小体がないが、毛根部に神経繊維が巻き付いた毛包受容器 (hair follicle receptor) が存在し、この受容器は刺激の変化に敏感に反応する[下条 14][東山 00]. 本論文においては、無毛部の掌に動作を提示する道具の直接駆動方式と、有毛部の手の甲側に動作を提示する外装型方式を比較するため、無毛部および有毛部の触覚について説明する.

皮膚の変形刺激に対する応答と順応の様子から、機械受容器は速順応型 (Fast adapting, FA または Rapid adapting, RA) と遅順応型 (Slowly adapting, SA) に大別されている[大山 94][東山 00]. たとえば、しばらく腕の上に重りを置くと、FA ユニットでは神経が発火してもすぐに止まるが、SA ユニットでは発火が比較的長く継続する. 機械受容器は、受容野の大きさによって、受容野が小さいタイプ I と受容野が広いタイプ II に分けられている. この分類によって、機械受容器は FAI ・ FAII ・ SAI ・ SAII の4種類になる. 表 2-1 と 2-2 に各受容器の特性について示す.

表 2-1 無毛部における機械受容器特性[大山 94][Dahiya 10][Jones 06]

受容器	型	順応速度	感覚モダリティ
マイスナー小体	FAI	速	振動
パチニ小体	FAII	速	振動
メルケル触盤	SAI	遅	未知
ルフィニ終末	SAII	遅	圧

表 2-2 有毛部における機械受容器特性[Gilman 02][Olausson 00][Grigg 96]

受容器	型	順応速度	感覚モダリティ
毛包受容器	FAI	速	毛根, 毛の傾きの変化
パチニ小体	FAII	速	振動
メルケル触盤	SAI	遅	圧・テクスチャ
ルフィニ終末	SAII	遅	皮膚せん断変形とその方向

人は、受容器によって、振動刺激、皮膚せん断変形の変化方向、強さ、速度などの情報を得ることができる。この皮膚感覚を利用して、手の動作方向などを提示する装置が開発されている[Piateski 05][Bark 08][Kapur 10]。これらは、受容器特性を活用することで、手の動作方向を提示できると述べられている。

一方、皮膚せん断変形の反応特性に関する研究において、Biggs ら[Biggs 02]は、腕の有毛部皮膚では、皮膚と垂直方向の力よりも、接線方向に与えられた力（せん断力）の方が感じやすいと報告している。皮膚せん断変形の速度の検出については、低速変形には、SA ユニットが活動するが、変形速度が速くなるほど FA ユニットがより敏感に反応し、変形の情報を読み取ることができる[Edin 04]。有毛部皮膚にせん断力やせん断変形を与えると、FA と SA の双方のユニットが敏感に反応するため、触力覚フィードバックとして応用可能である[Edin 04][Olausson 00][Gilman 02]。また、指腹部や腕に皮膚変形感覚を与えることで、疑似力覚という錯覚（手を引っ張られる外力の感覚）やハンガー反射（手首に皮膚せん断変形をかけると手が動いてしまうという現象）が発生する[Kuniyasu 11][Nakamura 14]。

以上のような先行研究に基づき、本研究では、学習者に動作を伝達するために、手の有毛部への皮膚のせん断変形を利用する。

2.2.2 力覚に関する受容器の特性

力覚は、皮膚よりも深部にある筋・腱・関節に存在する受容器によって、対象物体からの反力や身体的位置・運動などの情報を受容して知覚されていると考えられている。この受容器には、筋紡錘（筋受容器）、ゴルジ腱器官（腱受容器）、関節受容器の3種類がある。それぞれの受容器の特徴は以下の通りである。

筋紡錘（筋受容器）

骨格筋には、通常の筋線維（錘内筋線維）に交じって錘内筋線維があり、その中に筋紡錘（muscle spindle）が存在する。筋紡錘は、筋肉の収縮状態を感受する器官である。筋紡錘は、筋肉の伸縮の長さや変化率の情報を受容し、深部感覚に寄与する[Mathews 88][Gandevia 92]。

筋肉の筋紡錘を支配する感覚線維には、group I と group II の2種類があり、前者は、

錘内筋線維に存在する核袋線維，核鎖線維の両方に（一次終末），後者は主として核鎖線維に終わっている（二次終末）．筋が伸長すると筋紡錘も引っ張られるため，一次，二次終末ともに興奮してインパルスを発する[大山 94]．

ゴルジ腱器官（腱受容器）

筋と骨に付着する腱の移動部に存在する感覚器である．ゴルジ腱器官は，外力や筋自体の収縮により，神経インパルスが発生し，筋収縮の強度をモニタしている．

関節受容器

関節を包む関節囊や関節の靭帯に存在する，関節の動きによって刺激される受容器である．遅順応型受容器のルフィニ終末とゴルジ終末，速順応型受容器のパチニ小体，自由神経終末の4つすべて総称して呼ばれる受容器である．

以上の筋，腱，関節各受容器により，触った物体の硬さのような反力を知覚することができる．また，これらの受容器は，自己受容器または固有受容器覚（proprioceptor）と定義され，身体の運動や位置についての情報を受容する[Sherrington 1906]．そして，起こる感覚は，自己受容感覚または固有受容感覚と呼ばれている[Ruch 60][McCloskey 78]．

固有受容感覚を活用する手技訓練には，学習者の手を直接動かして身体に運動感覚を与え，それによって学習させる「受動的」な学習と，学習者に何らかの手法によって指示を与え，道具を動かすようにさせる「能動的」な学習がある[Beets 12]．描画や書道訓練のため，Teoら[Teo 02]やPortilloら[Portillo 05]は，アクチュエータで道具を駆動して学習者の手の動作を修正できるような，受動的な学習を活用し，学習者に学習させることを明らかにした．しかし，Xingら[Xing 08]よれば，このような受動的な学習では，学習の効果が高くなかなかため，より効果的な学習方法を研究することが必要であると述べている．これに対して，嵯峨ら[嵯峨 05]やBeetsら[Beets 12]は，力覚の主体性を活用して学習者に能動的に道具を操作させることによって，学習効果を向上させられる可能性があると報告した．そこで本研究では，能動的な学習にも注目し，学習者に2.2.1に述べた皮膚せん断変形を知覚させ，正しい方向に道具を動かすように誘導する．

2.2.3 人の感覚特性

ここまでは，人の受容器の特性について述べたが，ヒトには，受容器特性の他，疲労感や空腹感などの一般感覚特性も存在する[岩村 01]．一般感覚特性の検討において，ウェーバーは，皮膚に加えられた重さの識別の測定を行い，「識別できる最少の重さの

追加あるいは減少 (ΔI) は、もとの重さ (I) に比例する (式 2-1)」というウェーバーの法則を見出した[岩村 01][Weber 78].

$$\frac{\Delta I}{I} = k \quad (2-1)$$

ここで、

ΔI : 弁別閾 (検知できる最小の刺激量の差)
 I : 刺激量
 k : 定数 (ウェーバー比)

ウェーバー比は、個人差により異なるが、例えば、 $k=0.1$ とすれば、手の上に 2 Kg の重さかけた場合、その人が重さの変化を感じるには、少なくとも 0.2 Kg の重さを加えなければならない。また、5 Kg の重さの場合では、その 5 倍の 0.5 Kg 以上加える必要がある。

本研究では、受容器特性を参考にしながら、人の感覚特性の 1 つであるウェーバーの法則に基づいて、強い力が必要となる手技訓練のためのより有効的な動作指示の提示手法を明らかにすることを研究課題とした。

2.3 触力覚を用いた提示装置

触力覚提示装置は様々な種類があるが、本論文では、提示方式と装置設置方法によって分類する (表 2-3)。ここで、提示方式は直接駆動方式と外装型方式、装置設置方法は接地型と非接地型・ウェアラブル型に分類する。直接駆動方式は、アクチュエータが道具を直接駆動し、学習者はこの道具から触力覚を知覚する方式である。外装型方式は、道具と独立したエフェクタ (手と接触して触力覚を与える器具) によって学習者の手の外側から誘導する方式である。接地型は装置を机上や作業台上に設置する方法で、非接地型・ウェアラブル型はポータブルな装置や学習者に装着する方法である。

表 2-3 提示装置の分類

装置設置方法 提示方式	接地型 (机などの上に設置)	非接地型・ ウェアラブル型
<p>直接駆動方式 (道具をエフェクタとして提示する方式. 2.3.1 項にて詳細を述べる)</p>	<p>- 3DSystmes 社の PHANToM - ForceDimension 社の Omega Feedback Device - SmartTool [Nojima 02] - Haption 社の Virtuose 6D35-45</p>	<p>・非接地型： -慣性力・ジャイロ効果を用いた提示装置[Tanaka 01] [吉江 02] -人間の感覚特性や非線形性を活用して方向の提示「ぶるナビ」 [Amemiya 08]</p> <p>・ウェアラブル型： - SAM Exoskeleton[Letier 08] - Body- mounted astronaut joystick</p>
<p>外装型方式 (道具と独立したエフェクタによって手の皮膚や関節に提示する方式. 2.3.2 項にて詳細を述べる)</p>	<p>提示装置と，提示装置を駆動する接地型アクチュエータを組み合わせる装置</p> <p>・関節にトルク提示 - EMAS II [Hasegawa 11]</p> <p>・皮膚変形の提示 - <u>提案装置 (OCHD)</u></p>	<p>・関節にトルク提示 - クボタ社の Assist suit ARM-1 - Wearable orthosis for tremor assessment and suppression [Rocon 07]</p> <p>・振動刺激の提示 - Vibrotactile feedback system (TactaArmBand) [Lindeman 04] - 振動モータを用いた方向情報の提示[Piateski 05]</p> <p>・皮膚変形の提示 - Rotational skin stretch device [Bark 09] - Forearm skin deformation device [Kuniyasu 12]</p>

2.3.1 直接駆動方式

接地型の提示装置

表 2-3 に示すように、接地型触力覚提示装置である 3DSystmes 社の PHANToM、野島らの SmartTool [Nojima 02]や ForceDimension 社の Omega Feedback Device などが開発されている。これらは、手技訓練を対象とし、アクチュエータで道具を直接駆動して力覚を提示する装置である[鈴木 05][Bluteau 08][Palluel-Germain 07]。鈴木ら[鈴木 05]や Bluteau ら[Bluteau 08]は、PHANToM を用いて描画や書道のような手技訓練のための力フィードバックを提示する方法を提案している。また、野嶋ら[野嶋 02]は、SmartTool を用い、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、実際の作業時に力覚の変化に応じてその情報を提示することによって作業支援を行うシステムを開発している。一方、Teo らは、書道システムを開発し、指導者の道具の位置や道具にかかる力を再現することで、学習者に学習させることが可能だと報告している [Teo 02]。

いずれも小さな力で道具を把持しながら行われる動作の支援を目的としているため、道具を直接駆動する際には、比較的小さな力でも学習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のような訓練においては、ウェーバーの法則に従って、高出力の装置を必要とするため、システムが大型化したり、安全面に問題が生じる可能性がある。

非接地型・ウェアラブル型の提示装置

一方、非接地型触力覚提示装置に関する研究において、吉江ら[吉江 02]や Sakai [Sakai 03]らはジャイロモーメント方式を用い、平面上の 2 自由度方向の力覚を提示できる GyroDisplay と GyroCube を開発している。ジャイロモーメントを利用することで外力が発生するが、そのための回転円盤が必要となっている。これに対して、European Space Agency (ESA)は、外力が発生しないウェアラブル提示装置の Body-mounted astronaut joystick を開発している。この方式では、掌に力覚を与えることができるが、提示できる力が比較的弱く、強い力が必要となる作業訓練に応用する場合は学習者が道具を強く握ることになるため、これもウェーバーの法則に基づき知覚しにくくなる恐れがある。

Amemiya ら[Amemiya 08]は、クランクスライダ機構によって、往復で絶対値の異なる加速度を提示できる「ぶるナビ」を開発し、人間の感覚特性や非線形性を利用して、擬似的に牽引力を知覚させることができると報告している。しかし、彼らの研究では、本研究で対象とするような、道具を強く把持する場合の知覚や、受動的訓練に関しては検討していない。

接地型、非接地型を問わず、直接駆動方式には、ウェーバーの法則に起因した問題だけでなく、第 1 章に述べた訓練が受動的になるという問題もある。嗟峨らは PHANToM を用いて道具を動かし、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道具を動かせるようにした[嵯峨 05]. このような方式で、学習者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. しかし、このような方式では、強い力が必要となる作業の場合、ウェーバーの法則に従って学習者に強い反力を提示する必要がある、装置が大型化し危険性が高くなる.

2.3.2 外装型提示方式

接地型の提示装置

道具ではなく手の外側に触力覚を提示する装置と、その装置を駆動する接地型アクチュエータを組み合わせた触力覚提示装置として、Hasegawa ら[Hasegawa 11]は、筋疾患のための食事支援システム (Exoskeletal Meal Assistance System, EMAS II) を開発している. この装置では、アクチュエータによって患者の手の関節にトルクを提示することができる. しかし、このような方式では、アクチュエータで手を強制的に動作させるため、訓練が受動的になってしまう.

非接地型・ウェアラブル型提示装置

手の動きを支援するため、クボタ社は Assist suit ARM-1, Rocon ら[Rocon 07]は WOTAS (Wearable orthosis for tremor assessment and suppression) を開発している. これらの装置は、身体に装着するウェアラブルな装置であるが、前述の EMAS II 同様、手の関節にトルクを提示しアクチュエータで手を強制的に動作させるため、受動的訓練に関する問題が発生する.

これに対して、皮膚に振動刺激を提示する方法で方向を誘導する研究がある. Lindeman ら[Lindeman 04]や Piatetski ら[Piatetski 05]は、振動刺激を利用することで、動作フィードバックや方向を提示することが可能であると報告している. しかし、Bark らの実験によれば、皮膚変形刺激と比較して、提示分解能が低いという問題が指摘されている[Bark 08].

一方、皮膚へのせん断変形を用いて、運動方向を誘導する関連研究として、Bark ら[Bark 09]は、固定軸の周りに回転する 2 つのエフェクタを利用し、それらのエフェクタによって皮膚のねじれる感覚を与え腕の回転を誘導するウェアラブル装置を開発している. また、Kuniyasu ら[Kuniyasu 12]は、腕に接着するエフェクタにより皮膚を変形させ、前後左右方向に腕を誘導する方法を提案している. 彼らの研究では、皮膚せん断変形を利用することにより、提示方向の知覚、および腕の動作の伝達を実現した.

2.3.3 本研究における提示方式

本研究では、強い力が必要となる作業として、喉頭展開という手技を事例とし、直接駆動方式を用いてこの手技を訓練させることができるかどうかについて検討した.

ウェーバーの法則（Weber's law）によれば、道具を通じた誘導力を学習者に知覚させるためには、アクチュエータが道具に加える力を、把持力に比例して大きくしなければならない。すなわち喉頭展開のように、学習者が道具を強く把持しなければならない場合には、その把持力に比例して大きな力を道具に与えなければならず、机上に設置できるような、実用的な大きさのアクチュエータで十分なトルクを発生させることが難しくなることが予想される。仮にサイズの問題が解決できたとしても、高出力のアクチュエ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。

この問題を解決するため、本研究では、高出力のアクチュエータによって喉頭鏡を直接駆動するのではなく、より小さい力で動作を伝達する手法を採用する。具体的には、喉頭鏡を持つ学習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（図 1-3）ときのように、手の外側に誘導力を提示することによって動作を伝える手法を提案する。

上に述べたように、有毛部皮膚には、皮膚に垂直な方向の力よりもせん断変形の方が提示力を感じやすく、動作フィードバックや方向の誘導に有効であるため[Biggs 02][Edin 04][Olausson 00][Gilman 02]、本装置でも手の外側に皮膚せん断変形を与えるような機構とする。このように、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、道具を強く握っている場合でも小さい力で学習者に教示方向を知覚させる効果が期待できる。

これらを実現するために、本研究では、手の外側に触力覚を提示して誘導できる外装型力覚提示装置（Outer-Covering Haptic Display, OCHD）を開発する。皮膚のせん断変形や錯覚を利用することで、提示装置を小型化してウェアラブル化することも可能であるが、Kuniyasu や Amemiya の実験においては、そのようなウェアラブルな装置の正答率は 100%ではなかった[Kuniyasu 12][Amemiya 08]。これは、装置本体を手の上に固定したことで、本体の固定部に動作提示方向とは逆方向の反力が発生し、装置の提示能力が低下したためであると考えられる。よって、本研究ではそのような問題点を考慮し、装置のウェアラブル化は行わず、本装置では接地型のアクチュエータを利用することとした。

本手法は、比較的小さな力でも動作を提示できるだけでなく、受動的訓練に関する問題も解決できる可能性がある。提示措置は道具と独立しており、道具を直接駆動させるものではない。そのため、学習者は能動的に道具を動かすこととなり、学習効果が向上すると期待される。

2.4 本章のまとめ

手技訓練やスポーツ練習のための、振動刺激や皮膚のせん断変形を用いた触力覚提示装置が広く開発されている。有毛部皮膚において、皮膚せん断変形は、皮膚と垂直方向への提示力や振動刺激よりも高い提示能力を持っていることが報告されている[Biggs 02][Bark 08]。また、皮膚せん断変形により、疑似力覚という錯覚やハンガー反

射が発生することが報告されている[Kuniyasu 11][Nakamura 14]. これらのことから、本研究では、学習者に動作を伝達するために、手の有毛部への皮膚のせん断変形を利用することとした。

また、人には、筋受容器、腱受容器および関節受容器が存在し、これらにより身体的位置や速度などの情報を受容することができる。これらの受容器は、固有受容器と定義され、受動的な学習と能動的な学習のために活用されている。また、学習者に主体的に道具を操作させる能動的な学習は、学習者の手を動かして身体の運動感覚を与える受動的な学習よりも有効であることが報告されている[嵯峨 05][Beets 12]. これに基づき、本研究では、学習の能動性に関する問題を解決するため、道具を直接駆動するのではなく、学習者が能動的に道具を動かせる方法を取ることにした。

続いて、既存の触力覚提示装置を、提示方式（直接駆動方式と外装型方式）および装置の設置方法（接地型と非接地型・ウェアラブル型）によって分類した。先述の通り、直接駆動方式では、気管挿管のための喉頭展開のような強い力で道具を把持する作業の訓練の場合、問題が生じるため、本研究では外装型方式を利用することとした。

以上のように、本研究では、道具を把持する学習者の手の外側を覆う装置によって、あたかも教示者が手を添えるかのように動作を伝える方法を提案し、これを実現する外装型力覚提示装置（OCHD）を開発する。

第3章

外装型触力覚提示装置

3.1 緒言

喉頭展開のような強い力が必要となる作業の場合、道具を直接駆動して学習者の手を誘導する手法には、ウェーバーの法則に起因した問題と、訓練における能動性に関する問題が生じる。そこで本研究では、道具を直接駆動するのではなく、道具を把持している学習者の手の外側に触力覚を提示することによって誘導することと、その触力覚は皮膚せん断変形によって提示することを提案する。本研究ではこのように学習者の手の外側に誘導力を与えて道具の操作方向を提示する装置を開発し、これを外装型触力覚提示装置（OCHD: Outer-Covering Haptic Display）と呼ぶこととする。

本研究で提案する OCHD の設計指針は以下の通りである。

- ① 本研究で事例とした気管挿管のための喉頭展開において、最も重要だと考えられる pitch 方向の力覚提示に着目する。
- ② 手先から手首までの動作を訓練するため、腕ではなく、手の部分に触力覚を与えるようにする。
- ③ 手の甲側に触力覚を与え、皮膚せん断変形を用いて、誘導方向を提示する。

本章では、OCHD の開発における関連研究を紹介し、以上の設計指針に基づいた OCHD の機構について説明する。

3.2 OCHD の設計指針

3.2.1 喉頭展開における重要な動作

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。これは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に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。

喉頭展開の手順は以下の通りである[青山 04].

- ポジション 1：喉頭鏡のブレードの先端は真下に向け、ハンドル上部も下向きになり床面を指す（図 3-1）。
- ポジション 2：ポジション 1 の状態のまま、舌体部の最も盛り上がった部分まで（深さ約 5~6cm まで）舌体部を少し前へ（患者の尾側へ）押さえながら、口腔内に侵入する（図 3-2）。
- ポジション 3：ブレードで舌の表面を圧迫しつつ、少しずつ口腔・咽喉内を奥へと前進していく。喉頭鏡はハンドルとブレードの内側、舌部分を中心に、舌の表面を回転しながら進む（図 3-3）。ハンドルは床面とほぼ並行、ブレード先端は口腔・咽喉の奥の舌根部近くにある。
- ポジション 4：喉頭鏡は回転しながら進めていき、喉頭鏡のブレード先端は喉頭蓋と舌根部の間まで進んで到達する（図 3-4）。このポジションでは喉頭鏡の姿勢と喉頭蓋を確認することがとても重要である。喉頭鏡は必要とする回転量以上回転すると、歯の損傷につながる。この回転方向は、本研究では pitch 軸の周りの回転方向とする。
- ポジション 5：ブレード先端は喉頭蓋谷へ進められ、ハンドルは床面とおおよそ 30~40 度の角度で、前上方へ持ち上がる。ブレードが舌根部を持ち上がるのと喉頭蓋も間接的に持ち上げられ、喉頭全体を観察できる（図 3-5）。

以上の喉頭展開の手順は喉頭候の基本的な動かし方である。しかし、現実の患者の状況は様々であり、それに応じ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[青山 04].

喉頭鏡の誤った動作により、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[Lockhart 86][Givol 04]. たとえば喉頭展開においては、図 3-5 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。しかし学習者にとっては、ポジション

4でどこまで喉頭鏡を回転 (pitch 方向の回転) すべきか分からずに, 図 3-6 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[青山 04].

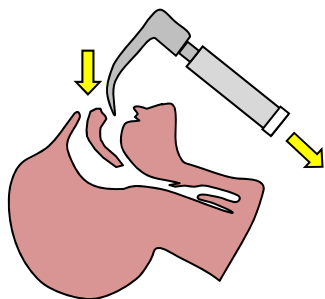


図 3-1 ポジション 1

([青山 04]より修正の後転載)

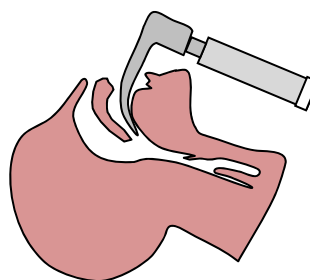


図 3-2 ポジション 2

([青山 04]より修正の後転載)

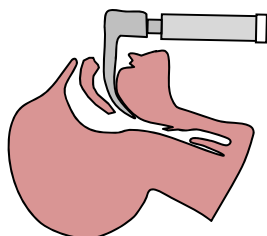


図 3-3 ポジション 3

([青山 04]より修正の後転載)

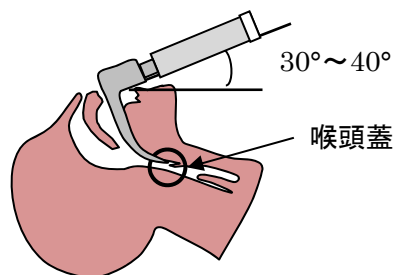


図 3-4 ポジション 4

([青山 04]より修正の後転載)

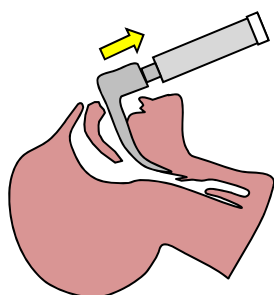


図 3-5 ポジション 5

([青山 04]より修正の後転載)

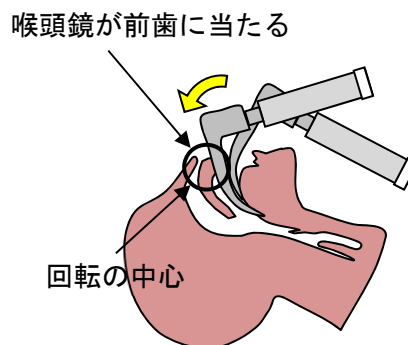


図 3-6 喉頭鏡の誤った動作

([青山 04]より修正の後転載)

このように、患者の上顎の前歯を折らないために、pitch 方向の回転を正しく行なわなければならない。そこで本研究では、まず pitch 方向の回転に対する動作の誘導に着目する（設計指針①）。

3.2.2 提示部分の選択と提示方法

3.2.1 に示したような喉頭鏡の操作を行うためには、喉頭鏡のハンドル部分を中心とした回転操作が必要であり、従って手首の動作が重要である。このため、手首の動きを誘導可能な触力覚の提示場所として、図 3-7 に示すように手の甲の手首に近い位置と指の付け根を選択した（設計指針②）。これらの部分であれば、道具を強く握った状態でも小さな力で皮膚を変形させやすいと考えられる。また、手の甲の SAI の受容野が他の受容器よりも広いため、皮膚せん断変形の方を知覚させやすいと期待できる [Edin 04]。さらに、pitch 方向の回転に対して、図 3-7 に示すような皮膚せん断変形が発生することが予想できるため、ハンドル上のある位置を中心とした回転を示す触力覚を十分に知覚させられることが期待できる。

第 2 章に述べた通り、人の有毛皮膚部に与えられる接線方向の力は法線方向の力より知覚しやすい [Biggs 02]。また、皮膚せん断変形は、振動子の提示より分解能が高く、速度も伝えることができ [Bark 08]、疑似力覚を感じさせることが可能である [Kuniyasu 11][昆陽 12]。このため、提案する OCHD は学習者の手の外側に装着し、提示部分に接線力を与えて皮膚を変形することで動作方向を知覚させる構造とした（設計指針③）。

一方、皮膚へのせん断変形感覚を用いて、運動方向を誘導する関連研究において、Bark らは、固定軸の周りに回転する 2 つのエフェクタを利用し、それらのエフェクタによって皮膚のねじれる感覚を与え腕の曲がる角度を誘導するウェアラブル装置を開発している [Bark 09]。また Kuniyasu らは、前後と左右方向の腕の運動を伝達するため、

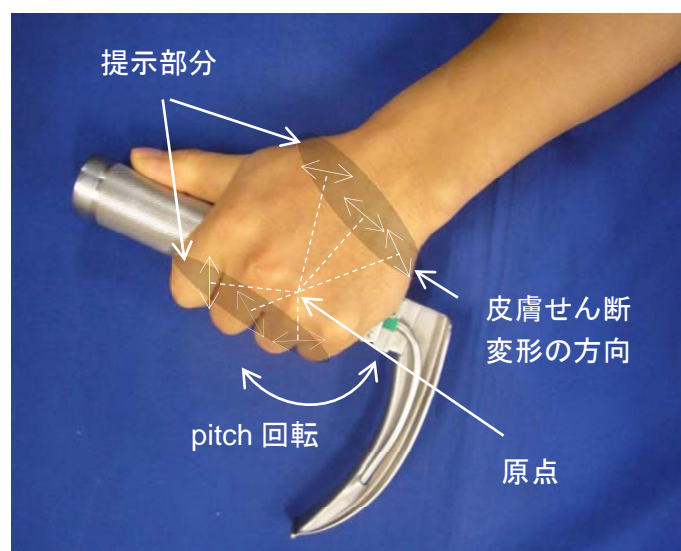


図 3-7 手の甲に pitch 方向の回転を提示する際の皮膚せん断変形の方法

腕に接着するエフェクタにより皮膚を変形させる方法を提案している[Kuniyasu 12]. これらの研究では、皮膚せん断変形を利用することにより、提示方向を知覚させることができ、皮膚せん断変形を利用することで、腕の動作を伝達することができることを明らかにした. これに対し本研究では、腕ではなく、手の部分に皮膚変形の手触を与えて誘導することで、ウェーバーの法則に起因した課題と受動的の学習に関する問題を解決する.

3.3 OCHD

3.3.1 機構

3.2.2 のことから、提案する装置、OCHD は学習者の手の外側に装着し、手の甲に接線力を与えて皮膚を変形することで動作方向を知覚させる構造とした (図 3-8). 本装置を手に装着した様子を図 3-9、装置の全体図を図 3-10 にそれぞれ示す. これらの図からわかるように、エンドエフェクタが手首に近い位置と指の付け根の皮膚をせん断変形させられるため、ハンドルを中心とした回転を示す触力覚が提示できると期待した. このフレームは厚さ 1 mm のアルミ板で制作し、フレームの縁に曲げ加工を行い、十分な強度を確保した. OCHD 装着部の重さは約 80g で、ステンレス製の喉頭鏡 (約 500g) よりも軽量である.

図 3-10 に示すように、本装置のアクチュエータとして、モータで駆動する接地型マニピュレータを開発した. このマニピュレータは、6 自由度であり、出力が強く広い空間の作業でも利用できるようにしたため、図 3-10 に示すように大型になった. 一方、第 4 章に説明する刺激閾では、pitch 回転方向の 1 自由度について評価し、広い作業空間が不要のため、このマニ

ピュレータを使わず, 新たな 1 自由度のアクチュエータを利用する. しかし, 第 5 章で行った確認の実験では, このマニピュレータを利用することとした.

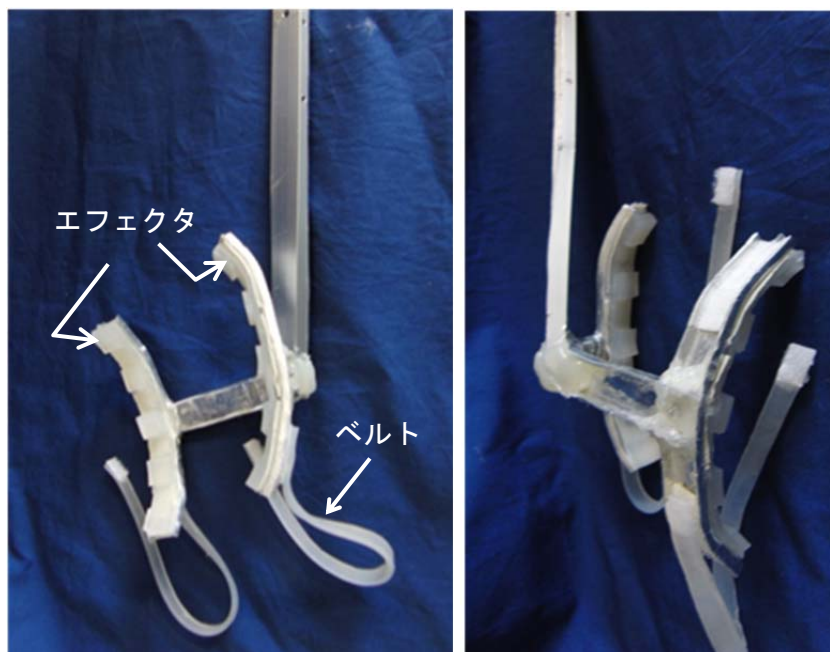


図 3-8 内側 (左) と外側 (右) から見た OCHD の装着部

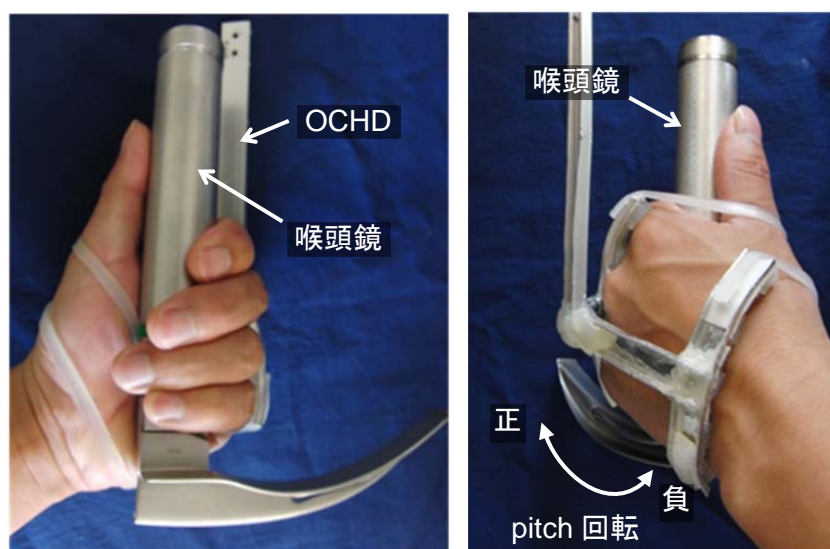


図 3-9 掌 (左) と手の甲に見た OCHD の装着した様子

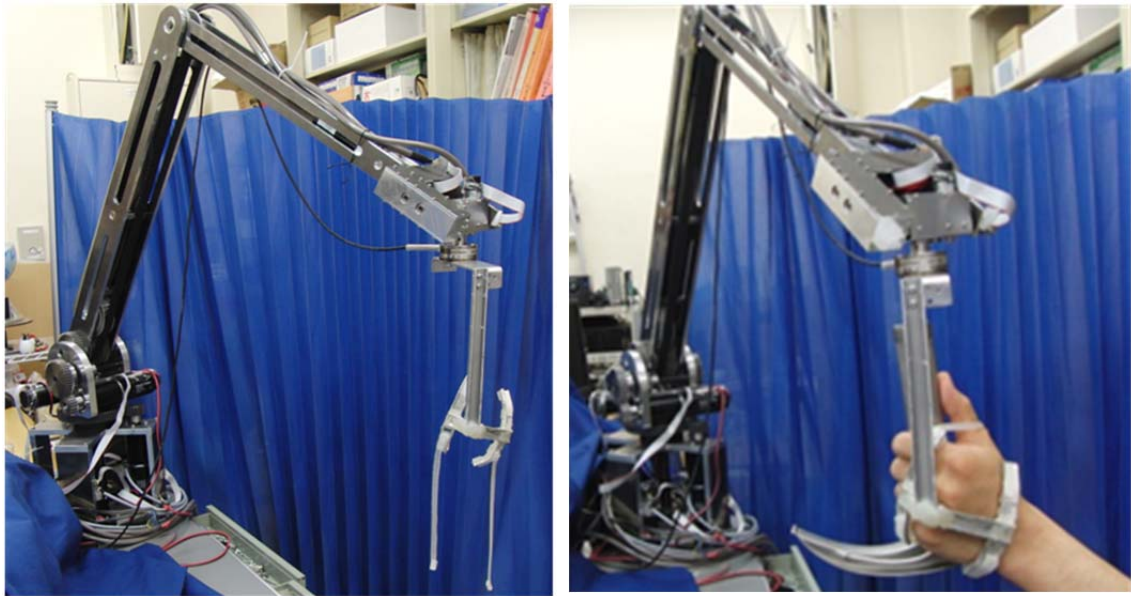


図 3-10 OCHD の全体図 (左) と手に装着した様子 (右)

3.3.2 ベルト

OCHD を装着する際は、シリコンシート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 (図 3-8)。このような機構を採用することによって、学習者の手の大きさの違いに対応し、一人でも簡単に装着できるようにした。

3.3.3 エフェクタ

触力覚を提示する器具は、皮膚と接触する面の形状により、刺激の感覚が変わる[坂口 08][Partap 98][佐藤 08]。佐藤ら[佐藤 08]の研究によれば、触覚提示装置の皮膚接触面に凹凸をつけ、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。本論文では、OCHD の皮膚と接触する器具をエフェクタと呼ぶこととする。

本装置のエフェクタは、シリコン製の小さな正方形 (一辺 10mm、厚み 2mm) である。手の甲にかぶせるアルミフレームの内側にこのエフェクタを一定間隔 (10mm) で取り付けることで皮膚との接触面に凹凸をつけた (図 3-11)。

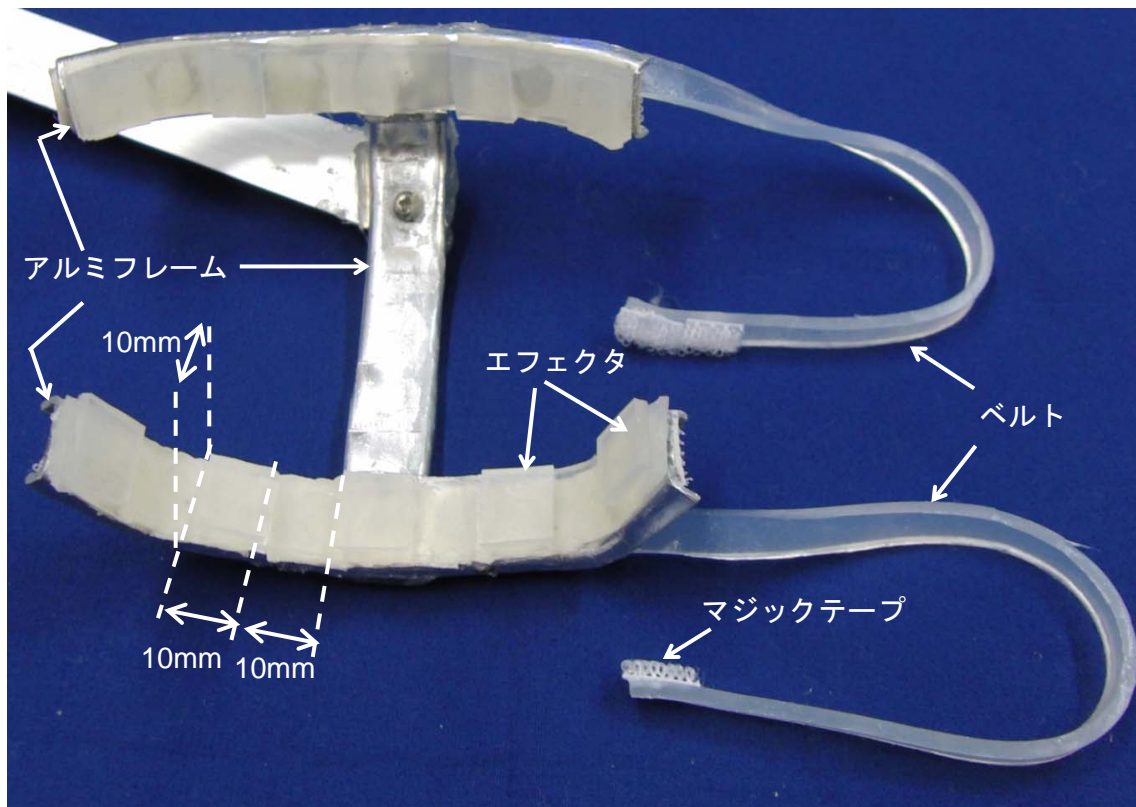


図 3-11 OCHD の構成

3.3.4 マニピュレータ

本研究で開発した接地型 6 自由度のマニピュレータの機構を，図 3-12 と 3-13 に示す．マニピュレータの可動範囲は，設置部を除く直径 2 m の半球内であるため，喉頭展開のために十分な作業空間である．また，各ジョイントにはロータリエンコーダを取り付けた Maxon 社の DC モーターが配してある．モータードライバは Maxon 社の EPOS であり，これによってモーターのトルク，速度または角度を制御することができる．また，マニピュレータの先端に，6 軸力覚センサを取り付，マニピュレータの出力を測定できるようにした．

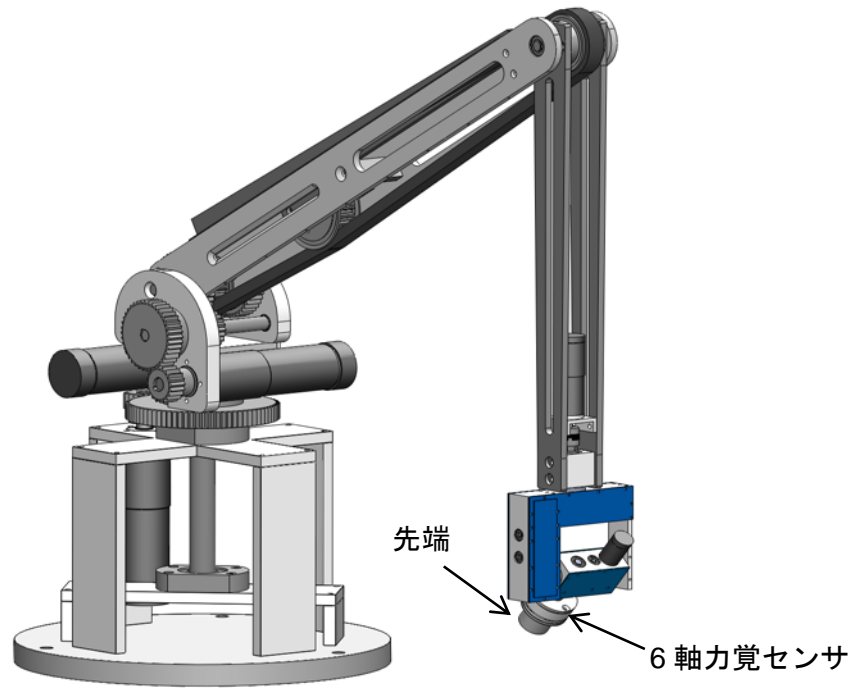


図 3-12 6自由度のマニピュレータ

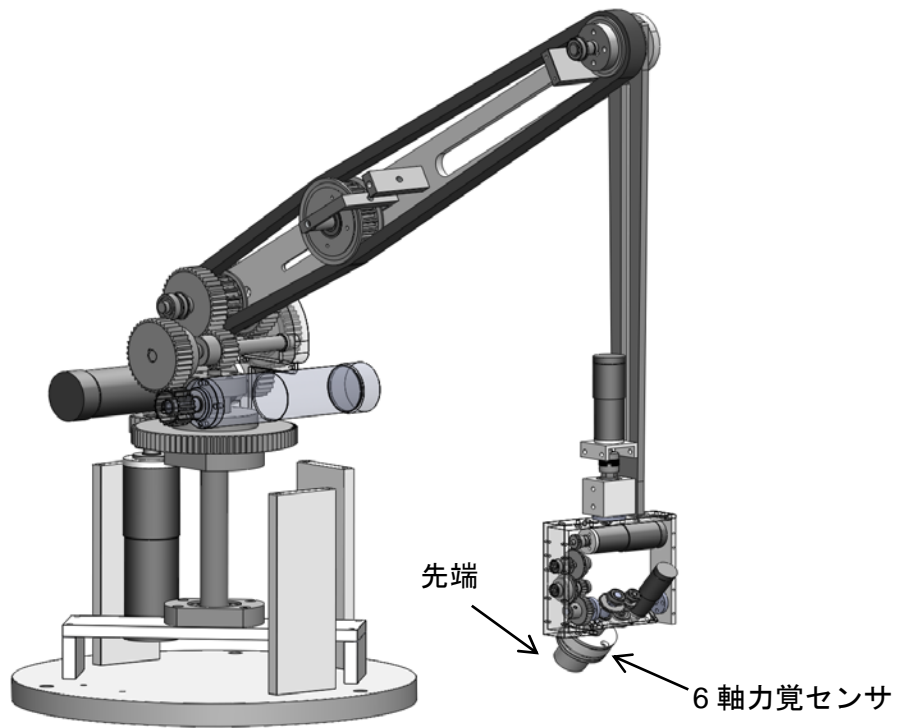


図 3-13 6自由度のマニピュレータ機構説明図

3.4 本章のまとめ

本研究で提案する外装型触力覚提示装置（OCHD）は学習者が把持する道具と独立し、学習者の手の外側に誘導力を与えて道具の操作方向を提示する装置である。本装置の設計では、喉頭展開における pitch 方向の動作、学習者の手首までの動作を誘導、そして皮膚せん断変形の3つ項目に注目した。

この設計指針より、OCHD 装着部の開発では、気管挿管において重要だと考えられる pitch 回転に対する提示効果の機構から着手し、手の甲側にかぶせて皮膚変形をできるようにした。2枚のベルトを使って手に巻き付けるようにしたため、簡単に装着できるようにした。皮膚と接触する部分に、凹凸を付けたエフェクタを利用することで、知覚を向上させるようにした。

OCHD のアクチュエータとして利用するため、本研究では、接地型の6自由度のマニピュレータを開発した。このマニピュレータの可動範囲は、設置部から直径2mの半球内である。

第4章

OCHD を利用した刺激閾の実験

4.1 実験の目的

本章では「OCHD を利用することで，比較的小さな力でも学習者に誘導方向を知覚させることが可能となる」という仮説を確認するための実験について述べる。

実験では，喉頭鏡を直接駆動する教示条件（以下，直接駆動条件と略す）と，OCHD を用いて教示する条件（以下，OCHD 条件と略す）における，学習者の刺激閾を比較する。刺激閾（Stimulus threshold）は，絶対閾（Absolute threshold）とも呼ばれ，刺激の存在が感覚や知覚として検知できるか否かの限界の刺激強度のことである。例えば，ラジオボリュームを徐々に増やすとある値から音が聞こえるようになる。また，ボリュームを徐々に下げると音が聞こえなくなる。聞こえるようになる値と聞こえなくなる値の平均値を，刺激閾とする。刺激閾を測定するために単純上下法を用い，その方法について 4.3.1 節に説明する。

本実験で扱う刺激閾は，提示方向を知覚できる最少のモータトルクである。すなわち本実験では，OCHD が直接アクチュエータで駆動された喉頭鏡（直接駆動条件）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。また，本装置で提示される感覚についてアンケートを行い，これらの結果より本装置の有効性について論じ

る.

第1章で述べたように、本章では、気管挿管のための喉頭展開において最も重要な動作である pitch 回転の方向に関する刺激閾のみを評価する.

4.2 関連研究との比較

第2章で紹介したように、直接駆動方式を用いた触力覚提示装置の多くのは、接地型である[Nojima 02][Bluteau 08][Teo 02]. これらの装置は、描画や書道のような小さな力が必要となる作業訓練のため、開発されている. しかし、喉頭展開のような強い力が必要となる作業の場合、学習者が道具を強く把持しなければならないため、ウェーバーの法則に起因した問題が生じる.

外装型方式を用いた触力覚提示装置において、Kuniyasu ら[Kuniyasu 12]や Bark ら[Bark 09]は、皮膚変形による触覚提示が可能なウェアラブル型に装置を開発している. ウェアラブルにすることで、設置問題や作業スペース問題を解決することができると考えられる. しかし、これらの研究では、ウェーバーの法則に基づいて、直接駆動方式と外装型方式の提示能力を比較していない.

本章では、道具を握る力（握力）を変化させ、OCHD 条件とアクチュエータによる直接駆動条件の提示能力を比較するため、各条件における刺激域を測定した.

4.3 実験方法

4.3.1 刺激閾測定のための単純上下法

単純上下法 (simple up-and-down method) は、段階法 (staircase method) とも呼ばれ、刺激閾のような閾や等価刺激の測定に利用できる[Cornsweet 62][Guilford 54]. 単純上下法の手順については、音の刺激閾を測定する例を挙げて以下に説明する.

図 4-1 に示すように、音が聞こえる初期刺激値 (initial value) から一定の値 (ステップの幅) で音圧を徐々に下げ、聞こえなくなったら 同じステップ幅で音圧を上げる. また、音が聞こえるようになったら、同様にして音圧を徐々に下げる. 上り下りを複数回繰り返して行くと、以下のグラフのような山と谷が出る. これらを反応の変換点 (reversal) と呼ぶ. 上下の変換点の平均値を刺激閾の測定値と見なす.

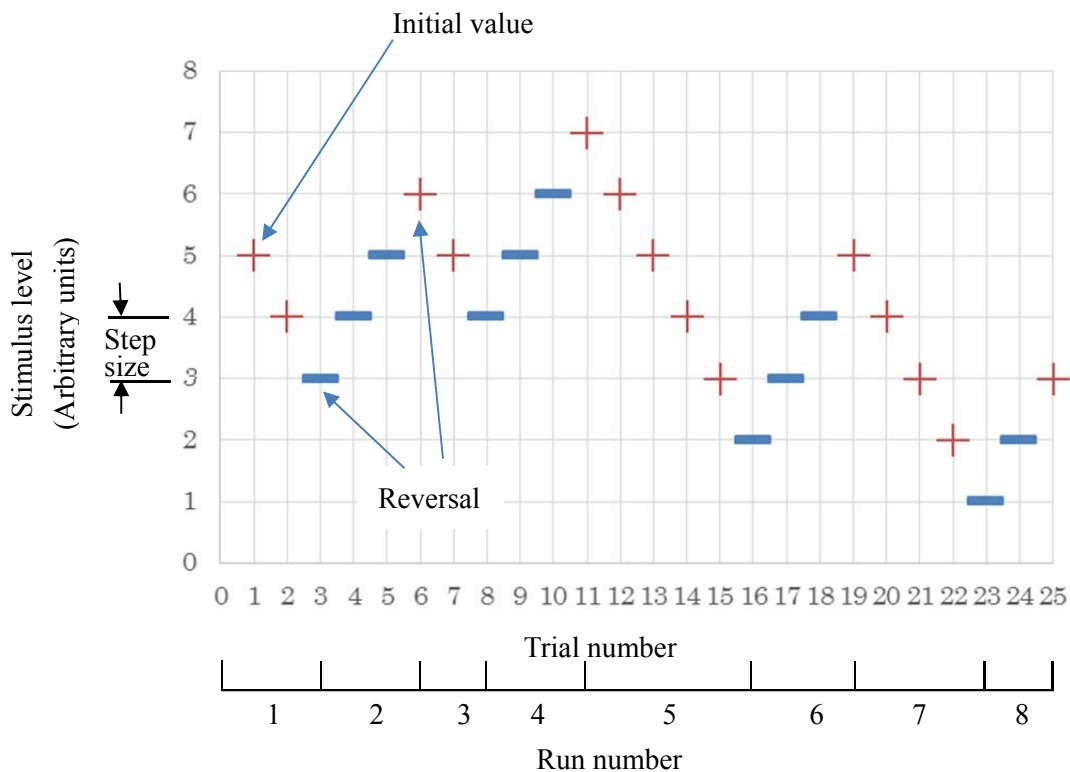


図 4-1 単純上限法 ([Levitt 70] より修正の後転載)

4.3.2 実験デザイン

実験は、繰り返しありの 2 要因（握力要因（0 kgf, 1 kgf, 2 kgf）の 3 条件，および提示装置要因（OCHD 条件，直接駆動条件）の 2 条件）について，計 6 条件で実施した．握力要因における 0 kgf の握力では，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指示をした．また，学習効果を回避するために，半分の被験者には徐々に握力が増加する順番で計測をし，もう半分に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，カウンタバランスを取った．

4.3.3 実験装置

道具を握っている握力を測定するために，図 4-2 に示すように，アルミパイプを用いて喉頭鏡の把持部（喉頭鏡のハンドル（図 1-1））を作製した．このアルミパイプの外径は 28 mm で喉頭鏡ハンドルの直径とほぼ等しくし，また，パイプを握る圧力を測定できるように，図 4-2（左）に示すとおり，内部の 2 カ所に圧力センサを取り付けた．圧力センサには FlexiForce A201-100，センサの I/O ボードには Phidget Interface Kit 8/8/8 を使用した．

第 3 章に述べたが，皮膚と接触する面の形状によって，疑似的な力覚が生じる．本実験で

は、OCHD と喉頭鏡モデルパイプ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 で使用されているものと同様のシリコン製の小さなエフェクタを取り付けた(図 4-2(右))。

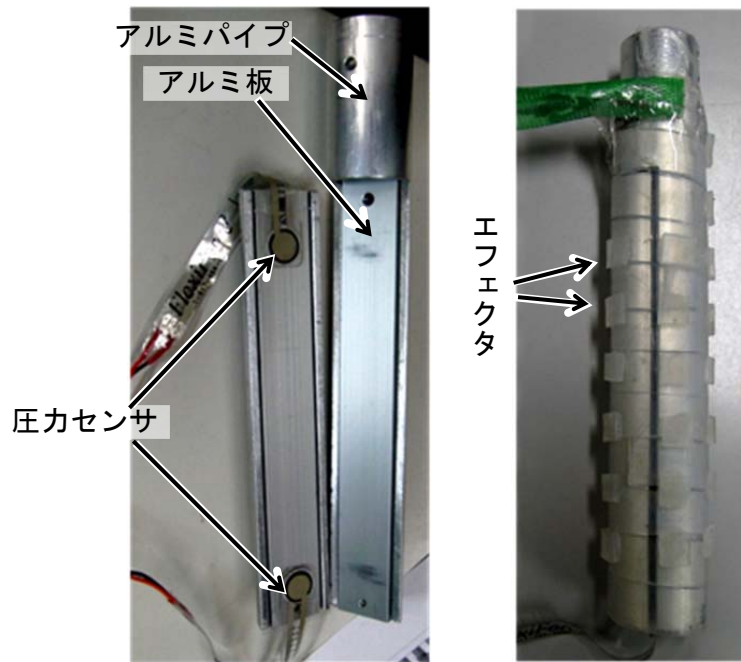


図 4-2 喉頭鏡モデルのパイプの内部 (左) と外部 (右)

図 4-3 に示すように、OCHD 条件では、被験者の手に被せた OCHD をモータによって駆動するが、被験者が把持している喉頭鏡の把持部分を模したアルミパイプはモータと接続していない。これによって、被験者は OCHD からのみ触力覚を受ける。これに対して、直接駆動条件では、パイプをモータと接続するため、触力覚をこのパイプによって被験者に与える。

刺激閾 (知覚可能な最少モータトルク) を測定するために、OCHD および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 軸力覚センサを取り付けた。6 軸力覚センサには ATI 社の Mini-40、モータとモータコントローラには Maxon motor 社の RE-Max 11W と EPOS を使用した。

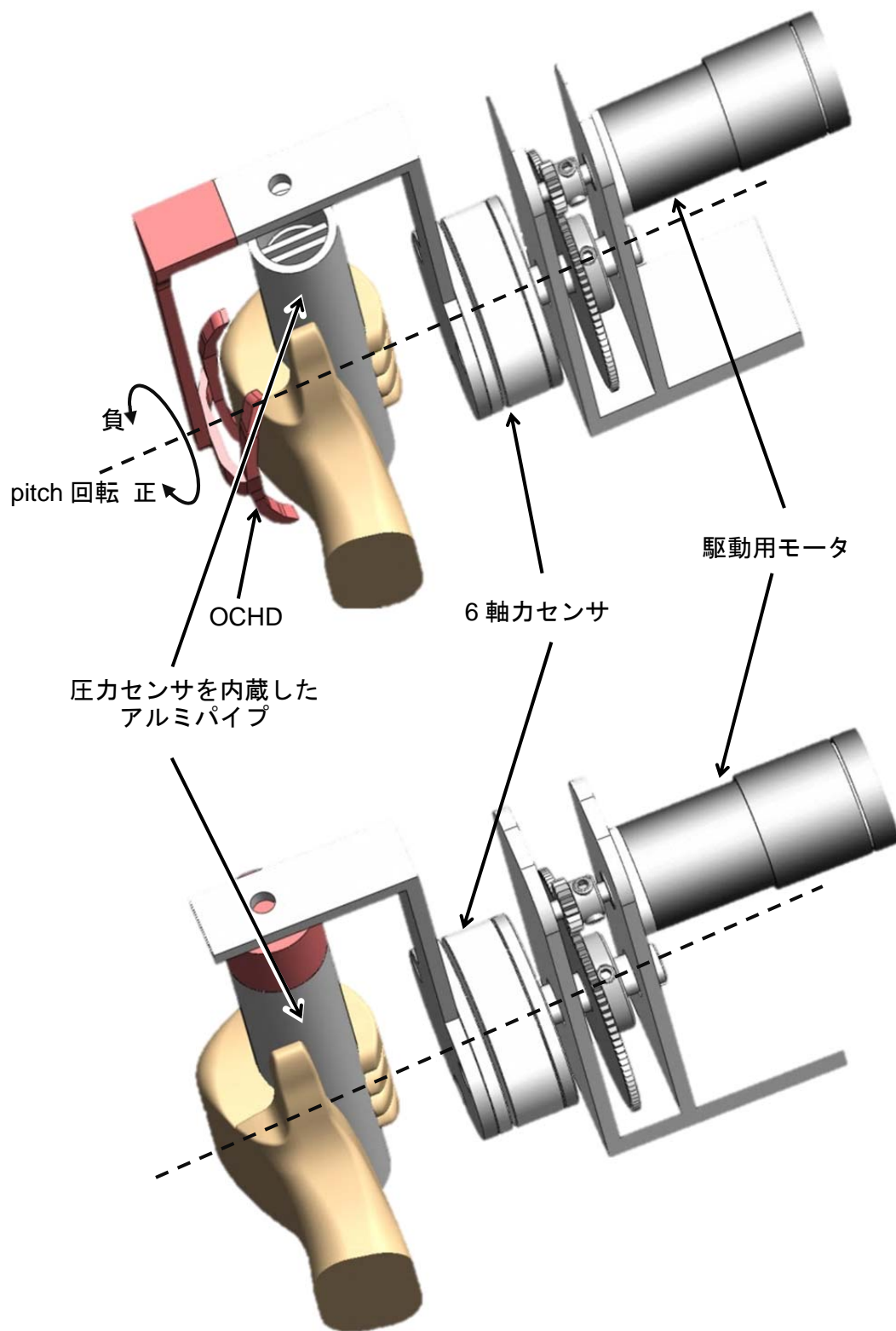


図 4-3 OCHD 条件 (上) と直接駆動条件 (下) の実験装置の概念図

OCHD 条件の実験装置と実験の様子を、図 4-4 に示す。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 (図 4-4 (右))。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目標値の握力を維持できるようにした。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した (図 4-5)。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。HMD には eMagin 社が開発した Z800 3DVisor を利用した。

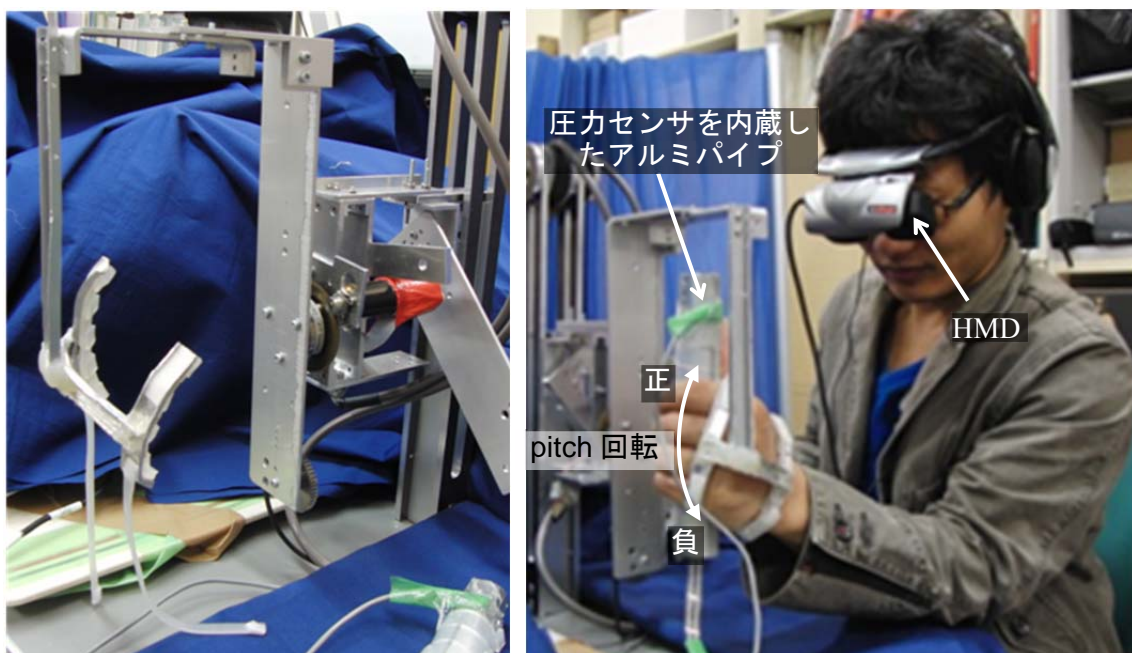


図 4-4 OCHD 条件の実験装置 (左) と実験の様子 (右)

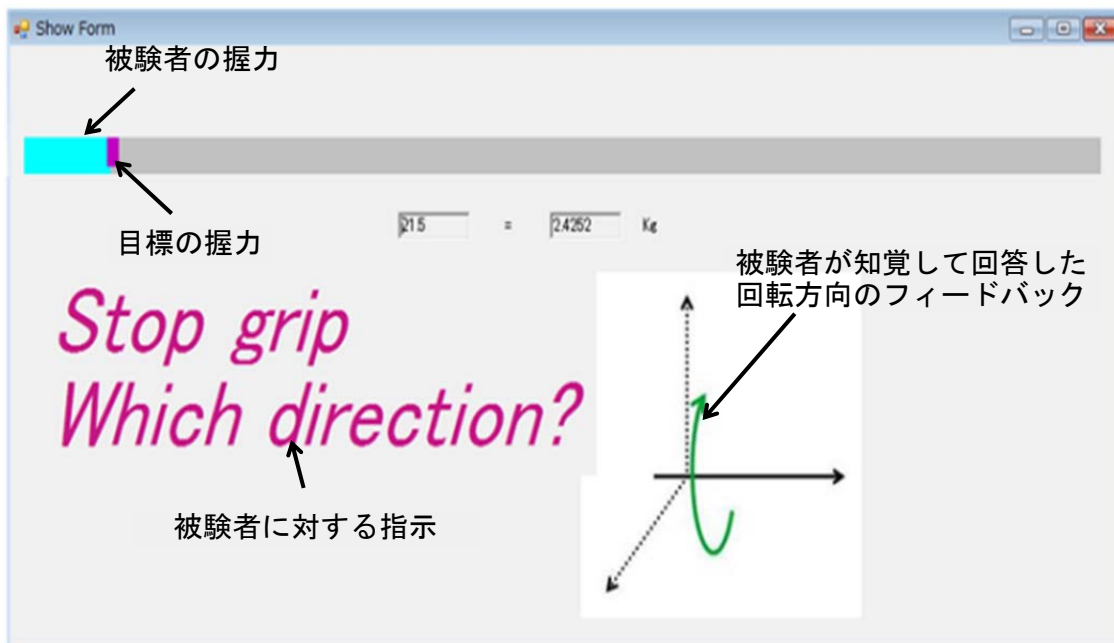


図 4-5 HMD に表示される情報

被験者が喉頭鏡モデルパイプを握っている時、圧力センサで測定する握力と、6 軸力覚センサで測定する刺激量の値は不安定に変動する。そこで、この不安定さを軽減するために、被験者を椅子に座らせ、提示される手の肘を机の上に置かせる。

また、握力測定の誤差を調べるため、5 名の被験者に、喉頭鏡モデルパイプを握る予備実験を実施した。その結果、最も標準偏差が大きいのは、握力が 2kgf の時であり、被験者ごとの平均値は $1.98 \text{ kgf} < \mu < 2.02 \text{ kgf}$ で、標準偏差は $0.027 \text{ kgf} < \sigma < 0.033 \text{ kgf}$ であった。この為、握力の許容誤差は $\pm 0.035 \text{ kg}$ とし、図 4-5 に示す目標の握力は横棒で表わした目盛の幅がこの許容誤差の値と同じになるようにした。6 軸力覚センサの測定値の変化は、変化量が 1 N-mm 以下の場合には打ち消すこととした。

モータの回転角度制御は Maxon 社のモータコントローラ (EPOS24/5 275512) を利用した、速度・加速度フィードフォワード付き PID 位置制御方式により行われた (図 4-6)。この制御における係数 (K_p , K_I , K_D , K_ω , K_α) は、モータコントローラの自動チューニングにより決定された。また、この制御では、回転速度と加減速の目標値は台形曲線により設定した。

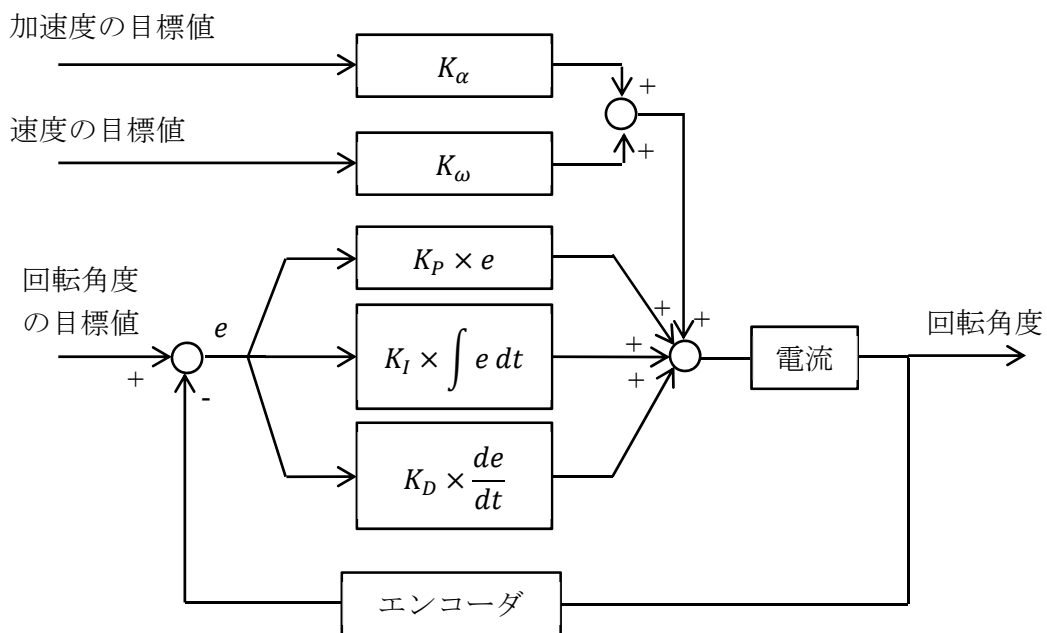


図 4-6 速度・加速度フィードフォワード付き PID 位置制御

本実験では、モータの加減速の目標値は一定としたが、モータの回転角度の目標値と回転速度の目標値は以下のように決定した。

$$\Delta\theta(t) = k_p \times (T(t)_d - T(t)) \quad \dots\dots\dots (4-1)$$

$$\theta_d(t) = \theta(t) + \Delta\theta(t) \quad \dots\dots\dots (4-2)$$

$$\dot{\theta}_d(t) = c_p \times \Delta\theta(t) \quad \dots\dots\dots (4-3)$$

ここで、 $T(t)_d$ と $T(t)$ はそれぞれ目標の刺激量（トルク）と 6 軸力センサの出力値である。 k_p と c_p は P 制御の係数、 $\Delta\theta(t)$ 、 $\theta_d(t)$ と $\dot{\theta}_d(t)$ はそれぞれモータの目標回転角度の増加分、モータ回転角度の目標値、そして回転速度の目標値である。

4.3.4 被験者と手順

被験者は筑波大学生の 21 歳～29 歳の男性 8 名である。どの被験者も気管挿管の訓練経験がない。8 名のうち 1 名は左ききである。また、4 人は日本人、4 人はカンボジア人である。

実験では、まず被験者は椅子の上に座り、肘を机の上に置いた。6 つの条件下における試行ごとに喉頭鏡モデルパイプを握らせた。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、垂直に握るように指示した(図 4-4(右)). 直接駆動条件の場合、モデルパイプが装置に接続されていたため、それをそのまま握らせた. なお、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 4.3.1 節に説明した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 4-4(右))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かを予測できない. 単純上下法における刺激変化量(ステップの幅)は 5 N-mm とした. 被験者は、システムから指示があるたびに回転方向を答えた. 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(上下変換点)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. 刺激を提示する時間は全て 500 ms とした.

4.4 実験結果

4.4.1 刺激閾比較結果

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 4-7)と負方向に対する結果(図 4-8)に分けて示す. また、実験結果は以下のように分散分析を 2 回行った.

この分析では正方向と負方向それぞれに対して、装置条件(直接駆動条件と OCHD 条件)と握力(0kgf, 1kgf, 2kgf)を独立変数とし、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: $F(2, 42) = 12.07, p < .01$).

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.

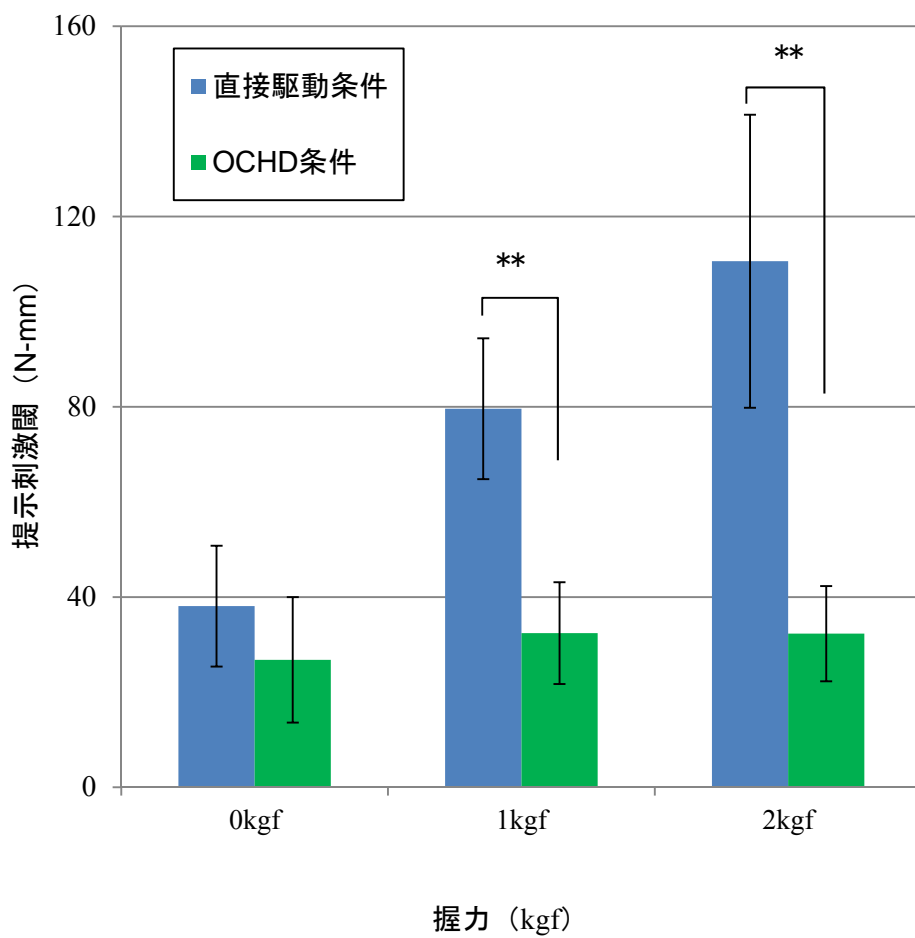


図 4-7 Pitch 軸周りの正方向に関する刺激閾 (** : $p < 0.01$)

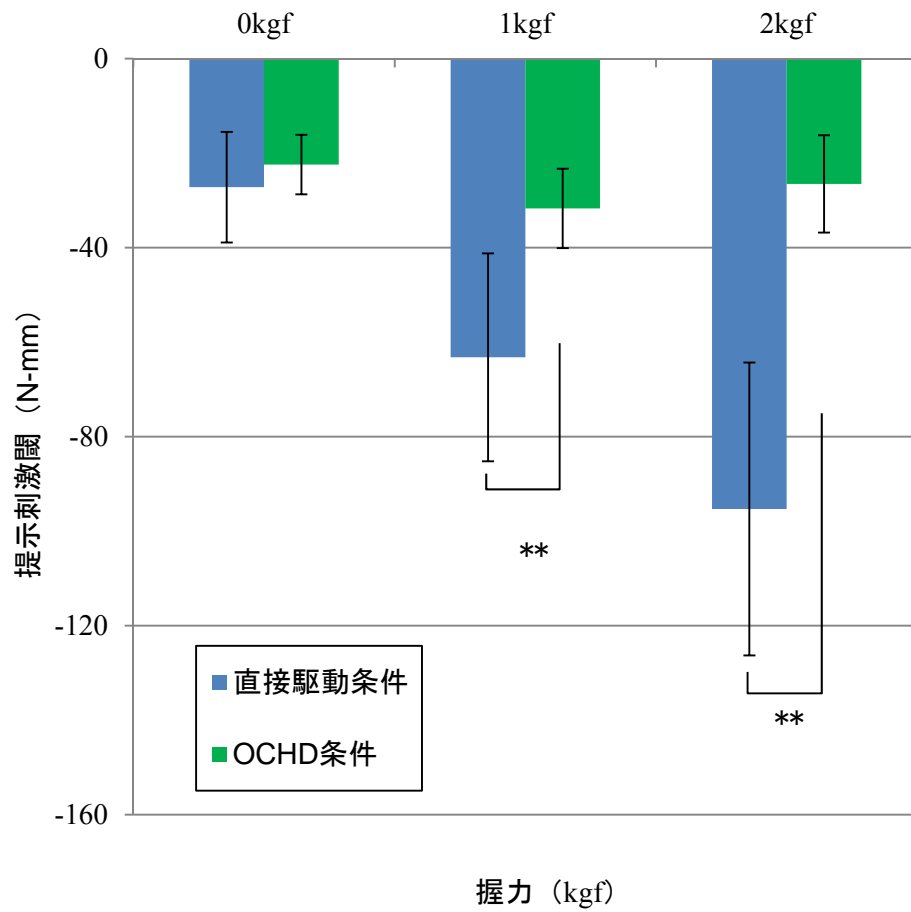


図 4-8 Pitch 軸周りの負方向に関する刺激閾 (** : p<.01)

4.4.2 アンケート結果

学習者に対する本装置の評価を確認するため、被験者が本実験を受けた後、装置に対するアンケートを回答させた。アンケートの質問内容は以下のとおり、日本語と英語の両方を用意した。日本人の被験者には日本語の質問を提示し、日本語で回答を記述させた。カンボジア人の被験者には英語で質問を提示し、英語で回答を記述させた。回答を表 4-1 に示す。

質問：手のひらの場合と、手の甲の場合に、提示させている方向が分かった時、手のどこに、どのように感じたか？ (In both cases of stimulation to palm side and back side of your hand, once you understood the direction of stimulus, how did you feel in your hand and in which part of your hand?)

表 4-1 刺激閾実験における被験者の意見

直接駆動条件	OCHD 条件
被験者 1 : When the device is triggered, the pressure on the palm is different on various part of it (upper or lower). When the pressure on the upper part is strong in the forward direction and that on the lower part is strong in the backward direction, I can realize and judge the direction of the stimulus. This is also same with other direction on the palm.	被験者 1 : When the device is being moved, the skin on the back side of hand is dragged. I can clearly know the direction when the device is strongly moved backward and forward.
被験者 2 : I feel it forces on my palm or thumb and fingers.	被験者 2 : Some parts of it slide on my (back) hand. I also feel it stretches my skin when it moves strongly.
被験者 3 : The movement of the device toward the palm. The heavy movement toward the fingers and thumb (the bones).	被験者 3 : The movement (slide) of the device touching the skin (back) of the hand (moving backward and forward).
被験者 4 : I know it movement because I touch on it. It pushes many parts on my palm side. I feel it tries to move my hand.	被験者 4 : It touches my back hand and fingers, and moves.

被験者 5：親指や小指が引っ張られたり、押されたりして回転が分かる。	被験者 5：手の甲の皮膚の変形によって感じる。特に、人差し指にそった部位の所と小指にそった部位の所が一番感じやすかった。
被験者 6：手の平が押されるような感じ、動作を強制されているような感じ。	被験者 6：手の甲をすべるような感じ、皮膚が引っ張られることで方向が感じられた。 動作を促されているような感じ。
被験者 7：親指の先と小指のつけねで力を感じ。手首の方に向かって力が加えられる時は、2 点が押される感じ。 手先の場合は、逆に 2 点から力が逃げていく感じ。	被験者 7：これは手首の場合は手の甲の皮膚が手首の方に引っ張られる感じ。 手先の場合、手先の方に引っ張られる感じ。
被験者 8：手がふれている喉頭鏡の上と下の部分で方向が分かる。 勝手に動かされている感覚	被験者 8：手の甲の皮膚の引っ張られている方向で、回転方向が分かった。 サポートされて動かしている感覚。

4.5 考察

実験結果が示すように、直接駆動条件では、ウェーバーの法則に従って、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 回転の方向の動作を学習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、気管挿管のための投稿展開を支援するためのシステムを小型化でき、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、今回の実験結果では、握力 0 kgf の場合に 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。

手の甲側は手のひら側よりも受容器が少ないため[Johansson 79][Morley 98]、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していたが、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、第 3 章に述べたように、皮膚接触面の形状により触力覚の知覚が変わることから[坂口 08][Partap 98][佐藤 08]、皮膚触覚提示装置による皮膚変

形の仕方に応じて、人の力弁別能力が変化している可能性がある。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。また、皮膚の変形や張力によって、疑似力覚が発生し[Kuniyasu 11][昆陽 12]、皮膚と垂直の方向への提示より知覚しやすくなり [Biggs 02]、これによって、刺激が大きく感じられた可能性がある。今後、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。

少ない力で喉頭鏡動作の手技を伝達できることは、OCHD の特徴である。しかし、喉頭鏡動作の手技に対するのみならず、OCHD は道具を駆動せずに学習者の手の甲に動作を誘導できるため、1 章で挙げたような突き固めの鑄造作業や内視鏡などの様々な道具を用いる手技に対しても応用可能であると考えられる。さらに、OCHD の方式は、第 2 章に述べたようなウェアラブル装置を実現しやすく、これによってさらに多様なアプリケーションに活用できると考えられる。

一方、本実験で確認できたのは、喉頭展開における最も重要だと考える pitch 回転の方向成分に対する有効性のみである。しかも、被験者は pitch 回転の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 [青山 04] を指示するためには、6 軸 (x , y , z 軸方向の並進成分と、各軸周りの回転成分) 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 で複合的な動作をどの程度正しく伝達できるかについては、今後の研究課題である。

被験者のアンケートの回答によれば、OCHD の方式の場合は、皮膚の変形（せん断力）により提示させる方向が分かったが、直接駆動方式の場合は皮膚にかかった圧力によって分かったようである。また、直接駆動方式は強制的に操作させる間隔であるのに対して、OCHD 方式では動作を促されているように感じたようである。

これらの感想によって、OCHD を使わない直接駆動方式では、マニピュレータが喉頭鏡を駆動してしまうため、学習者の自発的な動作によって訓練をおこなえているとは言いがたい。しかし、OCHD を使用した教示方法では、喉頭鏡を直接動かさずに、学習者に動作方向を理解させる支援のみを行い、学習者は自ら喉頭鏡を動作させることになる。嵯峨らの研究 [嵯峨 05] でも、主体的な教示手法、つまり学習者が能動的に動くことが動作の習得に有効であることが示されており、気管挿管の教示支援において、OCHD を併用した力覚提示は能動的な動作の学習に対する有効性が期待できる。

4.6 本章のまとめ

第 2 章に紹介したように、直接駆動方式と外装型方式がある。しかし、これらの研究では、ウェーバーの法則に起因した問題について検討していない。本研究の OCHD は外装型方式の一種であり、OCHD によりこの問題を解決できるかを確かめるため、pitch 回転の方向に対して刺激閾を測定し、直接駆動条件と比較した。その結果、道具

を強く握っている際, OCHD を利用することによって, 比較的小さな駆動トルクでも, 学習者に動作の方向を知覚させることができることを確認した.

また, アンケートの結果より, OCHD 条件の場合は被験者が皮膚変形を感じて提示方向を判断していることを確認した.

第5章

OCHD を利用した学習効果の実験

5.1 実験の目的

前章では、外装型触力覚提示装置（OCHD）は直接駆動方式と比較して、小さなモータトルクでも学習者に方向を提示可能であることを検討した。本章では、OCHD を用いた教示手法を提案し、その学習効果について検討する。提案手法では、学習者は自分の力で道具を動かすため、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。

本実験では、被験者に喉頭展開を模擬した動作をさせ、視覚情報による誘導、喉頭鏡の直接駆動による誘導、そして提案手法である OCHD による誘導、の各条件において、喉頭鏡操作の誤差を比較し、提案手法の学習効果を確認することを目的とする。

5.2 関連研究

5.2.1 視覚による誘導手法

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[Roberts 06][Kumagai 08][Koritnik 10]. 例えば, Roberts ら[Roberts 06]や Kumagai ら[Kumagai 08]は, 手術の訓練やリハビリを支援するために, 教示動作をモニタに表示し, 学習者はその視覚的な誘導に沿って自分の力で道具を動かす.

Koritnik ら[Koritnik 10]の手法では, 指導者と学習者の体の全体を大きな画面に表示するのに対して, Kumagai ら[Kumagai 08]の手法では, 各動作の種類によって4台の異なるモニタに表示する. 前者の手法では, 道具の形や動作は3次元であるため, 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. このため, Kumagai らの手法のように, 複数の2次元表示を組み合わせる必要がある. しかし, このような複数の表示を学習者が同時に見て, 3次元的な動作を正しく理解し, 道具を正確に動かすことは困難である.

本実験で比較するための視覚による誘導手法では, 喉頭鏡の3次元的な動作を複数の2次元の映像を表示するようにした.

5.2.2 直接駆動による誘導手法

道具を直接駆動し, 学習者の掌の部分に触力覚を与えて誘導する手法において, 学習効果を高めるために様々な提示手法が提案されている. 本論文では, これらの手法を, シミュレータ方式, 視覚フィードバックを併用した直接駆動方式, マスタスレーブ方式の3つに分類する.

1) シミュレータ方式

バーチャル訓練シミュレータとして触力覚を利用するシステムがいくつか提案されている[Mayrose 03][DangXiao 09]. 学習者はバーチャル患者を見ながら道具を動かして喉頭展開の訓練が行え, 道具を駆動するアクチュエータにより, 学習者は患者からの仮想の反力を知覚することができる. しかし, この方式では, 本質的にはマネキンを使って訓練する方法と同等であり, 学習効果もまた同等である. このため, 本実験では, この方式を OCHD と比較しない.

2) 視覚フィードバックを併用した直接駆動方式

視覚フィードバックを併用することで, 学習者は自主的道具を動かしながら, 道具から掌への触力覚フィードバックにより, 動作を修正できる. 例えば, Portillo ら[Portillo 05]は描画の訓練を支援する Haptic Desktop を開発している. このシステムでは, 学習者は指先を道具の先端に置いて, 表示された線を見ながらこの線に沿って道具を動かす. 道具の先端が絵の線から離れた場合, 絵の線までの最短距離である誤差, かつその誤差が発生する速度と比例する力を道具によって提示する. この力覚フィードバックによって, 学習者は自分の動作を修正するため, 学習効果が高まると報告している[Portillo 05].

これに対して、Srimathveeravalli ら[Srimathveeravalli 05]は距離の誤差によるフィードバックをせずに、指導者が出した力を記録してその力で道具を駆動する方法を提案した。この方法では、指導者の力を再生するため、学習者は道具を動かさなくても、道具は自動に動いてしまう。Bluteau ら[Bluteau 08]は、この方法は、距離の誤差による力覚フィードバックのみを提示する方法よりも、学習効果が高くなることを示した。また、嵯峨ら[嵯峨 05]は、指導者の力のままを再生するのではなく、指導者の力と逆方向の力を提示し、学習者にその力を打ち消すように道具を操作させることで能動的な学習を実現し、学習効果を高めた。

他、直接駆動方式では、視覚フィードバックを併用することによって学習効果が高くなることが明らかになっている[Teo 02][Feygin 02][Palluel-Germain 07]。これらは、描画や書道訓練のための研究であり、学習者は力覚フィードバックの他、指導者の手の動きの軌跡を視覚情報として得ることができる。これに対して、本研究で事例とした喉頭展開では、指導者の力を記録して再生できるが、指導者の手の動きの軌跡が残らない。このため、嵯峨ら[嵯峨 05]の手法と同様に、学習者に道具を動かせるようにしても、学習者が正しい軌跡に沿って動かすのは困難である。

3) マスタスレーブ方式

上に述べたように、描画や書道の訓練では、学習者は絵や字の線を視覚的に観察しながらそれをなぞるように道具を動かして学習することができる。しかし、喉頭展開のような訓練ではそうした手法はとれない。このため先行研究[Kuzuoka 08]では、喉頭展開の訓練のため、パラレルリンク機構を用いたマスタスレーブ型の教示システムを開発し、これによって指導者が動いている動作を学習者に伝えることができる。

このシステムを普及して、図 5-1 に示すように、アクチュエータを利用することで、スレーブ喉頭鏡とマスタ喉頭鏡を別々の機構にすることができる。そして、6 軸力センサを用い、機構の慣性力を打ち消すように制御ができ、また、指導者がマスタスレーブ方式でマスタ喉頭鏡を操作することによって、スレーブ喉頭鏡の正しい動かし方を触力覚で提示可能だと考えられる。

教示方法については、指導者は学習者の隣にいて（または遠隔のカメラで）学習者の実演の様子を観察しながらマスタを操作し、正しい動作に誘導したり、学習者の動作を修正する。また、本実験のように指導者がいない場合、指導者の動作を再生して学習させることができる（図 5-2）。しかし、この方式では、学習者に道具を動かさないため、学習効果が高くないと考えられる。

本実験では、喉頭展開を模擬した動作を学習させるため、この方式を用いて学習効果を比較するようにした。

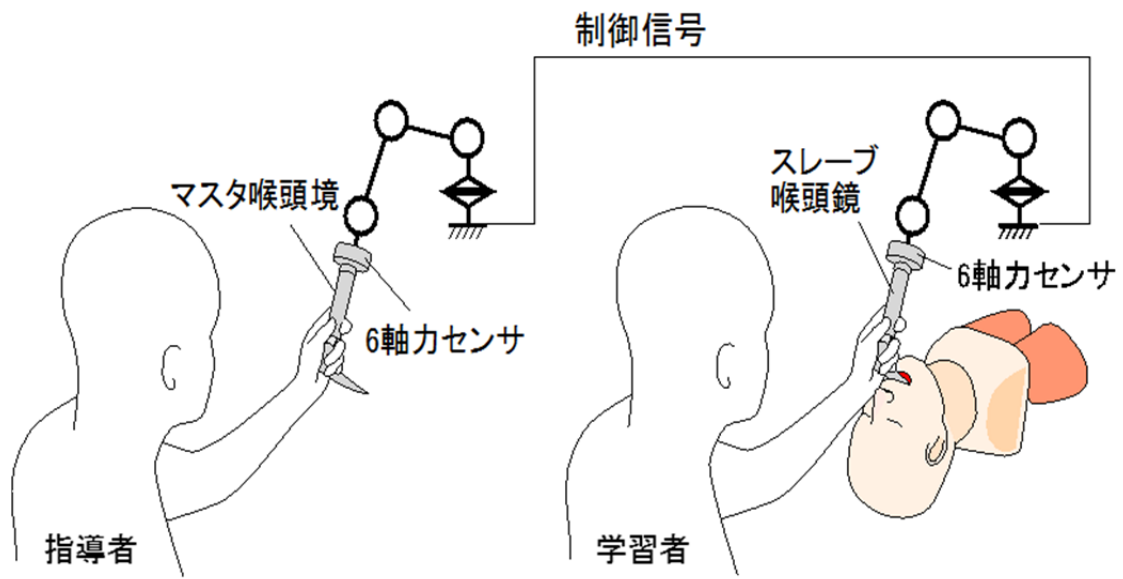


図 5-1 マスタスレーブ方式による動作教示の概念図

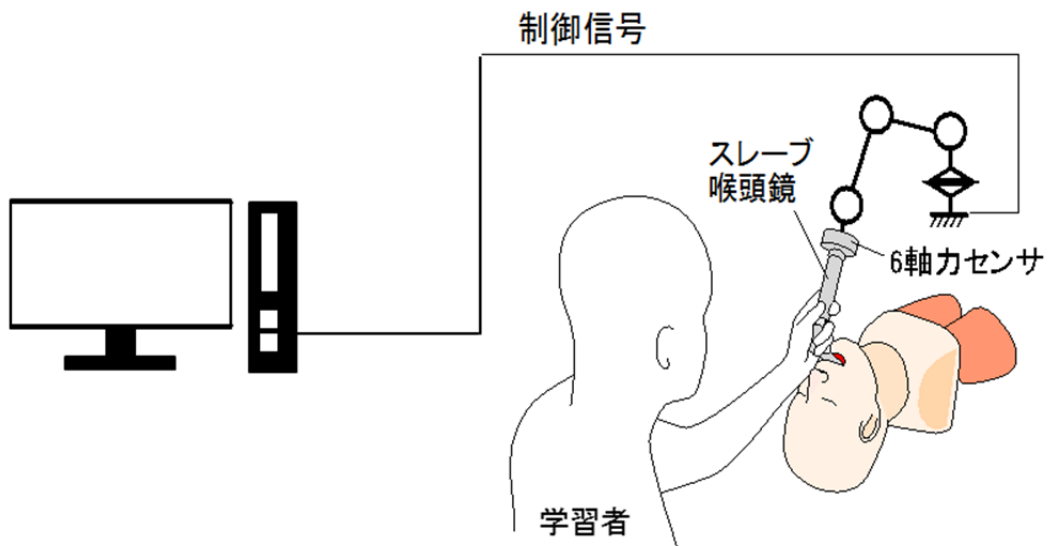


図 5-2 登録・再生による動作教示の概念図

5.2.3 OCHD による誘導

5.2.2 節に述べたように、描画や書道と異なって、指導者の手の動きの軌跡が残らない喉頭展開の訓練では、指導者の動作や力を再生して学習させるため、マスタスレーブ方式を利用することができる。しかし、道具を直接駆動して誘導する場合、学習者に道具を動かさないため、学習効果が高くなると考える。これに対して、OCHD は学習者の手の外側から誘導するため、学習者が道具を動かすようになると考えられる。これによって、学習効果が高くなると期待した。

5.3 実験方法

5.3.1 学習させる動作

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[Hashemi 07]。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、子どもの患者の場合では 21N である[Bucx 92][Bucx 92]。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[Theron 10]。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、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 $F(t)$ 、ハンドルの回転角度 $\theta(t)$ と回転速度の目標値 $\omega(t)$ を用いて以下のように設定した。

$$F(t) = \begin{cases} f_n (1 - e^{-t}) & (0 \leq t \leq 10 [s]) \\ 0 & (t > 10 [s]) \end{cases} \dots\dots\dots(5-1)$$

$$\omega(t) = \begin{cases} 34^\circ/s & (0 \leq t \leq 1 [s]) \\ 0 & (t > 1 [s]) \end{cases} \dots\dots\dots(5-2)$$

$$\theta(t) = \begin{cases} \omega(t) \times t & (0 \leq t \leq 1 [s]) \\ 34^\circ & (t > 1 [s]) \end{cases} \dots\dots\dots(5-3)$$

この式における座表系を図 5-3 に示す。 n ($=1, 2, 3$) は誘導動作の 3 種類の力の大きさを示し、 $f_1 = 21N, f_2 = 29.5N, f_3 = 38N$ (29.5N は f_1 と f_2 の平均値) である (以後、 f_n を最大目標値と呼ぶ)。練習用の誘導動作の生成には同じ式を利用し、このときの最大目標値 f_0 は 10N とした。各誘導動作の時間は 10 秒である。

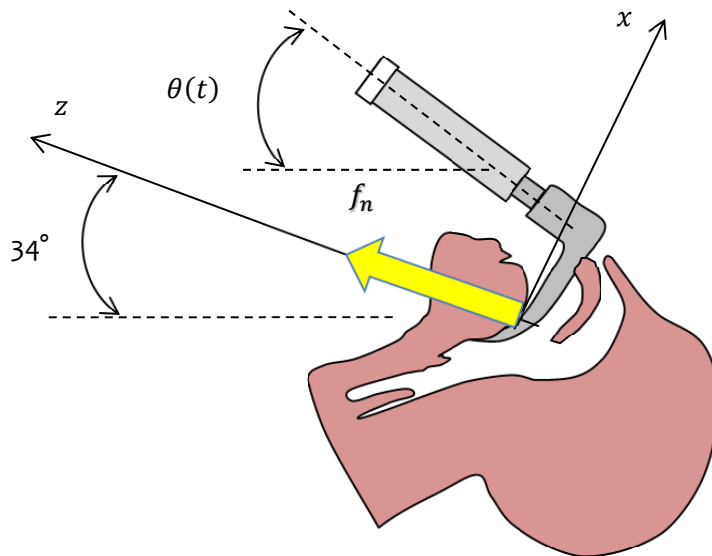


図 5-3 実験における喉頭鏡の座標系

5.3.2 評価のためのパラメータ

本実験では、学習時に被験者が喉頭鏡に加えた力の大きさ (F_{sub})、学習時および再現時に喉頭鏡に加えた力の誤差 (F_e)、喉頭鏡の回転角度の誤差 (θ_e)、そして喉頭鏡操作の誤差 (P_{EF} : Performance Error in Force) により評価する。

1) 学習時に被験者が喉頭鏡に加えた力の大きさ F_{sub}

F_{sub} は、学習の時間に対する平均値として以下の計算式で求める。 F_{sub} の値は、以下の式で力の方向及び喉頭鏡モデルの回転角度とは無関係に算出される。

$$F_{sub} = \frac{1}{\tau} \int_0^t \sqrt{F_{sub,x}^2(t) + F_{sub,y}^2(t) + F_{sub,z}^2(t)} dt \quad \dots\dots\dots(5-4)$$

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

ここで、図 5-4 に示すように、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。 sub は被験者を示し、 t と τ はそれぞれ学習の時間と学習させた合計の時間である。喉頭展開のために要する時間は、10 秒であるため、 τ を 10 s とした

[Hashemi 07]. また, $s1, s2$ はそれぞれ 6 軸力覚センサ①で測定するアクチュエータの力と, 6 軸力覚センサ②で測定する喉頭鏡に加えた合計の力 (患者の口腔内にかかる力) であることを示す (図 5-4). 視覚条件の場合, アクチュエータを使わないため, アクチュエータの力を 0 とする. すなわち, 喉頭鏡に加えた合計の力は, 被験者の力のみである.

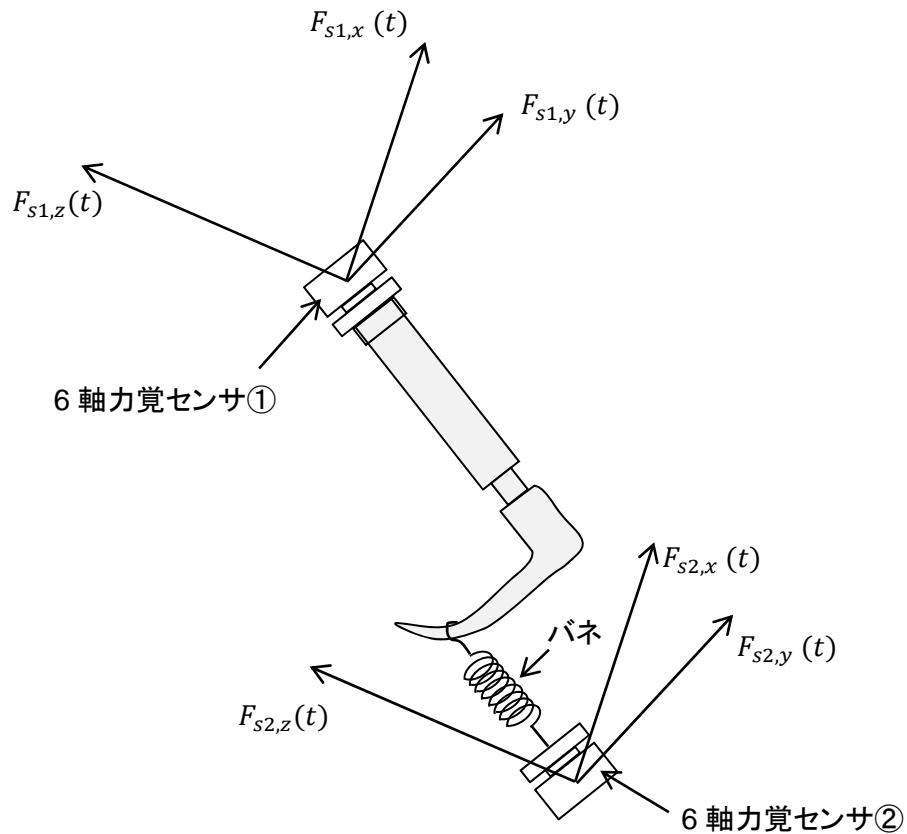


図 5-4 F_{sub} を求めるための座標系

2) 喉頭鏡に加えた力の誤差 F_e

F_e は, 目標とする力に対する誤差の時間平均であり, 以下の計算式で求める.

$$F_e = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \sqrt{F_{e,x}^2(t) + F_{e,y}^2(t) + F_{e,z}^2(t)} dt \quad \dots\dots\dots(5-6)$$

$$\begin{cases} F_{e,x}(t) = F_{s2,x}(t) \\ F_{e,y}(t) = F_{s2,y}(t) \\ F_{e,z}(t) = F(t) - F_{s2,z}(t) \end{cases} \dots\dots\dots(5-7)$$

ここで、 e は目標値に対する誤差を示す。

3) 喉頭鏡回転角度の誤差 θ_e

θ_e は、回転角度 $\theta(t)$ の目標値と被験者が操作した喉頭鏡の回転角度 $\theta_{sub}(t)$ の誤差の時間平均であり、以下の計算式で求める。

$$\theta_e = \frac{1}{\tau} \int_0^t |\theta_{sub}(t) - \theta(t)| dt \dots\dots\dots(5-8)$$

4) 喉頭鏡操作の誤差 P_{EF}

本実験では、Portillo ら[Portillo 05]による誤差 P_{SD} を参考にし、喉頭鏡に加えた力の誤差と喉頭鏡の回転角度の誤差を複合した喉頭鏡操作の誤差 P_{EF} を定義した。 P_{SD} の値は学習の時間、操作速度、目標軌道からの誤差（距離）を考慮して、以下の式により計算する。

$$P_{SD} = \frac{\int_0^t |\Delta| dt}{\int_0^t v dt} \dots\dots\dots(5-9)$$

ここで、 $t, v, |\Delta|$ はそれぞれ、学習の時間、操作速度、目標軌道からの誤差の誤差である。

P_{EF} もこれに基づき、学習の時間、目標とする喉頭鏡の角度との誤差と、喉頭鏡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。 P_{EF} を求める式は以下の通りであり、単位はニュートン（N）である。

$$P_{EF} = \frac{1}{\tau} \int_0^t \sqrt{F_{e,x}^2(t) + F_{e,y}^2(t) + F_{e,z1}^2(t) + F_{e,z2}^2(t)} dt \dots\dots\dots(5-10)$$

$$\begin{cases} F_{e,x}(t) = F_{s2,x}(t) \\ F_{e,y}(t) = F_{s2,y}(t) \\ F_{e,z1}(t) = F(t) - F_{s2,z}(t) \times \cos(\theta_{sub}(t) - \theta(t)) \\ F_{e,z2}(t) = F_{s2,z}(t) \times \sin(\theta_{sub}(t) - \theta(t)) \end{cases} \dots\dots\dots(5-11)$$

また,

$$F_{e,1}^2(t) = F_{e,x}^2(t) + F_{e,y}^2(t) \quad \dots\dots\dots(5-12)$$

$$F_{e,2}^2(t) = F_{e,z1}^2(t) + F_{e,z2}^2(t)$$

とおくと

$$P_{EF} = \frac{1}{\tau} \int_0^t \sqrt{F_{e,1}^2(t) + F_{e,2}^2(t)} dt \quad \dots\dots\dots(5-13)$$

である.

式 (5-11) と (5-12) における力の大きさを, 図 5-5 示す.

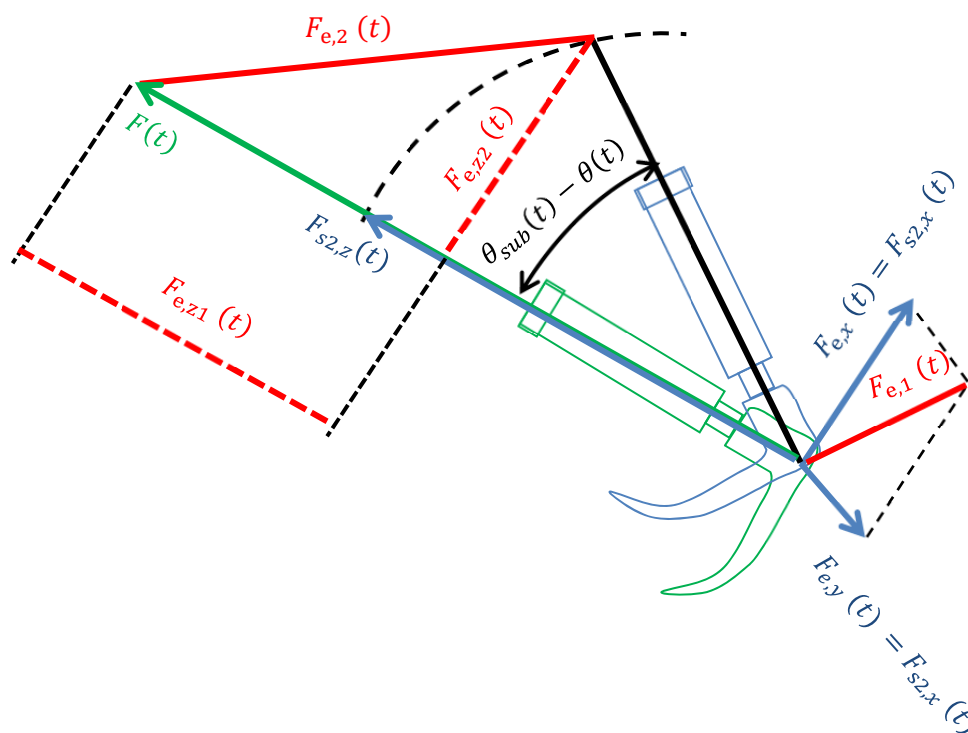


図 5-5 P_{EF} の計算式の説明図

5.3.3 実験デザイン

実験は, 学習条件 (直接駆動条件, OCHD 条件, 視覚条件) と学習させる喉頭鏡の

動作の最大目標値 ($f_1 = 21\text{N}$, $f_2 = 29.5\text{N}$, $f_3 = 38\text{N}$) を要因とした 3×3 の条件で行った。学習効果を回避するために、学習条件と動作の最大目標値の順番はカウンタバランスをとった。OCHD の学習効果については、学習時に学習者が喉頭鏡に加えた力、および学習時の P_{EF} と再現時の P_{EF} の比較結果に基づいて論じる。

本実験では、提案する OCHD を利用した手の外側からの誘導による学習効果を明らかにするため、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、被験者は学習時に実験装置の様子を見たり、動作音を聞いたりすることができるようにした。

5.3.4 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 5-6)。まず、喉頭鏡を握る握力を計測できる、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」と呼称する)。

図 5-6 に示すように、喉頭鏡モデルを、バネ (ばね定数 2.5 N/mm) を介して 6 軸力覚センサ (ATI Mini45 FT09486, 図 5-6 中の 6 軸力覚センサ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。喉頭鏡モデルの回転角度の計測には、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 つのマーカを取り付けた。

この計測装置を利用して、視覚的な情報をフィードバックする手法、喉頭鏡を直接駆動する手法、OCHD を利用した学習手法、そして 3 種類の条件を比較した。各条件の詳細は以下に示す。

1) 視覚条件

図 5-6 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。モニタは、学習時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 5-7 に示す。目標動作は x - z 平面上のみ動くため、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、バネにかけ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 0 N 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、およびバネにかける力の目標値と実際の値をモニタに表示することで、被験者は視覚的フィードバックを確認しながら動作を学習する。

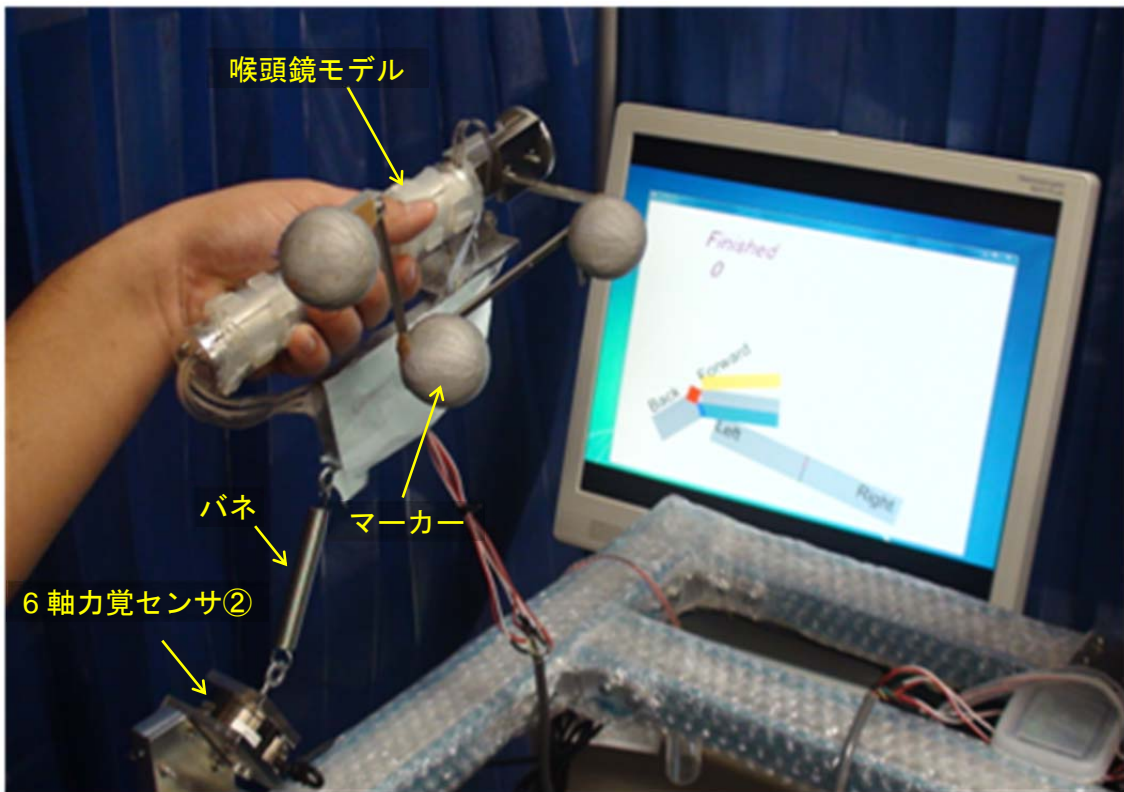


図 5-6 視覚による誘導条件

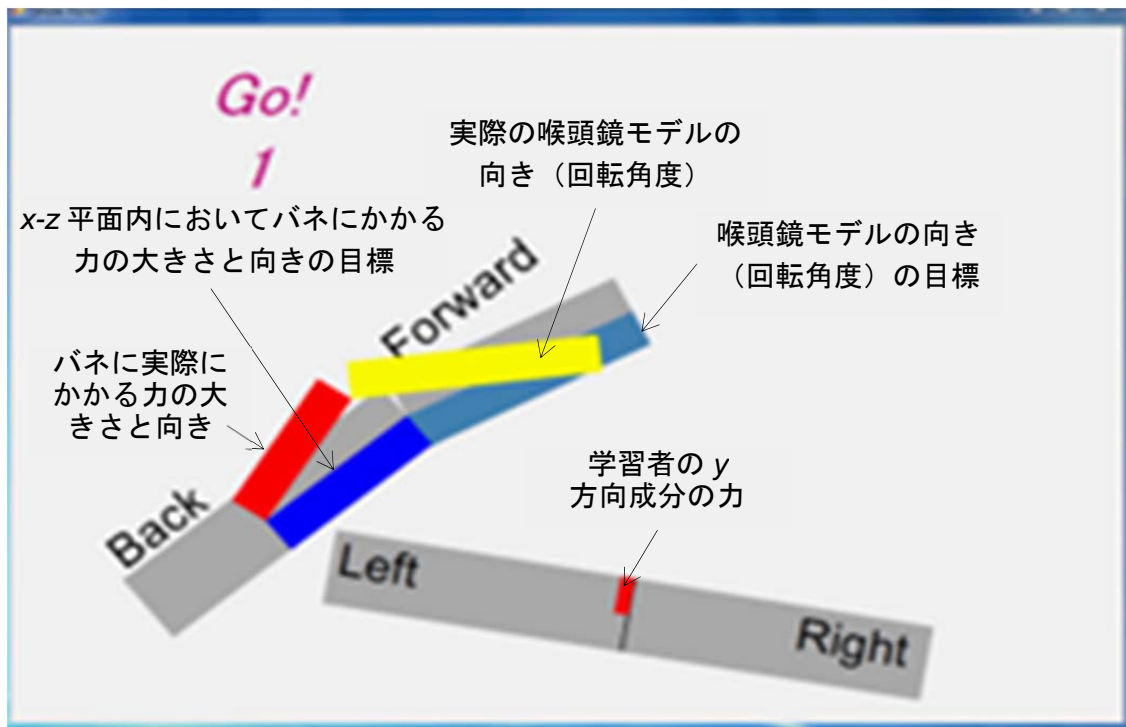


図 5-7 視覚条件における画面表示

2) 直接駆動条件

直接駆動条件の実験装置の概念図は図 5-8 (上), 制作した実験装置は図 5-9 に示す. 図 5-9 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, バネにかかる力が目標値になるように誘導する. 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.

また, マニピュレータが喉頭鏡モデルを駆動する力を検出するために, 6 軸力覚センサ (ATI Mini40 FT08735, 6 軸力覚センサ①) をマニピュレータの先端と喉頭鏡モデルの間に取り付けた. 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.

マニピュレータの手先の位置・姿勢と速度の制御については, 4.3.3 と同様に, Maxon 社のモータコントローラを利用した, 速度・加速度フィードフォワード付き PID 位置制御方式によりおこなった.

本実験では, マニピュレータ手先の位置・姿勢の目標値は, 以下の式 (5-14), (5-15), (5-16) によって求めた.

$$\begin{aligned} \Delta x(t) &= k_{p,x} \times (F(t)_{d,x} - F(t)_x) + k_{i,x} \times \int (F(t)_{d,x} - F(t)_x) dt \\ \Delta y(t) &= k_{p,y} \times (F(t)_{d,y} - F(t)_y) + k_{i,y} \times \int (F(t)_{d,y} - F(t)_y) dt \quad \dots\dots\dots(5-14) \\ \Delta z(t) &= k_{p,z} \times (F(t)_{d,z} - F(t)_z) + k_{i,z} \times \int (F(t)_{d,z} - F(t)_z) dt \\ \Delta \theta(t) &= k_{p,\theta} \times (\theta(t)_d - \theta(t)) + k_{i,\theta} \times \int (\theta(t)_d - \theta(t)) dt \end{aligned}$$

ここで, k_p , k_i は各軸における PI 制御の係数に示す. 制御の発散を防ぐため, 回転角度の I フィードバックについては, 最大値を 15 度とした.

マニピュレータ手先の位置と姿勢の目標値は以下の式で求める.

$$\begin{aligned} x(t)_d &= x(t) + \Delta x(t) \\ y(t)_d &= y(t) + \Delta y(t) \\ z(t)_d &= z(t) + \Delta z(t) \quad \dots\dots\dots(5-15) \\ \theta(t)_d &= \theta(t) + \Delta \theta(t) \end{aligned}$$

また, マニピュレータ手先の速度の目標値は以下の式で求める.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= c_{p,x} \times \Delta x(t) \\ \dot{y}(t) &= c_{p,y} \times \Delta y(t) \quad \dots\dots\dots(5-16) \\ \dot{z}(t) &= c_{p,z} \times \Delta z(t) \end{aligned}$$

$$\dot{\theta}(t) = c_{p,\theta} \times \Delta\theta(t)$$

ここで、 c_p は各軸における係数である。

3) OCHD による誘導条件

OCHD による誘導条件の実験装置の概念図は図 5-8 (下) に示す。図 5-10 に示すように、6 自由度マニピュレータを 6 軸力覚センサ①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、それに従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を OCHD を介して手の甲に知覚する。

マニピュレータの制御については、直接駆動条件と同じアルゴリズムを利用した。

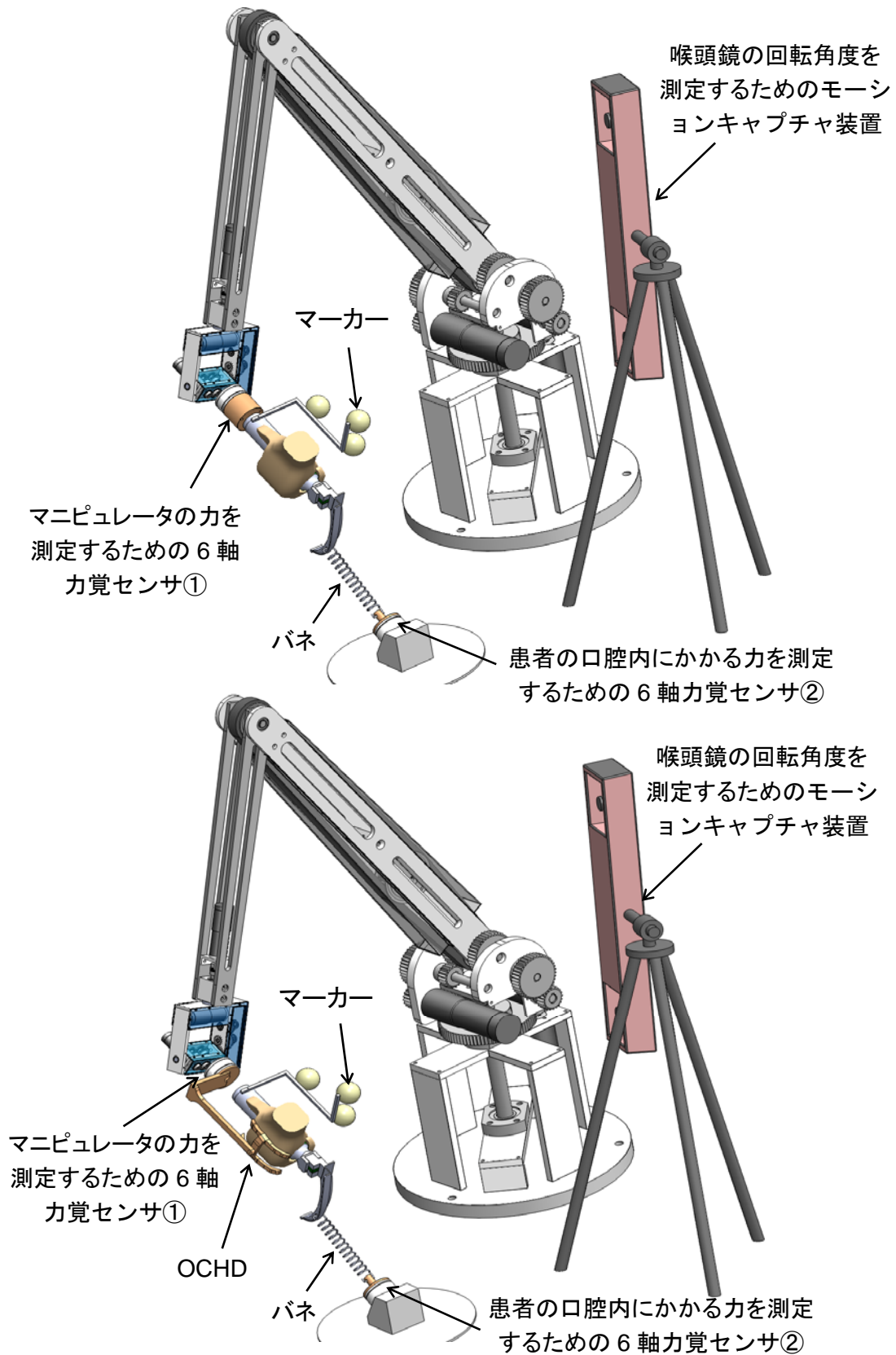


図 5-8 直接駆動条件（上）と OCHD 条件（下）の実験装置の概念図

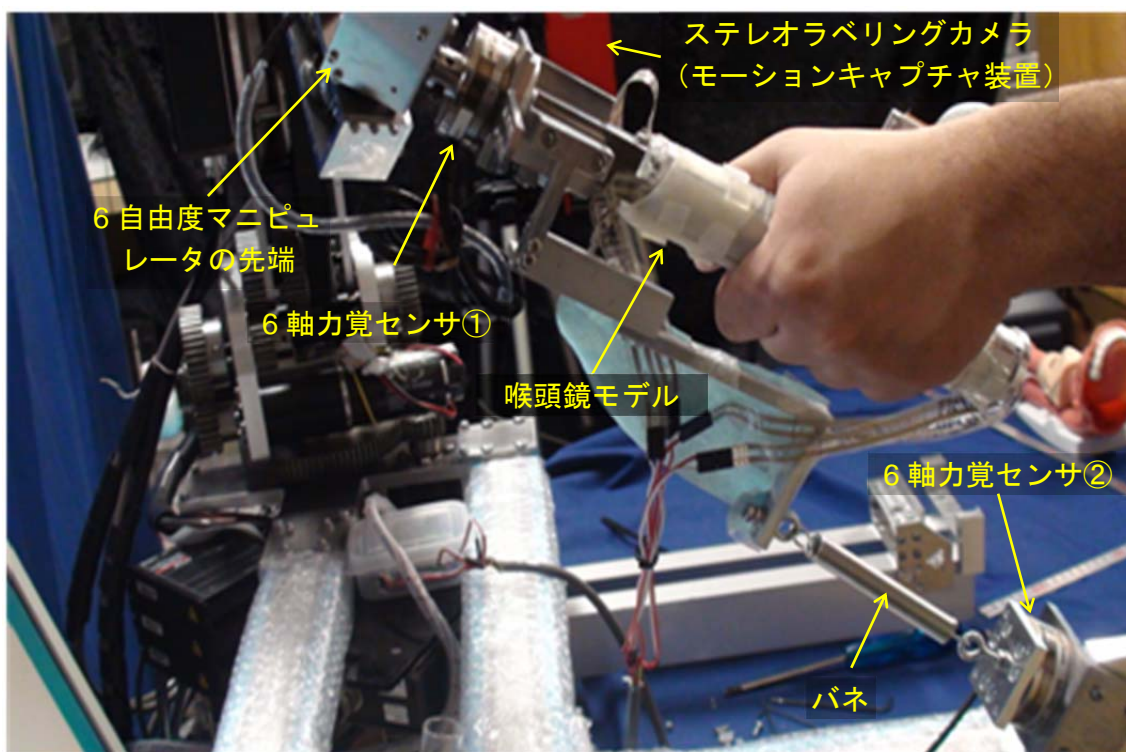


図 5-9 直接駆動による誘導条件

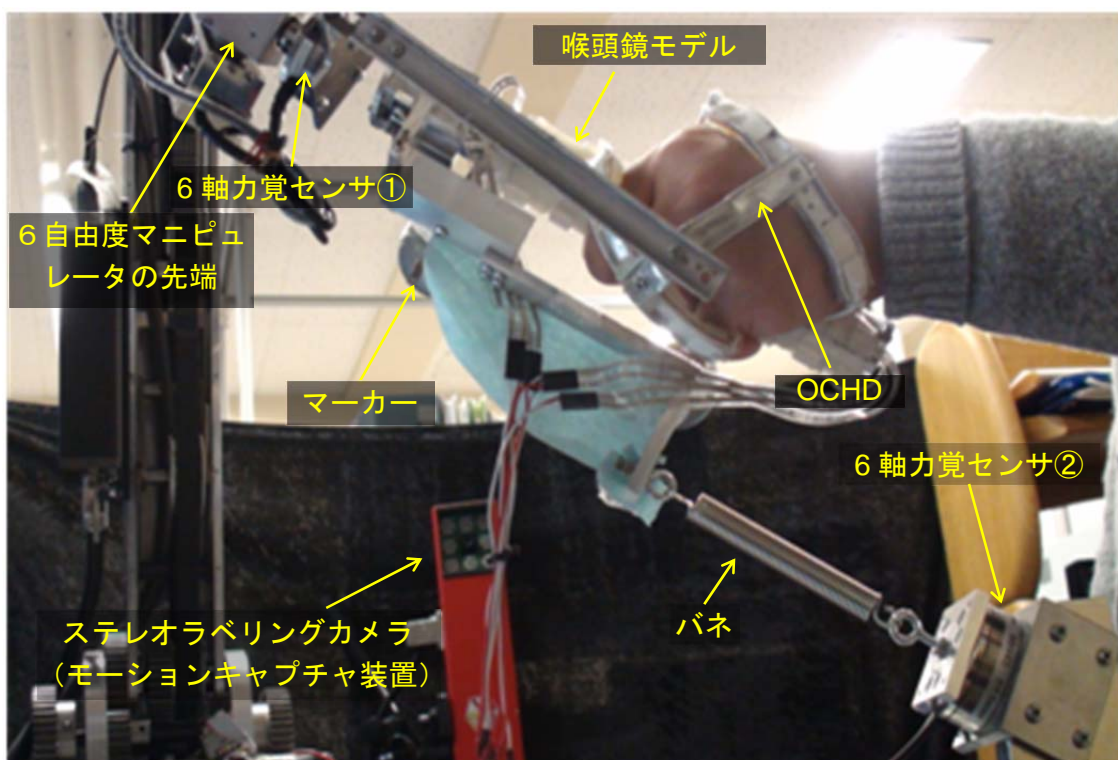


図 5-10 OCHD 条件

5.3.5 被験者と手順

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。

実験では，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，学習の前に，装置による誘導に慣れるように，各誘導方法について説明しながら，誘導動作を2回練習させた。練習の動作は，5.3.1に説明した学習動作と同様にしたが，喉頭鏡操作の力の最大目標値 f_0 は10Nとした。実験装置について被験者に，「視覚条件では，喉頭鏡の動作の誘導は映像に表示するが，直接駆動条件とOCHD条件では，喉頭鏡やOCHDの動きを見ながら，誘導に従って道具を動かしてください」と説明した。また，「学習した後，その動作を再現することが必要であるため，自分が出す力や喉頭鏡の動きと姿勢を覚えてください」と説明した。

実験では，ある誘導条件で決められた動作を1回学習させた後，およそ2分間休憩させた。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5-11）。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。

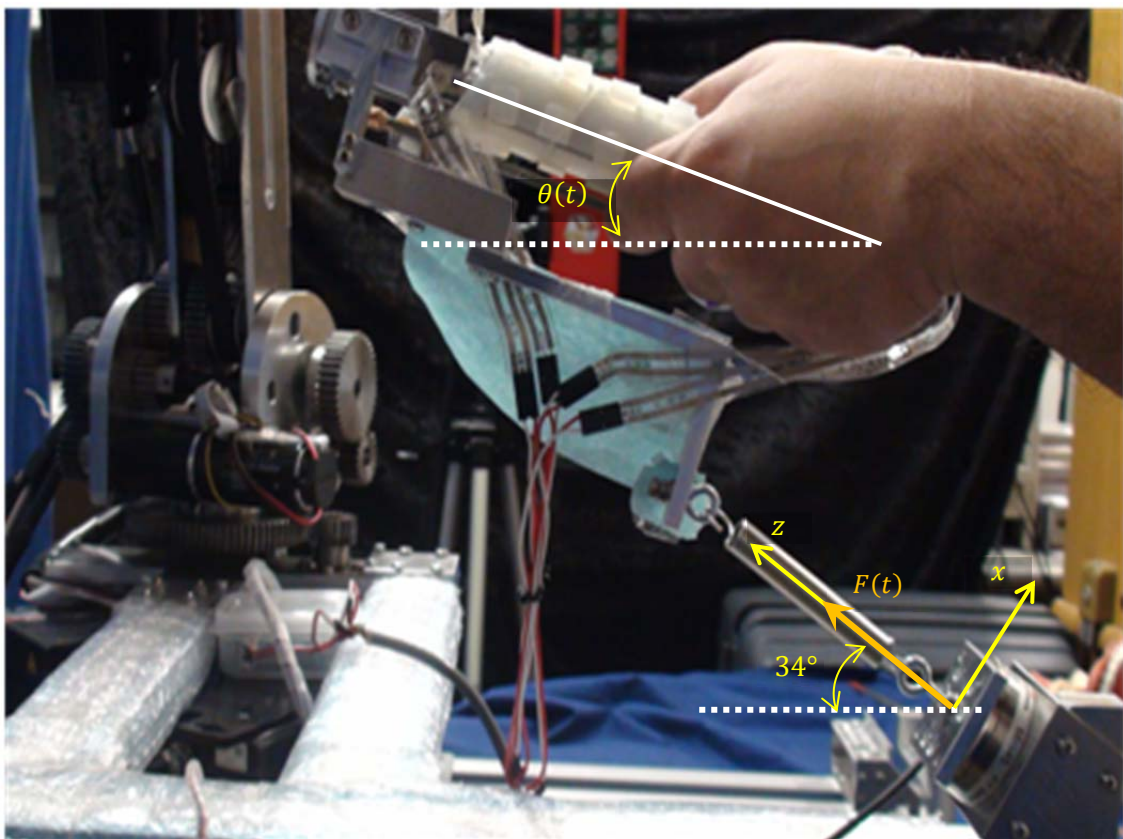


図 5-11 再現様子と実験における座標系

5.4 実験結果

5.4.1 学習時に被験者が喉頭鏡に加えた力の大きさ F_{sub} の比較

図 5-12 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。正規性と等分散性を検定した結果、Kolmogorov-Smirnov の検定により正規性が仮定でき（OCHD 条件: $p = .2$; 視覚条件: $p = .2$; 直接駆動条件: $p = .06$ ）、Levene の検定により等分散性が仮定できることがわかった（ $p = .065$ ）。

二元配置分散分析の結果、学習条件の要因と最大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、学習条件の要因と最大目標値の要因に交互作用が認められた（ $F(4, 72) = 2.71, p < .05$ ）。

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、最大目標値の間に有意差が認められた（ $f_1 = 21N$: $F(2, 72) = 10.32, p < .001$; $f_2 = 29.5N$: $F(2, 72) = 13.44, p < .001$; $f_3 = 38N$: $F(2, 72) = 37.05, p < .001$ ）。最大目標値毎に Bonferroni の多重比較をした結果、OCHD 条件と直接駆動条件の間（ $f_1: p < .01; f_2: p < .01; f_3: p < .001$ ）、及び視覚条件と直接駆動条件の間（各最大目標値間において $p < .001$ ）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、最大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 $F(2, 72) = 8.56, p < .01$ ）、直接駆動条件では有意差が認められなかった（ $F(2, 72) = 1.43, p = .25$ ）。

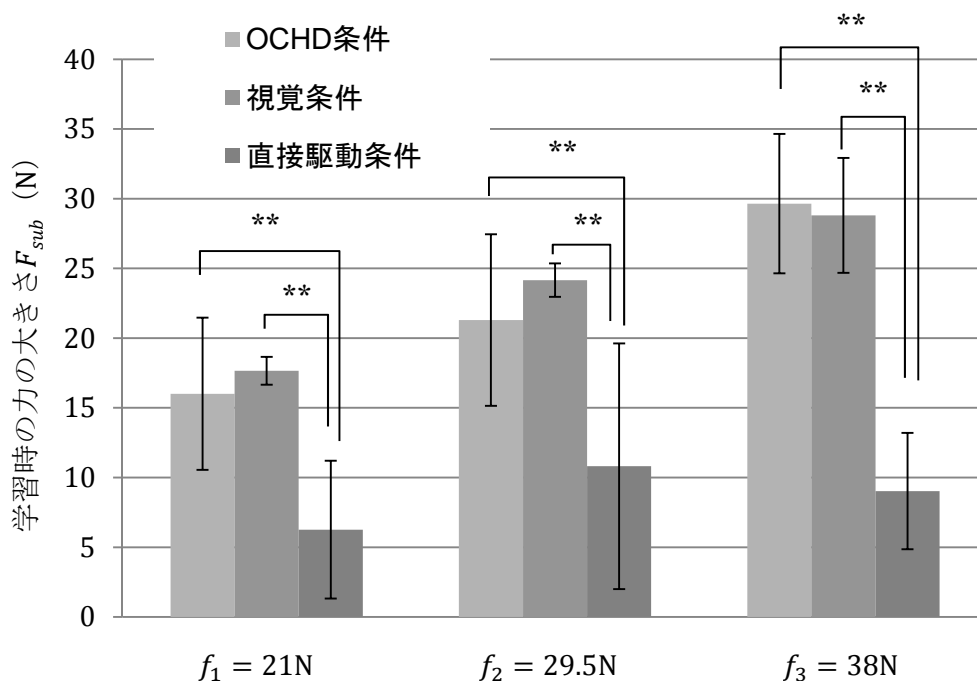


図 5-12 学習時に被験者が喉頭鏡に加えた力の大きさ (F_{sub}) (**: $p < .01$)

5.4.2 学習時に喉頭鏡に加えた力の誤差 F_e の比較

図 5-13 は学習時に被験者が喉頭鏡に加えた力の誤差を比較した結果である。正規性と等分散性を検定した結果、Kolmogorov-Smirnov の検定により正規性 (OCHD 条件: $p = .051$; 視覚条件: $p = .005$; 直接駆動条件: $p < .001$) が仮定できないこと、また Levene の検定の結果、等分散性が仮定できないことがわかった ($p < .001$)。このため、ノンパラメトリックな検定法である Friedman 検定を行った。最大目標値ごとに多重比較をした結果、OCHD 条件と視覚条件の間に有意差がみられなかった (それぞれ $f_1: p = .95$; $f_2: p = 1.0$; $f_3: p = .40$) が、OCHD 条件と直接駆動条件の間に有意差と有意傾向がみられた (それぞれ $f_1: p < .05$; $f_2: p < .01$; $f_3: p < .1$)。また、視覚条件と直接駆動条件の間に有意差がみられた (それぞれ $p < .01$)。

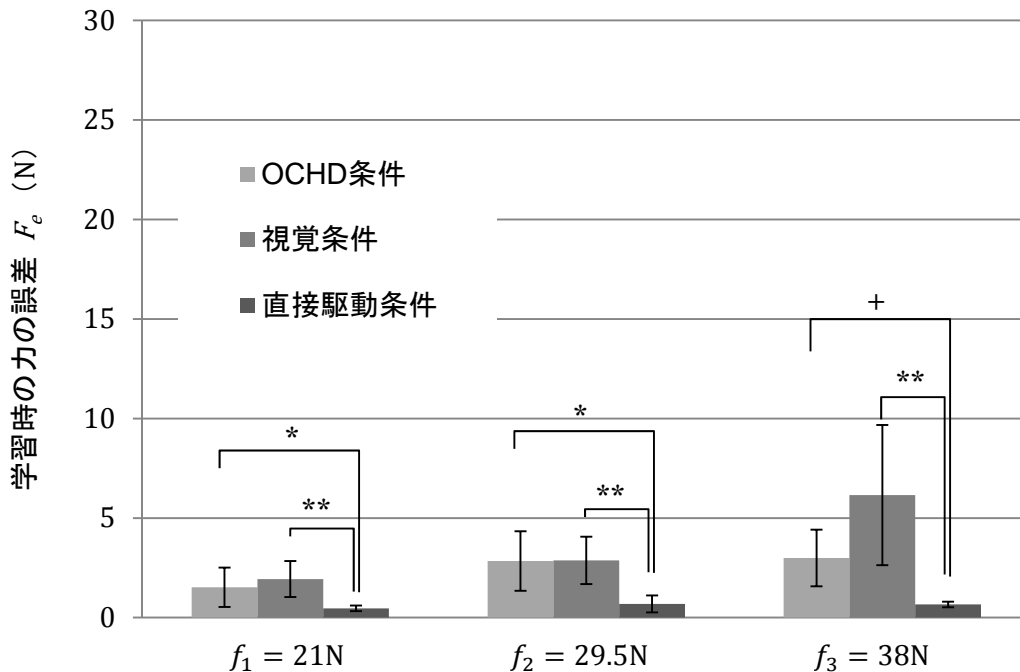


図 5-13 学習時の喉頭鏡に加えた力の誤差 (F_e) (+ : $p < .1$; * : $p < .05$; ** : $p < .01$)

5.4.3 学習時の喉頭鏡回転角度の誤差 θ_e

図 5-14 は学習時に被験者が操作した喉頭鏡の回転角度の誤差を比較した結果である。正規性と等分散性を検定した結果、Kolmogorov-Smirnov の検定により正規性 (OCHD 条件: $p < .001$; 視覚条件: $p = .2$; 直接駆動条件: $p < .001$) が仮定できないこと、また Levene の検定の結果、等分散性が仮定できないことがわかった ($p < .001$)。このため、ノンパラメトリック法である Friedman 検定を行った。最大目標値ごとに多重比較をした結果、OCHD 条件と直接駆動条件の間に有意差がみられなかった ($p = 1.0$)。しかし OCHD 条件と視覚条件の間および、視覚条件と直接駆動条件の間に有意差がみられた (各条件と各最大目標値においてそれぞれ $p < .01$)。

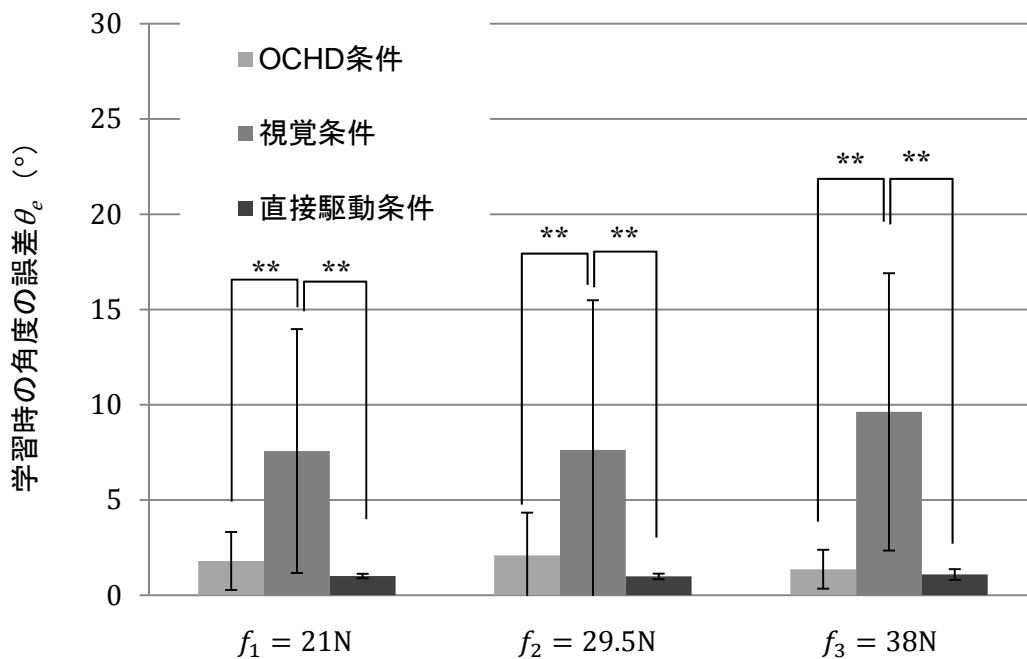


図 5-14 学習時の喉頭鏡回転角度の誤差 (θ_e) (** : $p < .01$)

5.4.4 学習時の誤差 P_{EF} の比較

図 5-15 は被験者が学習している時の P_{EF} を比較した結果である。正規性と等分散性を検定した結果、Kolmogorov-Smirnov の検定により正規性は仮定できたが (OCHD 条件: $p = .05$; 視覚条件: $p = .12$; 直接駆動条件: $p = .05$), Levene の検定の結果等分散性は仮定できないことがわかった ($p = .01$)。このため、ノンパラメトリック法である Friedman 検定を行った。最大目標値ごとに多重比較をした結果、視覚条件と直接駆動条件の間に有意差がみられた ($f_1: p < .01$; $f_2: p < .05$; $f_3: p < 0.01$)。また、 $f_1 = 21N$ 及び $f_3 = 38N$ において、視覚条件と OCHD 条件の間に有意差がみられた (それぞれ $p < .05$; $p < .05$)が、 $f_2 = 29.5N$ においては認められなかった ($p = .2$)。OCHD 条件と直接駆動条件の間に有意差は認められなかった ($f_1: p = 1.0$; $f_2: p = .95$; $f_3: p = 1.0$)。

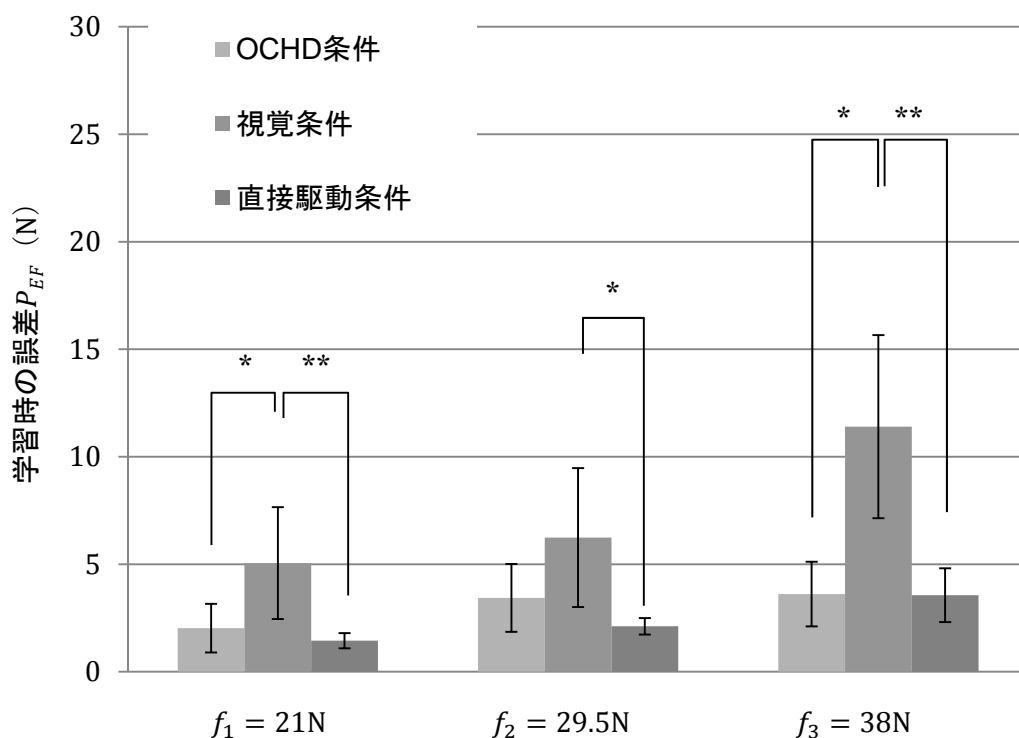


図 5-15 学習時の誤差 P_{EF} (* : $p < .05$; ** : $p < .01$)

5.4.5 再現時の喉頭鏡に加えた力の誤差 F_e

図 5-16 は再現時に被験者が喉頭鏡に加えた力の誤差を比較した結果である。正規性と等分散性を検定した結果、Kolmogorov-Smirnov の検定により正規性 (OCHD 条件: $p = .03$; 視覚条件: $p = .2$; 直接駆動条件: $p < .2$) が仮定できないこと、また Levene の検定の結果、等分散性は仮定できないことがわかった ($p < .001$)。このため、ノンパラメトリック法である Friedman 検定を行った。最大目標値ごとに多重比較をした結果、視覚条件と直接駆動条件の間に有意差がみられた (f_1 : $p < .01$; f_2 : $p < .05$; f_3 : $p < .01$)。 $f_1 = 21N$ 及び $f_3 = 38N$ において、OCHD 条件と直接駆動条件の間に有意差がみられた (それぞれ $p < .01$) が、 $f_2 = 29.5N$ においては認められなかった ($p = .19$)。また、 $f_1 = 21N$ において、OCHD 条件と視覚条件の間に有意傾向がみられた ($p < .1$) が、 $f_2 = 29.5N$ および $f_3 = 38N$ においては認められなかった (それぞれ f_2 : $p = .19$; f_3 : $p = .63$)。視覚条件と直接駆動条件の間に有意差は認められなかった (f_1 : $p = 1.0$; f_2 : $p = .19$; f_3 : $p = .13$)。

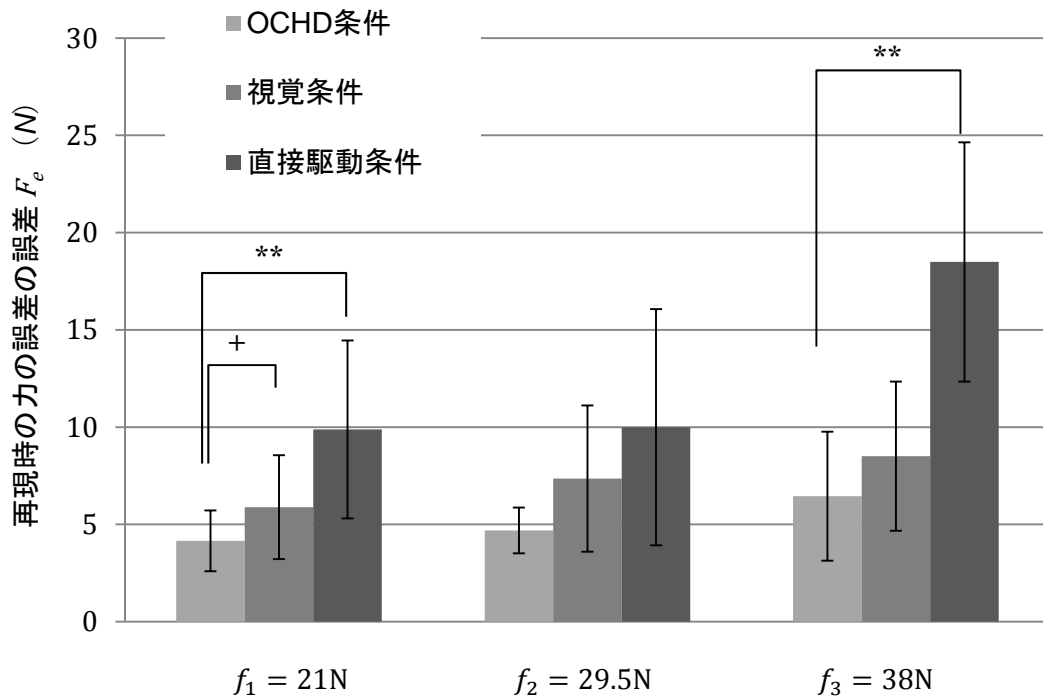


図 5-16 再現時の喉頭鏡に加えた力の誤差 (F_e) (+ : $p < .1$; ** : $p < .01$)

5.4.6 再現時の喉頭鏡回転角度の誤差 θ_e

図 5-17 は再現時に被験者が操作した喉頭鏡の回転角度の誤差を比較した結果である。正規性と等分散性を検定した結果、Kolmogorov-Smirnov の検定により正規性 (OCHD 条件: $p = .2$; 視覚条件: $p = .2$; 直接駆動条件: $p = .2$) が認められ、また Levene の検定の結果、等分散性が ($p = .7$) 認められた。二元配置分散分析の結果、学習条件の要因に主効果がみられた ($F(2, 72) = 5.01, p < .005$) が、最大目標値の要因にはみられなかった ($F(2, 72) = 0.69, p = .5$)。また、これらの要因間に交互作用はみられなかった ($F(4, 72) = .54, p = .71$)。そこで Bonferroni の多重比較をおこなった結果、OCHD 条件と視覚条件の間および、視覚条件と直接駆動条件の間に有意差および有意傾向が認められた (それぞれ $p < 0.05, p < 0.1$)。しかし、OCHD 条件と直接駆動条件の間に有意差は認められなかった。

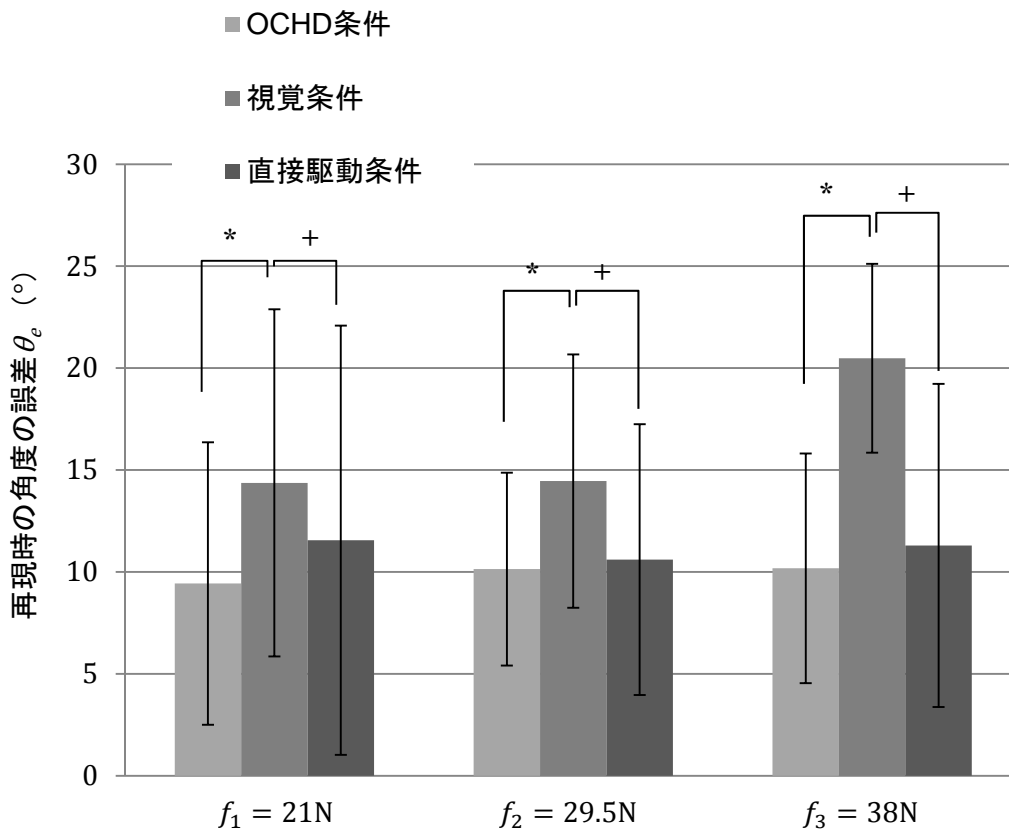


図 5-17 再現時の喉頭鏡回転角度の誤差 (θ_e) (+ : $p < .1$; * : $p < .05$)

5.4.7 再現時の誤差 P_{EF} の比較

図 5-18 は、被験者が学習した動作を再現した時の、 P_{EF} を比較した結果である。分散分析前提条件の検討結果、Kolmogorov-Smirnov の検定により正規性 (OCHD 条件: $p = .2$; 視覚条件: $p = .13$; 直接駆動条件: $p = .2$) および、Levene の検定により等分散性 ($p = .55$) が認められた。

二元配置分散分析の結果、学習条件の要因と最大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 ($F(4, 72) = 1.07, p = .379$)。Bonferroni 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 $p < 0.05, p < 0.01, p < 0.01$)。また、最大目標値については、 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 $p < .001, p < .001$)。

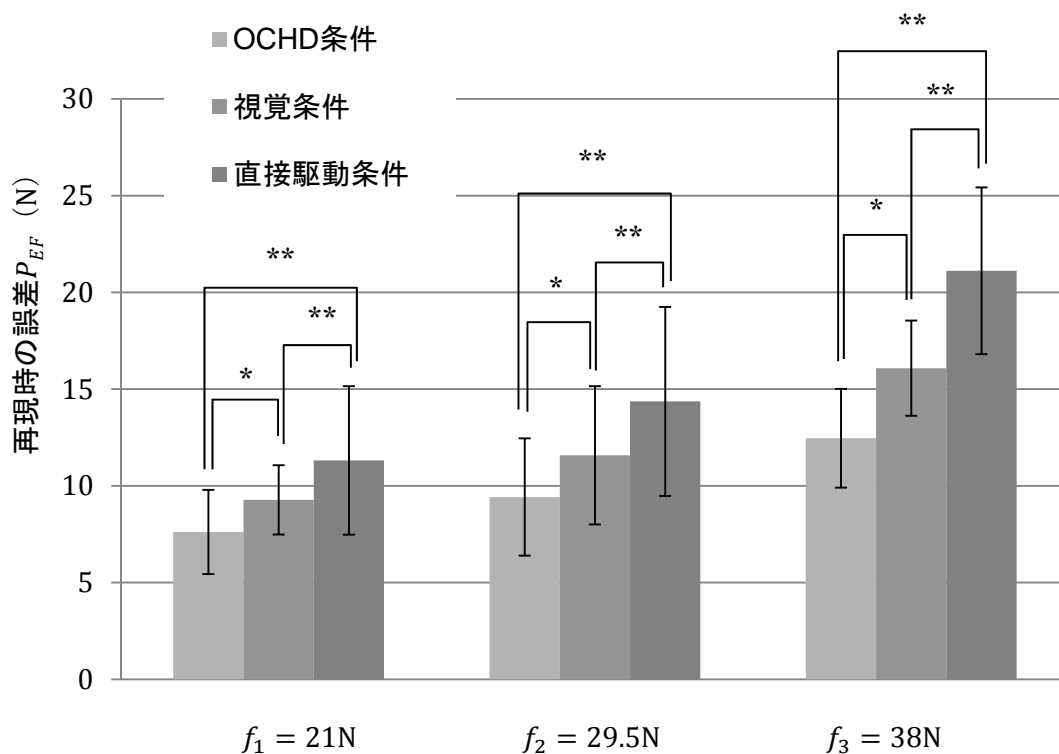


図 5-18 再現時の誤差 P_{EF} (* : $p<.05$; ** : $p<.01$)

5.5 考察

5.5.1 学習時に被験者が喉頭鏡に加えた力の大きさ F_{sub}

5.4.1 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、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、喉頭鏡モデルを把持する掌では、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、結果として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。

5.5.2 学習時の誤差 F_e , θ_e と P_{EF}

5.4.2, 5.4.3 と 5.4.4 の結果から, 直接駆動条件の場合は, 喉頭鏡操作の力と回転角度の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 F_e , θ_e が小さくなるのは当然である. これによって, 直接駆動条件の P_{EF} は他の条件よりも小さくなった. これに対して OCHD 条件の場合は, θ_e が直接駆動条件と差がみられなかったことは興味深い. F_e は直接駆動条件と差がみられたが, 喉頭鏡の回転角度の誤差も考慮されている P_{EF} は, 差がみられなかった. このことから, 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, 角度について, 目標値に近い値を被験者が出すことができていることがわかる. また, 本実験では, 被験者が装置の動作を確認できるようにした. すなわち, 被験者は OCHD に提示されていた触力覚だけでなく OCHD が動く視覚情報も得ることができたことから, 誘導方向を知覚しやすくなり, 結果として誤差が小さくなったと考えられる.

一方, 視覚条件の場合は, θ_e が他の条件よりも大きいことが分かった. 学習時に喉頭鏡に加えた力の大きさ F_{sub} は OCHD 条件と有意差がなく, 標準偏差は最も小さいために, 学習効果が高いように見えるが, P_{EF} は他の条件よりも大きかった. これは, F_{sub} の計算には力の方向と喉頭鏡の回転角度を考慮していなかったが, P_{EF} の計算には力の方向と角度の誤差が考慮されていたことに起因すると考えられる. Koritnik ら[Koritnik 10]の研究では, ある一定の運動で脚を動かすタスクを被験者に課した場合, 視覚フィードバックを与える場合よりも, 脚に触力覚フィードバックを与える方が, 被験者が実際に曲げた股関節角度と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, 喉頭鏡の三次元的な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.

5.5.3 再現時の誤差 F_e , θ_e と P_{EF}

5.4.5, 5.4.6 と 5.4.7 の結果から, 動作を再現する場合に, 直接駆動条件では, θ_e は OCHD 条件と差がなく, 視覚条件よりも小さいことがわかる. しかし, 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, 被験者は喉頭鏡モデル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ったと考えられる. このため, 再現時の F_e が大きくなった. また, 第2章に述べたように, 力覚受容器により学習者は自分の手の動きを知覚できても, 学習者は能動的に道具を動かしていなかったため, 力に関する学習効果の向上にはつながらなかった.

視覚条件の場合, 学習時の F_e は直接駆動条件と比較して大きかったが, 学習者に視覚情報に従って喉頭鏡モデルを動かさせることができたため, 再現時の F_e は小さかった. しかし, 上に述べたように, 学習者が喉頭鏡の三次元的な視覚情報を理解することが難しかったため, 再現時の θ_e と P_{EF} は他の条件よりも大きかったと考えられる.

5.6 本章のまとめ

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。OCHD を利用した場合の学習効果を確認するため、視覚情報による誘導および喉頭鏡の直接駆動による誘導と提案手法による誘導を比較する実験を行った。実験では、学習者に喉頭展開を模擬した動作を学習させた後、この動作を再現させた。直接駆動条件と OCHD 条件では、動作を再生するために、マスタスレーブ方式を用いた。評価指標として、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、学習時および再現時の力の誤差 (F_e)、角度の誤差 (θ_e) 操作の誤差 (P_{EF}) の値を用いた。操作の誤差 (P_{EF}) の値は、動作の時間、喉頭鏡に加える力大きさと方向の誤差及び喉頭鏡回転角度の誤差すべてが考慮されるように定義した。

表 5-1 学習効果の比較に関する実験結果一覧

	学習中に被験者が出した力	学習時の誤差			再現時の誤差		
	F_{sub}	F_e	θ_e	P_{EF}	F_e	θ_e	P_{EF}
視覚条件	大	中	大	大	小	大	中
直接駆動条件	小	小	小	小	大	小	大
OCHD 条件	大	中	小	小	小	小	小

本実験の結果を表 5.1 にまとめる。この表に示すように、直接駆動方式では、道具を動かすための力の大部分がマニピュレータによって出されており、学習効果は大きくはなかった。視覚条件の場合、学習者は視覚情報による誘導にしがって、道具を動かすことができたため、直接駆動条件よりも動作を正しく再現できた。しかし、学習時の誤差は他の条件よりも大きかったため、OCHD 条件より正しく再現できなかった。OCHD 条件の場合、OCHD を利用することで、学習時に被験者が誘導されている動作に対して、能動的かつ正確に操作することが可能となり、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。

第6章

考察

本研究では、喉頭展開のように強い力で道具を把持することが必要となる作業を対象とし、学習者が把持している道具を直接駆動して誘導する方法において生じる、ウェーバーの法則に起因した問題および学習の能動性に関する問題の解決を目的とした。具体的には、道具を直接駆動するのではなく、喉頭鏡を操作する際に力が加えられていない手の甲側の皮膚に触力覚を提示する手法を提案し、外装型触力覚提示装置（OCHD）を開発した。OCHDは学習者の手の甲側に皮膚せん断変形感覚を与えて誘導するため、小さな力でも学習者に知覚できると期待した。また、学習者がこの感覚に従って能動的に道具を動かすため、学習効果が高くなると考えた。

本手法により上記の問題を解決できるかどうか、その有効性を確認する刺激閾実験および学習効果に関する実験を行った。その結果に基づいて、提案手法の有効性について考察する。

6.1 刺激閾の低減と装置の安全性

刺激閾実験の結果、道具を直接駆動する方式では、ウェーバーの法則に従って、学習者が道具を把持する握力が強くなるほど、刺激閾は大きくなった。すなわち、道具を強く把持する場合、誘導力を感じさせるためには、高出力のアクチュエータが必要となることがわかった。それに対して提案手法では、手の外側に皮膚せん断変形を与えて誘導するようにしたため、学習者が道具を把持する握力が強くなっても、刺激閾はほぼ一定であった。すなわち、低出力のアクチュエータでも、十分な誘導力を学習者に知覚させることが可能となることがわかった。以上より、提案手法を利用することで、ウェーバーの法則に起因した問題を解決できる上、アクチュエータの低出力化によって、装置の危険性を減少させることが可能であることがわかった。

6.2 能動的な学習による有効性

第5章に述べたように、OCHD を利用することで、学習者に能動的に学習させることが可能となり、その結果、喉頭鏡を直接アクチュエータで駆動する方法やモニタに表示された視覚情報によってフィードバックする方法に比べ、道具の操作に必要な力と回転角度を正確に学習できることが明らかとなった。以上より、提案手法を利用することで、学習における能動性に関する問題を解決できると考えられる。

6.3 他分野への応用

OCHD は、手の外側から誘導するため、道具にアクチュエータを取り付ける必要が無い。従って、喉頭展開以外にも、医療、工業、伝統技能などにおける多様な手技訓練にも貢献できると期待できる。以下に各分野における作業の例を列挙する。

医療：内視鏡操作，手術

工業：鋳造作業，クレーン操作

伝統技能：書道，彫刻

以上の手技訓練以外にも、スポーツ訓練やリハビリテーションなどにも貢献できると考えられる。例えば、バーチャルリアリティを活用したスポーツ訓練として、モニタに表示されているテニスボールまたはバドミントンのシャトルの動きに対して、ラケットのグリップを把持している学習者の手に OCHD を被せて誘導し、ラケットを正しい向き、力で動かすように学習させることや、リハビリテーションの場合では、患者の手を目標の角度に繰り返し誘導することができると期待する。

6.4 本実験と実際の喉頭展開手技訓練の相違点

実験の結果、提案手法は喉頭展開のような強い力が必要となる作業訓練に、有効であることが分かった。ただし、第4章に述べた刺激閾の測定実験では pitch 回転の方向のみしか、効果を検証していない。また、学習効果の実験においても4章と同様、限られた動作のみでしかその効果を確認していない。実際の喉頭展開などの手技訓練では道具を様々な方向に回転や並進させる6自由度の動作が必要となるため、OCHDは他の5方向についても効果的に触力覚を提示できるように改良されなければならない。OCHDをより広く応用できるように、様々な作業において検討し、必要に応じて機構を改良することが必要である。

一方、本実験での力覚提示方向には、気管挿管において最も重要だと考えた道具を把持したときに生じる反力と同じ方向である pitch 方向のみに限定した。これに対して、yaw 方向（ハンドル軸の周りの回転）のような、道具を把持したときに生じる反力の方向と一致しない場合について、提案手法が有効かどうかは確認していない。これについては今後、提案手法を他の訓練に応用する際に検討する必要がある。

第7章

結論

7.1 まとめ

触力覚を用いた従来の手技訓練手法では、道具を直接駆動する方式を採用していた。しかし道具を強く握らなければならない主義に対してこの手法を用いると、ウェーバーの法則に起因した問題、および訓練における能動性に関する問題が生じる。そこで本論文では、道具を直接駆動するのではなく、学習者の手の外側に触力覚を与えて誘導するために、外装型触力覚提示装置（OCHD: Outer-Covering Haptic Display）を提案した。

OCHD では、手の外側に皮膚せん断変形を与えて誘導力を提示することとした。また、学習者の手の外側に誘導力を提示して学習者がその感覚によって道具を動かすことによって、能動的に学習できるようにした。

本研究では、OCHD の有効性を示すために、2つの実験を行った。まず、道具を強く把持している場合でも OCHD を利用することによって、比較的小さな力で誘導方向を知覚させられることを証明するために、刺激閾の比較実験を行った。実験では、pitch 回転の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、喉頭鏡を把持している学

習者の掌に力を提示した場合は、喉頭鏡を握る強さに比例して刺激閾が大きくなったのに対して、OCHD を利用した場合は、把持する強さにかかわらず刺激閾はほぼ一定であった。これによって、提案手法を利用することで、直接駆動する方式よりも小さい力で誘導方向を知覚させられることが確認できた。すなわち、提案手法を利用することで、ウェーバーの法則に起因した問題を解決できることが分かった。

次に、提案手法の学習効果を確認するため、OCHD 方式と従来の手法と比較する実験を行った。実験では、喉頭展開を模擬した動作の学習に対して、視覚的情報提示によって誘導する手法（視覚条件）、アクチュエータで喉頭鏡を直接駆動することによって誘導する手法（直接駆動条件）、そして OCHD による誘導する手法（OCHD 条件）を比較した。その結果、OCHD 条件では力と回転角度の学習において、従来の手法よりも少ない誤差で学習できることが示された。

以上の2つの実験から、本研究が提案する OCHD 方式は従来の方式よりも装置の小型化、学習の早さの点で優れている可能性を示すことができた。

7.2 OCHD のウェアラブル化と将来の展望

第3章に述べたように、現状では学習者の手を誘導するために、接地型の6自由マニピュレータが必要となる（図 3-12）。しかし、喉頭展開のような広い空間が必要となる作業の場合、マニピュレータのアームを長くすることになる。すると、装置の小型化には限界がある。よって、提案手法によりウェーバーの法則に起因した問題を解決できても、大型のマニピュレータを利用するため、実用的であるとは言いがたい。このため、前腕に感覚提示機構を装着できるように、OCHD のウェアラブル化について検討した。また、新たなウェアラブル装置では、より実用性の高いシステムの実現のために、pitch 回転の方向以外にも、小さな力で提示できるようにしなければならない。

この2つの課題に対し、まずは2個のボールエフェクタを利用して、各ボールによる皮膚せん断変形を提示できるウェアラブル OCHD (wOCHD) を開発している（図 7-1）。

このウェアラブル提示装置では、まず、2個のボールによる皮膚せん断変形を併用することで、4方向（図 7-2）に提示が可能かどうかを確認する。そして、将来的にはボールエフェクタの数を増やして、より多方向に提示できるように発展させる。

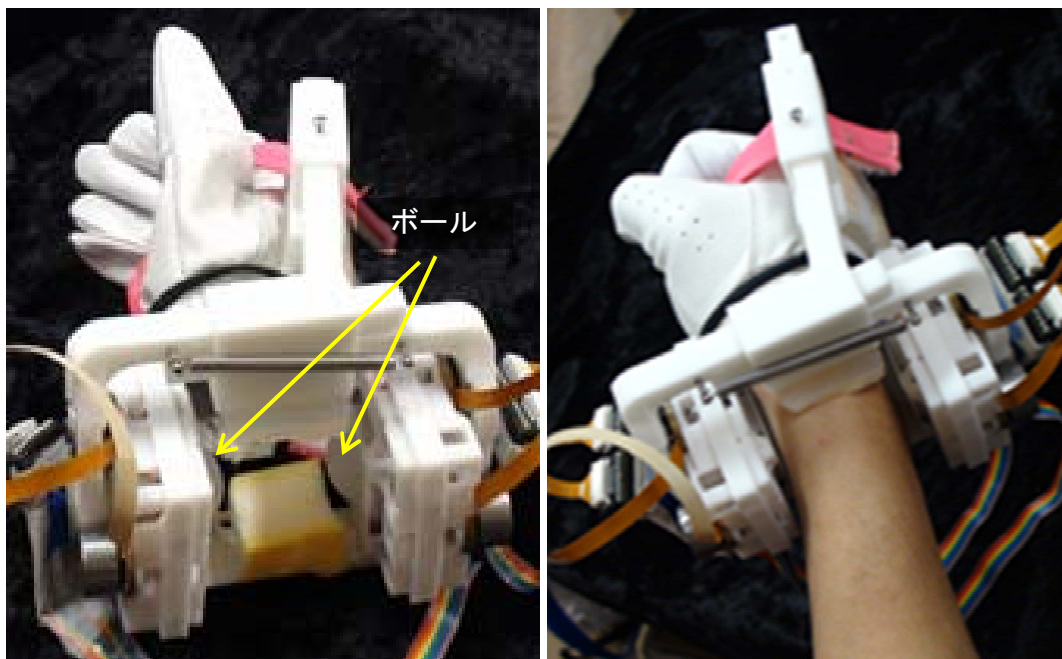


図 7-1 wOCHD (左), wOCHD を装着した様子 (右)

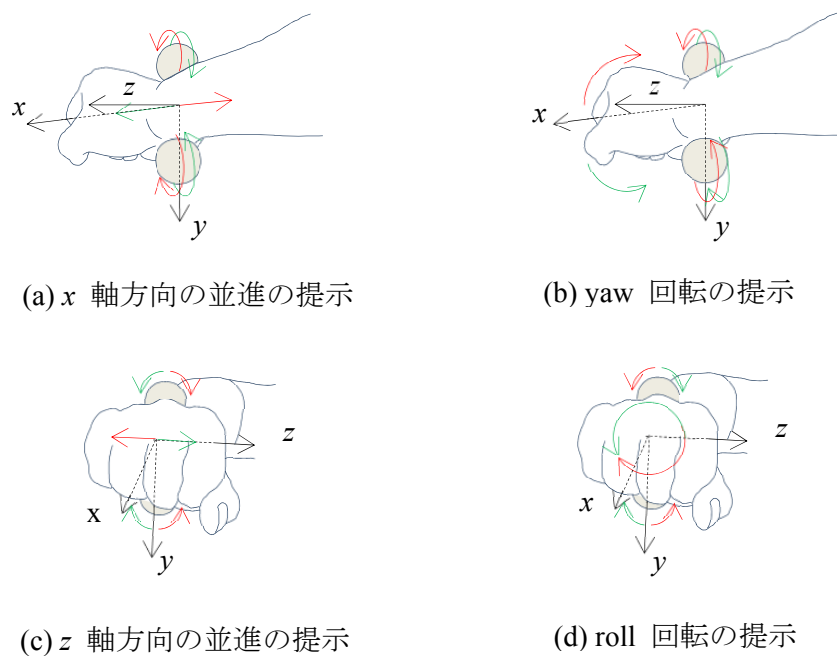


図 7-2 x , yaw, z , roll を提示するときのボールエフェクタの回転方向

謝辞

本研究の成果は、決して筆者個人でなし得たものではなく、多くの方々からいただいたご指導、ご助言、ご協力、ご支援によるものです。皆様に、心から感謝の意を示したいと思います。

はじめに、本研究を進めるにあたり、懇切丁寧にご指導いただいた、筑波大学大学院システム情報系教授 葛岡英明先生に、厚く御礼申し上げます。ご指導頂いた学部時代から博士後期課程までの6年間の中で、研究の進め方や論文執筆、研究発表などについて、厳しくも的確なご指導をいただきました。また、日々の研究生活など、様々な研究活動のノウハウを学ぶことができました。重ねて御礼申し上げます。

大変お忙しい中、多くご助言をいただきました、筑波大学大学院システム情報系准教授 矢野博明先生、名古屋大学大学院工学研究科教授 長谷川泰久先生にも心からお礼申し上げます。先生方には、実験計画や実験装置の開発にあたって、ご指導いただきました。

本論文の審査をしてくださり、貴重なご意見やご指摘をいただきました、筑波大学大学院システム情報系 教授中内靖先生、筑波大学大学院システム情報系教授 田中二郎先生、筑波大学大学院システム情報系 准教授 望山洋にも感謝申し上げます。

本研究に関して医学的な視点からご指導やご助言をいただきました、東京医科大学救急医学東京医科大学八王子医療センター救命救急センター教授太田祥一先生、帝京大学救急救命センター教授 竹内保男先生にも深く感謝申し上げます。

論文執筆に当たり、ご多忙の中、度重なるご助言や議論そして日本語のご修正にお時間をさいていただいた、筑波大学大学院システム情報系助教 大槻麻衣先生にも、感謝の意を表します。

本研究に関してご助言をいただきました，NTT コミュニケーション科学基礎研究所 研究主任 山下直美様，筑波大学大学院システム情報系講師 山下淳先生にも，感謝申し上げます．

本研究にご協力頂き，実験に参加していただいた筑波大学大学院システム情報工学 研究科グループウェア研究室の皆様，実世界指向インタラクション研究室の皆様，筑波大学大学院におけるカンボジアからの留学生の皆様にも深く御礼申し上げます．

最後に，研究生生活をささえてくれた父，母には心より感謝申し上げます．

参考文献

[Achim 07] Achim V.G., Holger H., Peter P., Volker D., Volker W.: Field Airway Management Disasters, International Anesthesia Research, Vol. 104, No. 3, pp. 481-483, 2007

[Amemiya 08] Amemiya, T., Ando, H. and Maeda, T.: Lead-Me Interface for a Pulling Sensation from Hand-held Devices, ACM Transactions on Applied Perception, Vol. 5, No. 3, Article 15, 2008

[青山 04] 青山和義: 必ずうまくいく！ 気管挿管, 羊土社, 2004

[Ayoub 10] Ayoub, C.M., Kanazi, G.E., Al, A.A., Rameh, C., and El-Khatib, M.: Tracheal Intubation Following Training with the GlideScope Compared to Direct Laryngoscopy, Anaesthesia, Vol.65, No.7, pp: 674-678, 2010

[Bark 08] Bark, K., Wheeler, J.W., Premakumar, S., Cutkosky, M.R.: Comparison of Skin Stretch and Vibrotactile Stimulation for Feedback of Proprioceptive Information, proc. of IEEE VR haptic symposium, pp: 71-78, 2008

[Bark 09] Bark, K., Wheeler, J., Lee, G. and Savall, J.: A Wearable Skin Stretch Device for Haptic Feedback, Proc. of World Haptics Conference, pp: 464-469, 2009

[Beets 12] Beets, I.A.M., Mace, M., Meesen, R.L.J., Cuypers, K., Levin, O and Swinnen, S.P.: Active versus Passive Training of a Complex Bimanual Task: Is Prescriptive Proprioceptive Information Sufficient of Inducing Motor Learning?, PloS ONE, Vol. 7, No. 5, e37687, 2012

[Biggs 02] Biggs, J. and Srinivasan M.: Tangential Versus Normal Displacements of Skin:

Relative Effectiveness for Producing Tactile Sensations, Proc. of 10th Symp. Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp: 121-128, 2002

[Bluteau 08] Bluteau, J., Coquillart, S., Payan, Y. and Gentaz, E.: Haptic Guidance Improves the Visuo-Manual Tracking of Trajectories, PloS ONE, Vol.3, No.3, e1775, 2008

[Bucx 92] Bucx, M.J., Van-Geel, R.T., Scheck, P.A., Stijnen, T., Erdmann, W.: 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

[Bucx 94] Bucx, M.J., Van-Geel, R.T., Meursing A.E., Stijnen, T., Check, P. A.: 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

[Cornsweet 62] Cornsweet, T.N.: The staircase method in psychophysics, American Journal of Psychology, Vol. 75, pp: 485-491, 1962

[Dahiya 10] Dahiya, R.S., Metta, G., Valle, M. and Sandini, G.: Tactile sensing - from humans to humanoids. Proc. of IEEE Transactions on Robotics, Vol. 26, No. 1, pp: 1-20, 2010

[DangXiao 09] DangXiao, W., YuRu, Z., Yong, W., PeiJun, L., RenGe, Z. and WanLin, Z.: Haptic rendering for dental training system, Sci China Ser F-Inf Sci, Vol. 52, No. 3, pp: 529-546, 2009

[David 02] David F., Madeleine K., Frank T.: Haptic Guidance: Experimental Evaluation of a Haptic Training Method for a Perceptual Motor Skill, Proc. of the 10th Symp. On Haptic Interfaces For Virtual Envir. & Teleoperator Systs. (HAPTICS.02)

[Edin 04] Edin, B.: Quantitative Analyses of Dynamic Strain Sensitivity in Human Skin Mechanoreceptors, Neurophysiology, Vol. 92, pp: 3233-3243, 2004

[Feygin 02] Feygin, D., Keehner, M. and Tendick, R.: Haptic guidance: experimental evaluation of a haptic training method for a perceptual motor skill. In proceedings of 10th Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp: 40-47, 2002

[Gilman 02] Gilman, S.: Joint Position Sense and Vibration Sense: Anatomical Organisation and Assessment, Neurology Neurosurgery and Psychiatry, Vol. 73, pp: 473-477, 2002

[Givol 04] Givol, N., Gershantsky, Y., Halamish-Shani, T., Taicher, S., Perel, A., Segal, E.: Perianesthetic dental injuries: analysis of incident reports, Journal of Clinical Anesthesia, Vol.16, No.3, pp: 173-176, 2004

[Grigg 96] Grigg, P.: Stretch Sensitivity of Mechanoreceptor Neurons in Rat Hairy Skin, J. Neurophysiology, vol. 76, no. 5, pp. 2886-2895, 1996

[Hagberg 05] Hagberg C., Georgi R and Krier C.: Complications of managing the airway, Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology, Vol. 19, No. 4, pp. 641–659, 2005

[Hasegawa 11] Hasegawa, Y., Oura, S.: Exoskeletal Meal Assistance System (EMAS II) for Progressive Muscle Dystrophy Patient, Proc. of IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), pp: 725-730, 2011

[Hashemi 07] 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

[Hastings 96] 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

[東山 00] 東山篤規, 宮岡徹, 谷口俊治, 佐藤愛子: 触覚と痛み, ブレーン出版, 東京都千代田区猿樂町 1-3-1, 2000

[岩村 01] 岩村 吉晃: 神経心理学コレクションタッチ, 第1版, 医学書院, 2001

[Johansson 79] Johansson, R. S., Vallbo, A. B.: Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin, J. Physiology, 286, pp: 283-300, 1979

[Jones 06] Jones, L.A. and Lederman, S.J.: Human Hand Function, Oxford university Press USA, Oxford, 2006

[Khalsa 98] Khalsa, P.S., Friendman, R.M., Srinivasan, M.A. and Lamotte, R.H.: Encoding of Shape and Orientation of Objects Indented Into the Monkey Fingerpad by Populations of Slowly and Rapidly Adapting Mechanoreceptors, Journal of Neurophysiology Vol. 79 No. 6, pp: 3238-3251, 1998

[Kapur 10] Pulkit, K., Mallory, J., Laurel J., Buxbaum, Steven A., Jax, S.A. and Katherine K.J.: Spatially distributed tactile feedback for kinesthetic motion guidance, Proc. of IEEE Haptics Symposium, pp: 519-526, 2010

[Konrad 98] 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

[Kopacz 96] 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

[Koritnik 10] Koritnik, T., Koenig, A., Bajd, T., Riener, R. and Munih, M.: Comparison of visual and haptic feedback during training of lower extremities, Gait Posture, Vol. 32, No. 4, pp: 540-546, 2010

[昆陽 12] 昆陽雅司, 岡本正吾: 振動刺激を用いた疑似力覚提示, 日本ロボット学会誌, Vol. 30, No. 5, pp: 475-477, 2012

[Kumagai 08] Kumagai, T., Yamashita, J., Morikawa, O., Yokoyama, K., Fujimaki, S., Konishi, T., Ishimasa, H., Murata, H., Tomoda, K.: Distance Education System for Teaching Manual Skills in Endoscopic Paranasal Sinus Surgery Using “HyperMirror” Telecommunication Interface, virtual reality conference, pp: 233-236, 2008.

[Kuniyasu 11] Kuniyasu, Y., Fukushima, S., Furukawa, M., and Kajimoto, H.: Weight Illusion by Tangential Deformation of Forearm Skin, Proc. AH 2011, ACM Press (2011), Article No. 10, 2011

[Kuniyasu 12] Kuniyasu, Y., Sato, M., Fukushima, S., Kajimoto, H.: Transmission of Forearm Motion by Tangential Deformation of the Skin, Proc. of Augmented Human International Conference (AH'12), Article No. 6, 2012

[Kuzuoka 08] Kuzuoka, H., Yamaoka, M., Yamashita, J.: Tracheal Intubation Instruction using Operation Sharing Mechanism, Proc. of ASIAGRAPH, pp: 168-171, 2008

[Letier 08] Letier, P., Avraam, M., Veillerette, S and Horodinca, M.: SAM: A 7-DOF portable arm exoskeleton with local joint control, Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'08), pp: 3501-3506, 2008

[Levitt 70] Levitt, H.: Transformed Up-Down Methods in Psychoacoustics, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 33, pp: 467-476, 1970

[Lindeman 04] Lindeman, R.W., Sibert, J. L., Lathan, C. E. and Vice, J. M.: The Design and Deployment of a Wearable Vibrotactile Feedback System, Proc. of 8th IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC'04), pp: 56-59, 2004

[Lockhart 86] Lockhart, P.B., Feldbau, E.V., Gabel, R.A., Connolly, S.F. and Silversin J.B.:

Dental Complications During and After Tracheal Intubation, JADA, Vol. 112, pp: 480-83, 1986

[Mayrose 03] Mayrose, J., Kesavadas, T., Chugh, K., Joshi, D. and Ellis, D.G.: Utilization of virtual reality for endotracheal intubation training, Resuscitation, Vol. 59, p: 133-138, 2003

[McCloskey 78] McCloskey, D.I.: Kinesthetic sensibility, Physiological reviews, Vol. 58, pp: 763-820

[Morley 98] Morley, J.W.: Neural Aspects of Tactile Sensation, The Netherlands: Elsevier science B. V, pp: 89-130, 1998

[Nakamura 14] Nakamura, T., Nishimura, N., Sato, M., and Kajimoto, H.: Application of Hanger Reflex to wrist and waist, Proc. of IEEE Virtual Reality (VR 2014), pp: 181-182, 2014

[Noh 08] Noh, Y., Segawa, M., Shimomura, A., Ishii, H., Solis, J., Hatake, K and Takanishi, A.: WKA-1R Robot assisted quantitative assessment of airway management, Int J CARS, Vol.3, No.6, pp: 543-550, 2008

[Nojima 02] Nojima, T., Sekiguchi, D., Inami, M. and Tachi, S., The SmartTool: A system for augmented reality of haptics, Proc. of IEEE Virtual Reality, pp: 67-72, 2002

[野嶋 02] 野嶋琢也, 関口大陸, 稲見昌彦, 舘暲: 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, pp: 193-199, 2002

[Olausson 00] Olausson, H.: Tactile Directional Sensibility: Peripheral Neural Mechanisms in Man, Brain Research, Vol. 866, nos. 1/2, pp: 178-187, 2000

[大山 94] 大山正, 今井省吾, 和気典二: 感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書房出版, 東京都文京区大塚 3-20-6, 1994

[Palluel-Germain 07] Palluel-Germain, R., Bara, F., de Boisferon, A.H., Hennion, B., Gouagout, P. and Gentaz, E.: A Visuo-haptic device - Telemaque - increases kindergarten children's handwriting acquisition, Proc. of IEEE World Haptics 2007, pp: 72-77, 2007

[Piateski 05] Erin, P. and Lynette J.: Vibrotactile Pattern Recognition on the Arm and Torso, Proc. of Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'05), pp: 90-95, 2005

[Portillo 05] Portillo, O., Avizzano, C.A., Raspolli, M. and Bergamasco, M.: Haptic Desktop for Assisted Handwriting and Drawing, Proc. of IEEE international Workshop ROMAN 2005, pp: 512-517, 2005

- [Roberts 06] 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
- [Rocon 07] Rocon, E., Manto, M., Pons, J., Camut, S., and Belda, J. M.: Mechanical suppression of essential tremor, The Cerebellum, Vol. 6, No. 1, pp: 73-78, 2007
- [Ruch 60] Ruch, T.C. and Fulton, J.F.: Somatic sensation, Medical physiology and biophysics, Chapter 13, pp: 300-322, 1960
- [嵯峨 05] 嵯峨智, 川上直樹, 舘暲: 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, pp: 363-369, 2005
- [坂口 08] 坂口他: 受動的力覚提示法の検討, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 2P2-E17, 2008
- [Sakai 03] Sakai, M., Fukui, Y., Nakamura, N.: Effective Output Patterns for Torque Display “GyroCube”, Proc. of International Conference on Artificial Reality and Telexistence, Vol.13, pp: 160-165, 2003
- [佐藤 08] 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
- [下条 14] 下条誠, 前野隆司, 篠田裕之, 佐野明人: 触覚認識メカニズムと応用技術-触覚センサ・触覚ディスプレイ-, S&T 出版社, 東京都千代田区西神田 2-5-8, 第 1 章, 2014
- [Sherrington 1906] Sherrington, C.S.: the integrative action of the nervous system, New Heaven, Yale University Press, 1906
- [Srimathveeravalli 05] Srimathveeravalli, G. and Thenkurussi, K.: Motor skill training assistance using haptic attributes. In proceedings of Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp: 452-457, 2005
- [鈴木 05] 鈴木祐一, 井口寧, 堀口進: 力触覚提示装置を用いた書道用筆モデルの手案, TVRSJ, Vol.10, No.4, pp: 573-580, 2005
- [Tanaka 01] Tanaka, Y., Masataka, S., Yuka, K., Fukui, Y., Yamashita, J and Nakamura, N.: Mobile Torque Display and Haptic Characteristics of Human Palm, ICAT 2001, pp: 115-120, 2011

[Teo 02] 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

[Theron 10] Theron, A., Williams, D., Rawat, S., Oliver, M., Dingley, J.: 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

[Van 07] Van, Z.A., Stessel, B., De, R.F., Giebelen, D., Weber, E.: Video-assisted Laryngoscopy a useful adjunct in endotracheal intubation, Acta Anaesthesiol Belg, Vol.58, No.2, pp: 129-131, 2007

[Wang 05] Wang, H.E., Seitz, S.R., Hostler, D., Yealy, D.M.: Defining the learning curve for paramedic student endotracheal intubation. Prehospital Emergency Care, Vol.9, No.2, pp: 156-162, 2005

[Watanuki 07] Watanuki, K. and Kojima, K.: Knowledge Acquisition and Job Training for Advanced Technical Skills Using Immersive Virtual Environment, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.1, No.1, pp: 48-57, 2007

[Weber 78] Weber, E.H.: The sense of touch, Academic Press, pp: 139-264, 1978

[Wong 11] Wong, W., Kedarisetty, S., Delson, N., Glaser, D., Moitoza, J., Davis, D and Hastings, R: 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, 2011

[Xing 08] Xing-Dong, Y., Walter F.B. and Pierre B.: Validating the Performance of Haptic Motor Skill Training, Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems, pp: 129-135, 2008

[吉江 02] 吉江将之, 矢野博明, 岩田洋夫: ジャイロモーメントを用いた力覚提示装置, TVRSJ, Vol.7 No.3, pp: 20-24, 2002

研究業績一覧

a. 査読付雑誌論文

- [1] ヤエムヴィボル, 葛岡英明, 山下直美, 太田祥一, 竹内保男, 外装型触力覚提示装置を用いた技能教育手法に関する研究, バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌, Vol. 15, No. 2, pp.11-20, 2013年10月
- [2] ヤエムヴィボル, 葛岡英明, 矢野博明, 渋谷良太, 山下淳, 太田祥一, 竹内保男, 気管挿管教育のための外装型力覚提示装置の提案, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 4, pp. 597-605, 2011年12月

b. 査読付国際会議論文

- [1] Vibol Yem, Mai Otsuki, and Hideaki Kuzuoka, Development of Wearable Outer-Covering Haptic Display using Ball-Effector for Hand Motion Guidance, Proc. of Asia Haptics, Tsukuba, Japan, Article No. 143, November 2014
- [2] Vibol Yem, Hideaki Kuzuoka, Naomi Yamashita, Shoichi Ohta and Yasuo Takeuchi, Hand-Skill Learning using Outer-Covering Haptic Display, Proc. of Eurohaptics 2014, Versailles, France, Part I, pp. 201-207, June 2014
- [3] Vibol Yem, Hideaki Kuzuoka, Naomi Yamashita, Ryota Shibusawa, Hiroaki Yano, Jun Yamashita: Assisting Hand Skill Transfer of Tracheal Intubation Using Outer-Covering Haptic Display, Proc. of ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'12), Texas, USA, pp. 3177-3180, May 2012

c. 査読なし国内会議・報告

- [1] ヤエムヴィボル, 大槻麻衣, 葛岡英明, 矢野博明, 皮膚へのせん断力提示による手の動作制御の研究, 日本バーチャルリアリティ学会研究報告 第4回テレイグジスタンス研究会, Vol. 19, No. TX01, pp. 1-4, 2014年6月
- [2] ヤエムヴィボル, 葛岡英明, 外装型触力覚提示装置を用いた技能教育支援手法の提案, 電子情報通信学会技術研究報告 クラウドネットワークロボット, Vo.113, No.372, pp.7-12, 2013年12月

- [3] YEMVIBOL, 葛岡英明, 山下直美, 太田祥一, 竹内保男, 外装型触力覚提示装置を用いた技能教育手法, 第 18 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp.537-540, 2013 年 9 月
- [4] ヤェムヴィボル, 葛岡英明, 矢野博明, 渋谷良太, 山下淳, 太田祥一, 竹内保男, 気管挿管教育のための外装型力覚提示装置の提案, 第 16 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp.169-172, 2011 年 9 月
- [5] ヤェムヴィボル, 葛岡英明, 山下淳, 動作教示に注目した気管挿管教育支援システムの開発, 第 15 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 460-463, 2010 年 9 月