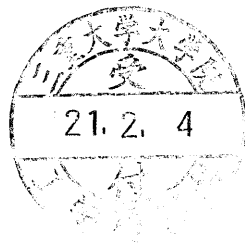


複写可

修士論文

身振り動作学習支援装置の開発に関する研究



指導教員 野村 由司彦教授

平成 20 年度

三重大学大学院工学研究科

博士前期課程 機械工学専攻

伊藤 敬宏

# 目次

1. 序論.....	2
1.1. はじめに.....	2
2. 動作教示手法.....	3
2.1. 既存のシステム.....	3
2.2. 提案する動作教示システム.....	8
3. 動作教示用アクチュエータ.....	9
3.1. クラッチ型拘束装置.....	10
3.1.1. 動作原理及び設計概念.....	10
3.1.2. 拘束力測定実験.....	12
3.2. シリンダ型拘束装置.....	13
3.2.1. 動作原理及び設計概念.....	13
3.2.2. 拘束力測定実験.....	15
4. 動作学習支援装置.....	16
4.1. 構成.....	16
4.2. 関節可動域.....	18
4.3. 姿勢教示実験.....	19
4.3.1. 実験方法.....	19
4.3.2. 実験結果.....	19
4.4. 考察.....	20
5. まとめ.....	21
参考文献.....	22
付録.....	23
動作学習支援装置を用いた動作教示手法の提案.....	23
本システムの構成部品仕様.....	24
謝辞.....	26

# 1. 序論

## 1.1. はじめに

人が水泳や野球などのフォームまたは、踊りやお辞儀などの文化的動作を覚えようとする場合、身体の多数の筋肉を同時に、かつタイミングよく動かす必要がある。そのような技術を修得するためには、熟練者の動きを見本にして、何度も試行錯誤を繰り返すといった、多大な努力を必要とする。また、“歩く”、“投げる”といった基本的な動作であっても、個人の“癖”をなくし、理想的な動作を修得することは容易ではない。そのため、当人だけでそれらの理想の動作を学ぶ事は非常に困難である。

そこで、これらの動作の修得には、インストラクターによる直接指導が一般的であり、有効であると言える。インストラクターによる指導には、様々な方法があり、「実際に動作を行うことで見本を見せる」、「口頭で動きのポイントを伝える」、「手取り足取り教える」などが一般的である。しかし、これらの指導方法では、人の手でを行う以上、せいぜい手や足などの動作を一箇所ずつ、ゆっくり伝えることが精一杯であり、身体各部の筋肉の動かし方を教示することは不可能である。このような背景の下、筆者らは、講師による“手取り足取り”を、ロボットシステムにより再現し、野球の投球動作や、踊りの型、歩行動作などに対して、熟練者の理想的な動作を教示することで、直感的で理解しやすい体験型教育システム、すなわち動作体得を促すメカトロニクスシステムの開発を目的として研究を行ってきた。

人が効果的に動作を学習するためには、講師がリアルタイムに動作の正確性を判断し、必要に応じて動作を矯正するための力を与えることで、生徒が直接正しい型を体得できる学習法が理想的である。このような学習システムを実現するためには、“講師の目”となる動作計測システムおよび、“講師の手足”となる動作教示システムが必要となる。例えば、先に述べたような「実際に動作を行うことで見本を見せる」教示をロボットシステムによって再現する場合、「ディスプレイ上に講師の動きや生徒の動きを表示するシステム」によって行われる。また、「手取り足取り教える」教示の場合は、「動作教示デバイスによる外力や刺激を用いるシステム」によって行われる。いずれにしても動作教示を目的としたシステムであるため、軽量でユーザの動作を阻害せず、ユーザに危険が及ぶことのない安全なシステムが必要となる。

そこで、筆者らは軽量であり、可能な限りユーザの動作を妨げることのない動作教示アクチュエータとして、空気圧を用いた加圧拘束型アクチュエータの開発を行った。また、この加圧拘束型アクチュエータを用いて動作学習支援装置の開発を行った。本論文では、これらの装置を用いた動作教示手法を提案し、その手法の評価を行うことで、本システムによる動作教示の可能性を示す。

## 2. 動作教示手法

講師が生徒に身振り動作を教える場合、生徒の動作を目で見ることで、生徒の動きの正しさを判断する。そして、講師が適切なタイミングにおいて、何らかの方法によって教示情報を与えることによって生徒に対する動作教示が行われる。本システムを開発するに当たり、ロボットが講師のように生徒の動作を判断し、正しい動作を教示するためのシステムが必要不可欠である。本章では、生徒に正しい動作を教示するための動作教示手法について述べる。

### 2.1. 既存のシステム

動作教示システムには、目標となる動作をディスプレイ上に表示することによって視覚情報を用いて動作を教示する手法、または、何らかのアクチュエータを含むシステムを身体に身につけることで触覚情報を用いて動作を教示する手法が一般的である。また、動作教示システムと同様に、身体に対して何らかの外力を与え、身体動作に影響を与える研究としては、動作教示に関する研究の他に、力覚提示に関する研究や、パワーアシストに関する研究があげられる。力覚提示は、触覚に対して刺激を与えることで、現実空間に存在しない物体を、あたかもその場にあるかのように錯覚させるシステムであり、パワーアシストは、アクチュエータを用いて身体動作を補助することによって、重労働による身体への負担を軽減するためのシステムである。以下にこれら類似研究における、代表的な既存システムについて簡単にまとめる。

#### ・ HMD(Head Mounted Display)[1]

使用目的	動作教示
教示デバイス	ディスプレイ
原理	各種センサで計測したユーザの動作と、事前を取得した理想の動作を、装着した HMD に表示することで、それぞれの動作を比較することで動作の修正を行う。
長所	身体に対する拘束は一切なく、動作が妨げられない。
短所	正誤の判断が視覚からしか判断できず、関節の動かす方向などが直感的に分かりづらい。

• TIKL(Tactile Interaction for Kinesthetic Learning)[2]

使用目的	動作教示
教示デバイス	振動モータ
原理	ユーザは、特定の位置に振動モータを配置したスーツを装着する。身体を動かすべき方向に位置する振動モータを動作させることで、次のタイミングにおける動作方向を教示する。
長所	アクチュエータが小型・軽量なため、動作が妨げられない。また、外力が発生しないため安全である。
短所	刺激が直感的ではないため、動作方向を瞬時に判断することが困難である。

• 真空圧を用いた形状固定具[3]

使用目的	力覚提示
教示デバイス	真空圧を用いた拘束要素
原理	要素内の空気を抜き負圧にすることにより、内部要素同士が接触し、摩擦力を発生することで剛体となるアクチュエータを身体に装着する。これにより、ユーザの動作に対する反力を与えることで力覚提示を行う。
長所	機械部品を使用しないため、柔軟かつ軽量である。また、暴走したとしても外力が働かず安全である。
短所	動作拘束できるだけの拘束力を与えるためには、摩擦面を大きく取る必要があるため、アクチュエータが大きくなり使用者の動作を妨げる可能性がある。

• マッスルスーツ[4]

使用目的	パワーアシスト
教示デバイス	空気圧人工筋
原理	圧縮空気を送ることで収縮力を発生する空気圧人工筋を用いることで、使用者の動作をアシストし、重労働による身体への負担を軽減する。
長所	機械部品を使用しないため、柔軟で軽量であり、アクチュエータによって動作が妨げられない。力・重量比が大きい。
短所	収縮量が30%程度と、やや小さいため、ストロークを確保するためにある程度の長さが必要となり、大がかりな外骨格機構が必要となる。

・ HAL[5]

使用目的	パワーアシスト
教示デバイス	モータ
原理	モータおよび減速機構を用いることで回転力を発生させ、人体の関節の回転運動に対するパワーアシストを行う。
長所	大きな力を発生することができるため、パワーアシストに向いている。
短所	減速機構を使用しているため、人間の力だけでは機構を動かすことができず、常にモータの制御が必要であり、暴走に対する対策が必須。また、大がかりな外骨格機構を必要とするため、かなりの重量になるうえ、身体自由度が制限される。

このように、既存の動作教示システムを考えた場合、身体動作に直接結びつく、直感的な教示はなされていない。そこで、類似研究として、力覚提示装置及び、パワーアシスト装置に使用されているシステムを、動作教示システムに応用した場合を考えることにする。

まず、力覚提示システムでは、ユーザに力覚を提示するという点では、教示刺激としては比較的直感的な刺激であるといえる。また、ここで取り上げた真空圧を用いた形状固定具は、機構が柔軟かつ軽量であり、暴走したとしても外力が発生せず完全に安全であるため、ウェアラブルシステムとして優れている。しかし、負圧を用いており、圧力の下げ幅が最高でも 0[Pa]までという制限がある。そのため、動作中に知覚できるほどの出力を発生させるためには、要素同士の摩擦面を広く取る必要があり、装置自体が大きくなってしまい、ユーザの動作を妨げてしまう恐れがある。

一方、パワーアシストシステムの場合、重労働に対するアシストを目的としているため、出力に関しては申し分がない。しかし、これらのシステムは人体の関節を動かすほどの外力を発生しているため、暴走しても安全なように、配慮する必要がある。特に HAL のように、モータと減速機構を用いた硬い機構の場合、モータの制御なしでは動くこともできず、身体動作を著しく阻害してしまうため、動作教示システムには向いていない。

以上の点を考慮した上で、筆者らが求める条件を以下に整理する。

- (1) 十分に小型・軽量でありユーザの動作を阻害しない。
- (2) 絶対に安全である。
- (3) 動作教示を行わないときは、ユーザの動作を阻害することがない。
- (4) 教示刺激は、動作中にも十分に感知できる程度の大きさとする。

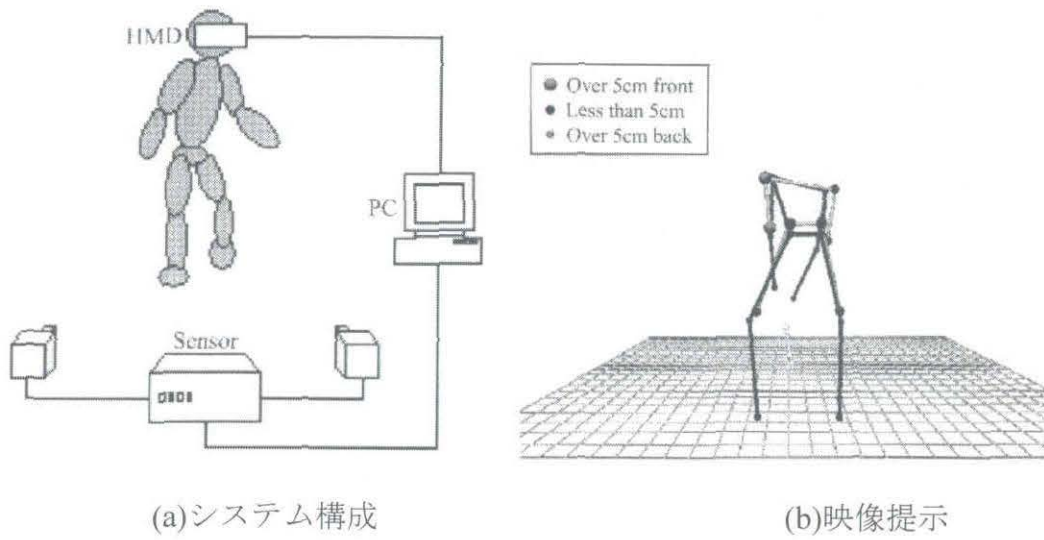


図 2.1 HMD を用いたスポーツスキルの学習方法

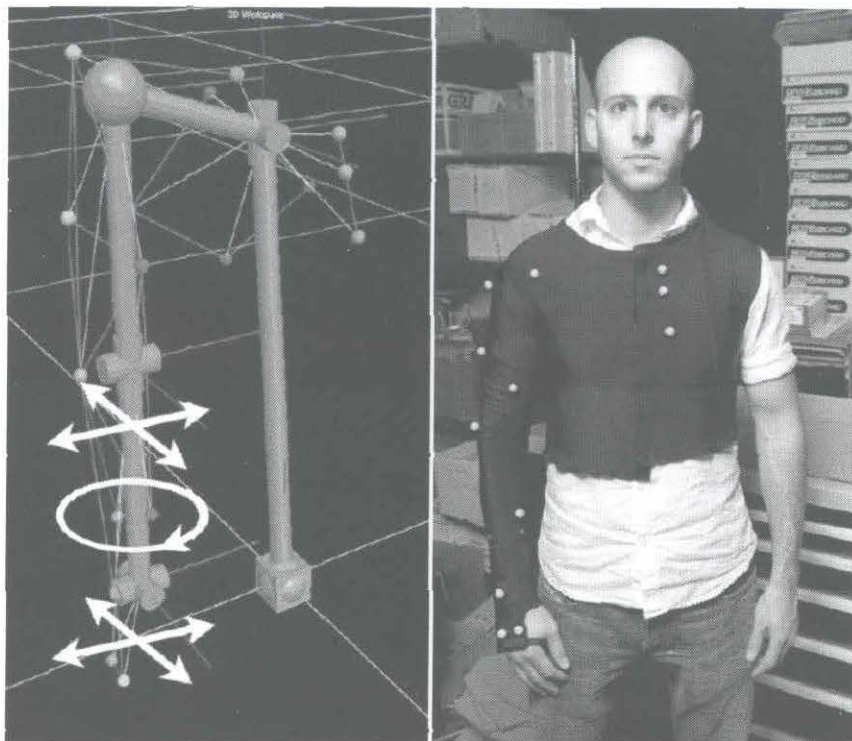


図 2.2 TIKL

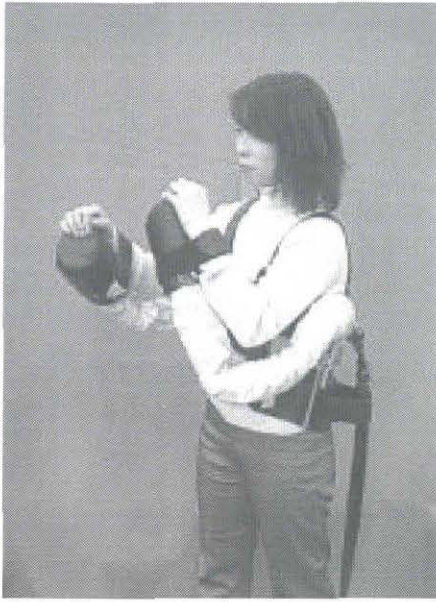


図 2.3 真空圧を用いた形状固定具

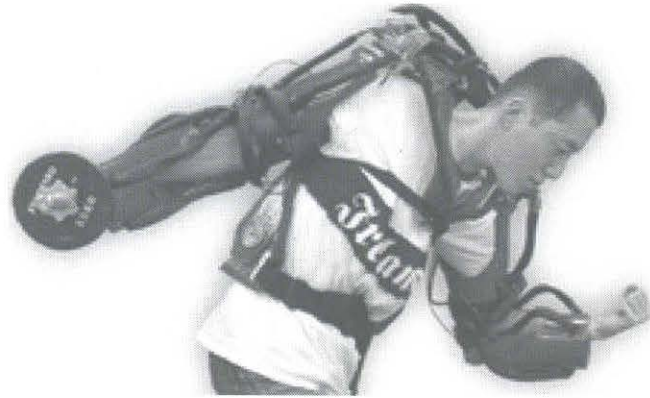


図 2.4 マッスルスーツ



図 2.5 HAL



## 2.2. 提案する動作教示システム

前節で述べた条件を満たす動作教示システムとして、加圧拘束型アクチュエータを用いた外骨格型の動作教示システムを提案する。加圧拘束型アクチュエータとは、アクチュエータに圧縮空気を送り込むことによって、拘束力を発生させる受動型のアクチュエータである。本アクチュエータは圧縮空気を動力源とする、空気圧アクチュエータである。空気圧アクチュエータは、その機構に機械的な部品を必要としないため、軽量化が容易である[6]。さらに、正圧側を用いているため、供給する圧縮空気の圧力に比例した出力を発生させることができ、理論的には出力の上限はないといえる。

また、教示方法としては、動作拘束による教示を採用することにした。それにより、動作拘束を行わない場合はアクチュエータを動作させる必要がなく、運動に対してフリーな状態になるため、ユーザの動きを妨げることはない。また、身体に外力を与える能動的なシステムではないため、万が一暴走しても安全であるといえる。以上のことから、本システムは動作教示に適したシステムであるといえる。

前節であげた、類似研究で用いられているシステムと本システムを、動作教示に必要な条件について評価すると、表1のようにまとめられる。評価は以下の5項目について、動作教示に適している方から、◎○△×の4段階で評価を行った。

- ・大きさ … 教示デバイスの大きさ。
- ・重さ … 教示デバイスの重量。
- ・安全性 … 教示デバイスの人体に対する安全性。
- ・動きやすさ … 動作教示中の動きやすさ。動作が阻害されないか。
- ・直感性 … 教示デバイスから与えられる情報が、身体動作に直結するか。

表1 各システムの性能評価

評価項目	大きさ	重量	安全性	動きやすさ	直感性
提案手法	○	○	◎	○	○
HMD	◎	◎	◎	◎	×
TIKL	◎	◎	◎	◎	×
形状固定具	△	◎	◎	○	○
マッスルスーツ	△	△	△	△	◎
HAL	×	×	△	×	◎

### 3. 動作教示用アクチュエータ

本システムは、上肢の運動、つまり肩から先の腕の動作教示を目的としている。ここで人の上肢の自由度を考えると、図3.1に示すように肩3自由度、肘1自由度、手首3自由度の計7自由度で表すことができる。これらの運動は、大きく分けると肘の屈曲/伸展のように関節を中心として運動する回転運動と、肩の外旋/内旋のように関節をねじる運動に分けることができる。そこで、これらの2種類の運動に対して拘束を行うことができれば、上肢の運動に対する動作教示を行うことができると考えた。そして、これらの運動の拘束に適したアクチュエータとして、回転運動を拘束するクランチ型拘束装置及び、ねじり運動を拘束するシリンダ型拘束装置の開発を行った。本章では開発した、これら2種類のアクチュエータについて述べる。

- |    |              |           |
|----|--------------|-----------|
| 肩  | … $\theta_s$ | : 外転, 内転  |
|    | $\psi_s$     | : 屈曲, 伸展  |
|    | $\phi_s$     | : 外旋, 内旋  |
| 肘  | … $\psi_e$   | : 屈曲, 伸展  |
| 手首 | … $\phi_w$   | : 回内, 回外  |
|    | $\theta_w$   | : とう屈, 尺屈 |
|    | $\psi_w$     | : 屈曲, 伸展  |

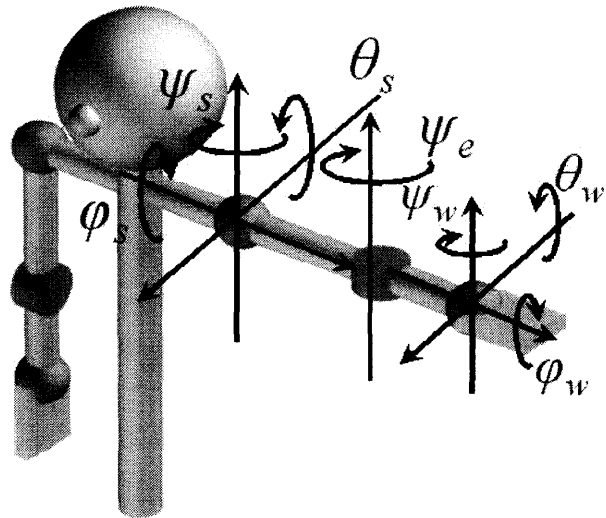


図 3.1 上肢の自由度

## 3.1. クラッチ型拘束装置

### 3.1.1. 動作原理及び設計概念

関節の回転運動を拘束するために開発した、クラッチ型拘束装置の模式図を図 3.2 に示す。シリコンシートを摩擦面として有する 2 枚の円板を向かい合わせに設置し、これら 2 枚の円板それぞれに、円板の中心を回転中心としたステンレス製のリンクを設ける。2 枚の円板の間には押しばねを配置することで、初期状態では、ばねの反発力によってそれぞれの円板の摩擦面が接触しないように工夫した。このような機構にすることにより、リンクは円板の中心を回転中心とした回転運動を行うことができる。また、この機構の側面には、渦巻き状に巻いた外径 7mm、内径 5mm のシリコンチューブを配置する。これらの機構を塩ビパイプ及び、塩ビ板を組み合わせてケーシングする。また、アクチュエータの回転軸には、ポテンショメータ(RDC506 -ALPS-)を組み込むことで、リンクの回転量から、装着者の関節の回転角度を計測することができるようにする。そのため、本装置の回転軸およびケーシングの固定にはポテンショメータの軸径に合わせて、M4 のボルトを使用することにする。

動作原理は次のとおりである。本装置内のシリコンチューブに圧縮空気を送り込むことで、シリコンチューブが膨張する。その結果、リンクを設けた円板が押されることになり、摩擦面であるシリコンシート同士が接触する。このときに発生する摩擦力によって、リンクの回転運動が拘束される。

このとき、本装置の摩擦面の接触による発生拘束トルク  $T_1$  は(1)式によって求められる。

$$T_1 = \frac{2}{3} \mu_{ss} P \pi r_d^3 \quad \dots(1)$$

ここで、 $\mu_{ss}$  はシリコンシート同士の摩擦係数、 $P$  は円板にかかる圧力、 $r_d$  は円板の半径である。(1)式を  $r_d$  についての式に変形すると(2)式のようなになる。

$$r_d = \sqrt[3]{\frac{3T_1}{2\pi P \mu_{ss}}} \quad \dots(2)$$

装置の設計条件として圧力を 0.5[MPa]としたときの目標トルクを 9[Nm]とした。これは、肘から手のひらまでを 0.3[m]として、手のひらに 3[kg]の重りを乗せたときに肘にかかるトルクである。この程度の負荷をかけることができれば、拘束を十分知覚させられると考えた。シリコンシート同士の摩擦係数  $\mu_{ss}$  は予備実験の結果から 1.5 とした。これらの値を用いて計算すると、(2)式から導出される円板半径  $r_d$  は約 18[mm]

であった。一方、ケーシングに用いる塩ビパイプの規格のうち、内径 36[mm]に最も近いサイズは、呼称 VP40 の内径 40[mm]であるが、余裕を見て 1 段階大きめの VP50 の内径 51[mm]を採用した。以上の理由から、円板の直径を 50[mm]として設計を行った。

実際に作成したクラッチ型拘束装置を図 3.3 に示す。クラッチ型拘束装置の円筒部の寸法は、直径 60[mm]、厚さ 35[mm]、リンクを含めた重量は約 200[g]である。クラッチ型拘束装置は、拘束部位によらずすべて同様の寸法で設計した。

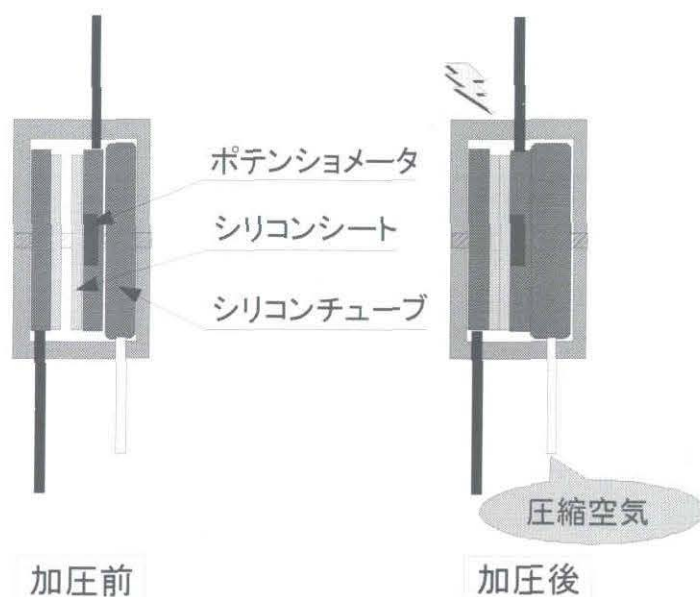


図 3.2 クラッチ型拘束装置模式図

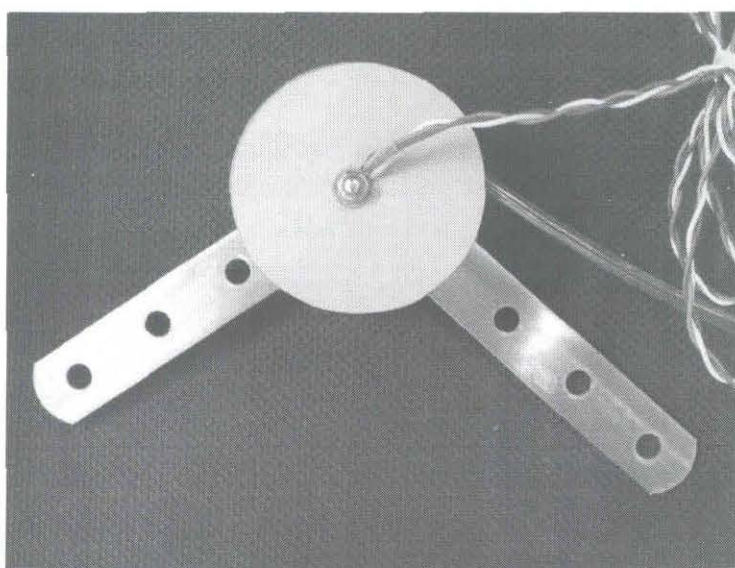


図 3.3 クラッチ型拘束装置

### 3.1.2. 拘束力測定実験

クラッチ型拘束装置の特性を調べるために、ばねばかりを用いて拘束トルクの測定を行った。測定は、クラッチ型拘束装置本体を固定し、リンクの先端にばねばかりをかけて手で引っ張ることによって行った。このとき、リンクの中心からばねばかりをかけた力点までの距離は 87.5[mm]である。

図 3.4 にクラッチ型拘束装置の拘束力測定結果を実線で、(1)式から導出される理論値を破線で示す。拘束トルクは供給した圧縮空気の圧力にほぼ比例して増加している。圧縮空気の圧力が 0.1[MPa]になるまでは拘束トルクが発生していないが、これはシリコンチューブの弾性のために膨張が発生していないためである。また、0.5[MPa]の空気を供給したときの拘束トルクは、約 6.5[Nm]となっている。(1)式を用いて導出した理論値に比べ、実験値はかなり小さな値となっており、グラフの傾きも緩やかになっている。これは、クラッチ型拘束装置の円板に圧力を与える触媒としてシリコンチューブを用いたため、円板の面全体にチューブが完全に接触せず、円板に作用する圧力に損失が生じたためと考えられる。

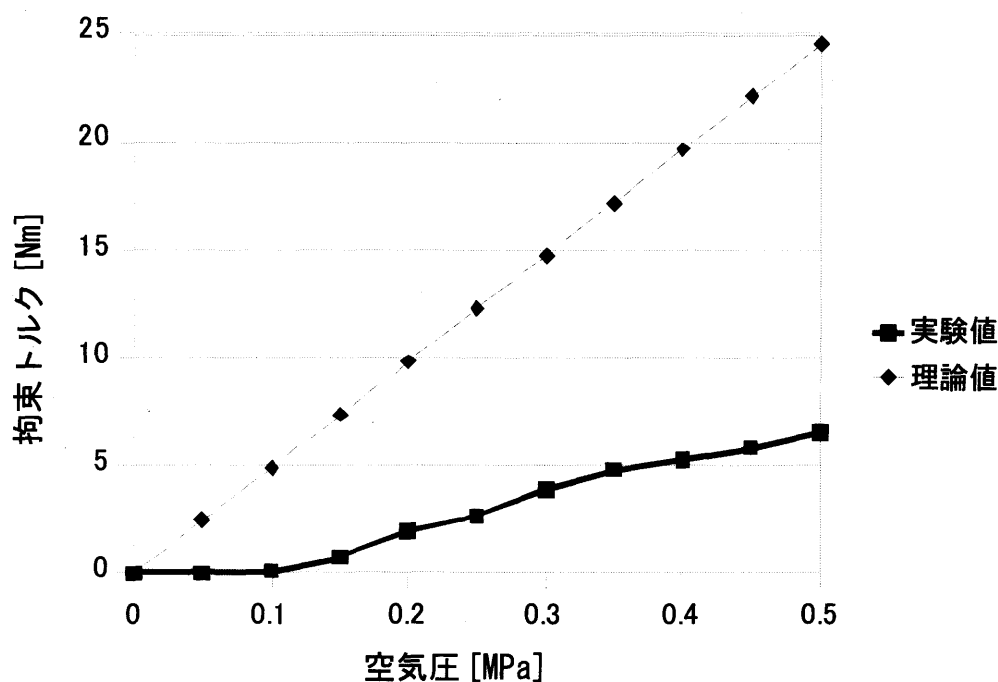


図 3.4 クラッチ型拘束装置の拘束トルク

## 3.2. シリンダ型拘束装置

### 3.2.1. 動作原理及び設計概念

ねじり運動を拘束するために開発した、シリンダ型拘束装置の模式図を図 3.5 に示す。管径の異なる 2 本のアルミパイプを重ね、その内部に外径 7[mm]、内径 5[mm]のシリコンチューブを配置した 3 層構造になっている。アルミパイプの一方が図 3.5 における A 軸を中心として回転することによって、人の関節と類似したねじり運動を生じさせることが可能である。このときのアルミパイプ同士の摩擦は極めて小さい。内側のアルミパイプには円周の半分をくり抜くことによって窓を設ける。

動作原理は次のとおりである。シリコンチューブに圧縮空気を送ると、シリコンチューブが膨張し、内側のアルミパイプに設けられた窓からはみ出し、外側のアルミパイプの内壁に接触する。これによりシリコンチューブとアルミパイプの間に摩擦力が働き、アルミパイプの A 軸を中心としたねじり運動を拘束することができる。なお、本装置の先端部にはポテンショメータ(JC10-COPAL-) を組み込むことで、2 本のアルミパイプの角度差から、装着者の関節のねじり角度を計測できるようにした。

このとき、本装置の摩擦面の接触による発生拘束トルク  $T_2$  は(3)式によって求められる。

$$T_2 = \pi \mu_{sa} l P r_a^2 \quad \dots(3)$$

ここで、 $\mu_{sa}$  はシリコンとアルミパイプの摩擦係数、 $l$  は内側のアルミパイプに設ける窓の長さ、 $P$  はアルミパイプの内壁にかかる圧力、 $r_a$  は外側のアルミパイプの半径である。(3)式を  $r_a$  についての式に変形すると(2)式のようなになる。

$$r_a = \sqrt{\frac{T_2}{\pi \mu_{sa} l P}} \quad \dots(4)$$

装置の設計条件として、圧力を 0.5[MPa]としたときの目標トルク  $T_2$  を 2[Nm]として設定した。一方、人間の腕の長さから、設けることができる窓の最大長さを逆算すると、上腕で 65[mm]、前腕で 100[mm]であったため、計算に用いる窓の長さは 65[mm]とした。シリコンとアルミパイプの摩擦抵抗  $\mu_{sa}$  は予備実験の結果から 1.5 とした。これらの値を用いて計算すると、外側のアルミパイプの半径  $r_a$  は約 3.6[mm]であった。アルミパイプの規格のうち、内径 7.2[mm]に最も近い規格は、外径 10[mm]、内径 8[mm]であるが、余裕を見て、1 段階大きい規格の外形 12[mm]、内径 10[mm]のアルミパイプを採用し、設計を行った。

実際に作成したシリンダ型拘束装置を図 3.6 に示す。シリンダ型拘束装置は人体の上腕及び前腕の長さに合わせて設計したため、肩部拘束用と手首部拘束用では寸法が異なり、肩部拘束用は長さ 120[mm]、重量は約 40[g]、手首部拘束用は長さ 160[mm]、重量は約 50[g]である。外径はどちらも 12[mm]である。

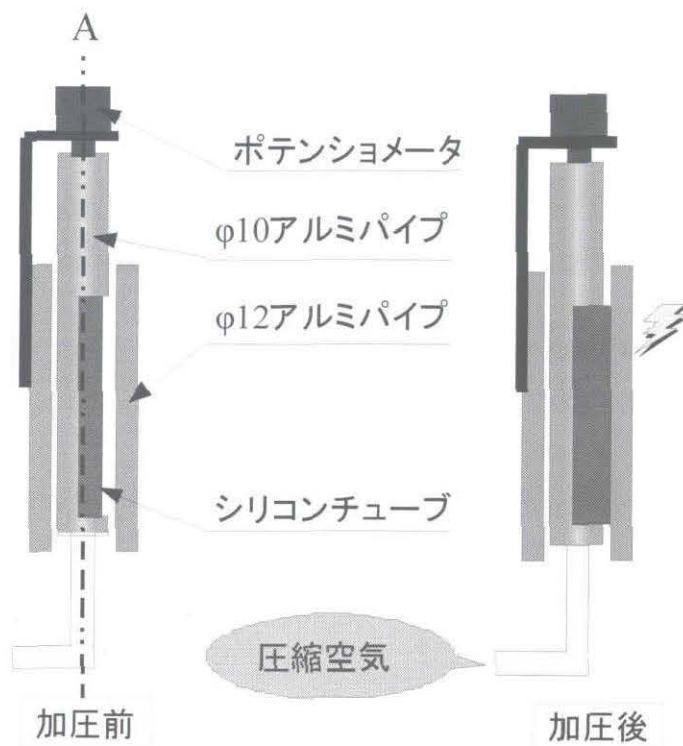


図 3.5 シリンダ型拘束装置模式図

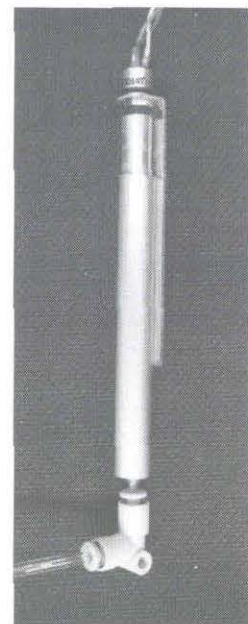


図 3.6 シリンダ型拘束装置

### 3.2.2. 拘束力測定実験

シリンダ型拘束装置のトルク特性を調べるために、ばねばかりを用いて拘束トルクの測定を行った。シリンダ型拘束装置は管径が小さく、拘束トルクの測定が困難であったため、内側のアルミパイプの一端に測定用のリンクを取り付けた。測定は、シリンダ型拘束装置の外側のアルミパイプを固定し、測定用に取り付けたリンクの先端にばねばかりをかけて手で引っ張ることによって行った。このとき、リンクの中心からばねばかりをかけた力点までの距離は 100[mm]である。

図 3.7 にシリンダ型拘束装置の拘束力の測定結果を実線で、(3)式から導出される理論値を破線で示す。窓のくりぬき長  $L$  は肩部拘束用の拘束装置では 65[mm]、手首部拘束用の拘束装置では 100[mm]である。拘束トルクは供給する空気圧にほぼ比例して増加している。圧縮空気の圧力が 0.15[MPa]になるまでは拘束トルクが発生していないが、これはシリコンチューブの弾性のために膨張が発生していないためである。また、0.5[MPa]の空気を供給したときの拘束トルクは、肩部で約 1.5[Nm]、手首部で約 2.1[Nm]となっている。(3)式を用いて導出した理論値に比べ、実験値はかなり小さな値となっており、グラフの傾きもやや緩やかになっている。これは、アルミパイプの内壁との接触面におけるシリコンチューブ自体の変形が原因で、拘束力が減少したのではないかと考えられる。

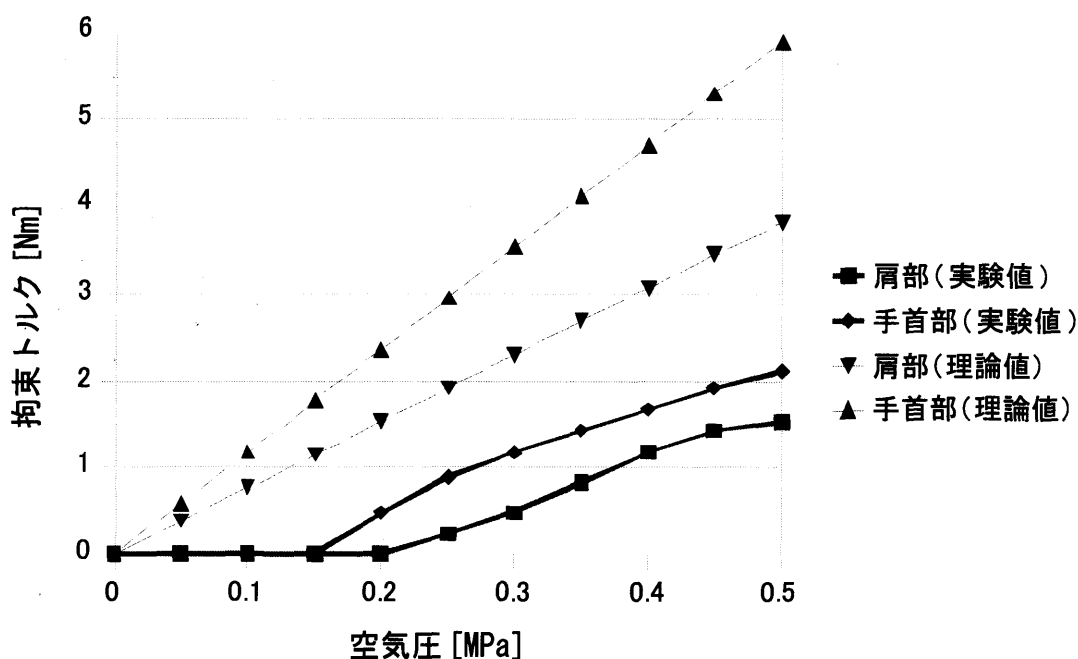


図 3.7 シリンダ型拘束装置の拘束トルク



## 4. 動作学習支援装置

### 4.1. 構成

3章で述べた2種類の加圧拘束型アクチュエータを組み合わせることで、図4.1のような動作学習支援装置を開発した。クラッチ型拘束装置は、肩関節の外転/内転、屈曲/伸展の運動回転軸の延長上と、肘関節屈曲/伸展の運動回転軸の延長上に配置し、シリンダ型拘束装置は、肩関節の外旋/内旋、手首関節の回内/回外の運動回転軸と平行になるように、それぞれ、上腕と前腕の外側に配置した。なお、上肢の運動にはこれらの5つの運動以外に、手首のとう屈/尺屈および、屈曲/伸展があるが、手首関節が小さくアクチュエータを配置することが困難であったため除外した。本動作学習支援装置は、身体に装着して使用する外骨格型の装置となっている。

装置から伸びているチューブは各拘束装置の動力源である圧縮空気をエアコンプレッサから供給するためのチューブであり、電磁弁に接続している。同様に、装置から伸びている配線はポテンショメータからの信号をCPUに送るためのものである。システムの制御にはCPUとしてH8/3069を使用している。本動作学習支援装置のシステム構成を図4.2に示す。図に示すように本システムでは、ポテンショメータからの信号をCPUであるマイコンで処理し、電磁弁を制御することによって、各拘束装置の動作を制御している。

動作学習支援装置の総重量は約1.1[kg]である。本装置を身体に装着する際は、胸部および上腕、前腕をバンドで固定する。

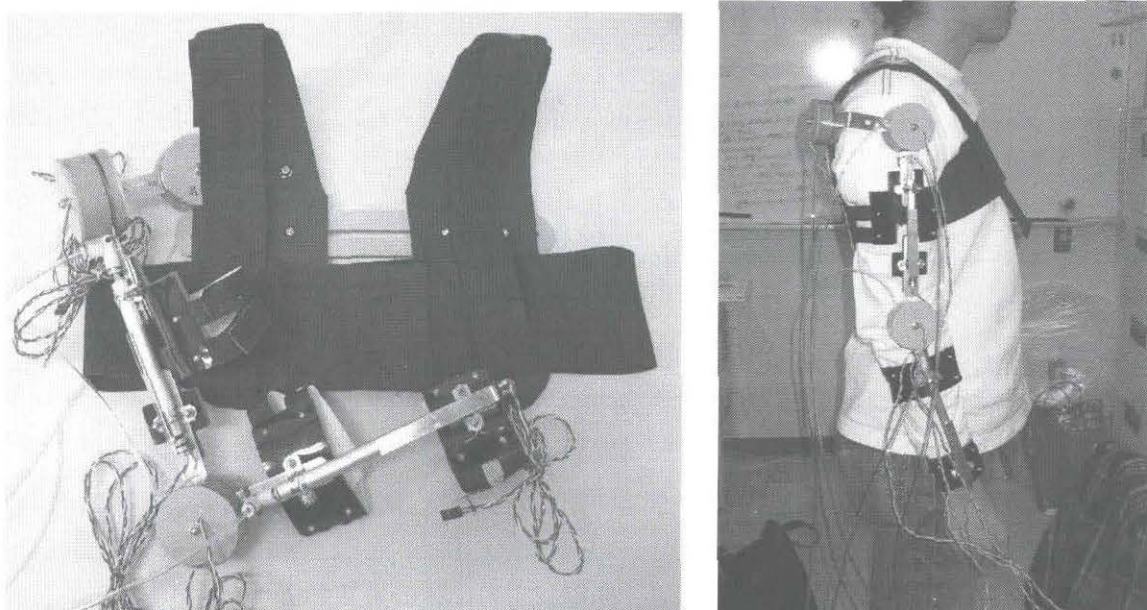


図 4.1 動作教示装置

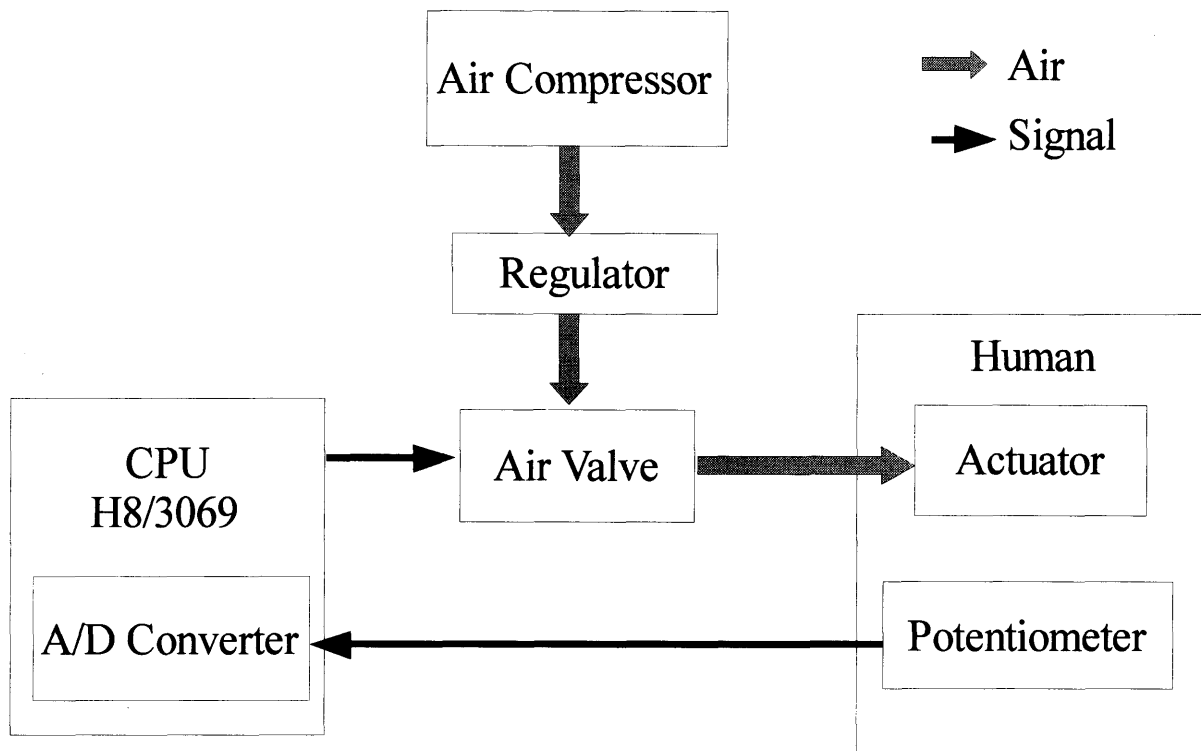


図 4.2 システム構成

## 4.2. 関節可動域

実際に本装置で動作教示に対する支援が行えたとしても、人間の関節の可動域よりも、装置を装着した状態における関節の可動域が狭くなっていれば、装着者の動きが阻害されていることになり動作教示システムとしては好ましくない。そこで、実際に本装置を装着した状態で、特定の動作を行い、装着時の関節可動域に対する評価を行った。行った動作は「関節可動域表示ならびに測定法[7]」に則った動作とした。

人間の一般的な関節の可動域と、本装置を身に着けた状態での関節の可動域を表2に示す。この表より、肩の屈曲及び、外転動作が大幅に制限されていることが分かる。これらの動作は、肩から上に手を上げるといった動作に対応しており、その動作を行うことができないことを示している。これは、開発した動作学習支援装置が外骨格型であり、装置の機構同士が干渉してしまうためである。また、手首の回内に関しても、十分な可動域を確保できていない。これは、装置が外骨格であるために、手首関節のねじり運動における回転中心と、シリンダ型拘束装置の回転中心が一致していないためである。

表2 関節可動域の比較

部位名	運動方向	関節可動域	装着後の関節可動域
肩	屈曲	180°	120°
	伸展	50°	50°
	外転	180°	115°
	内転	0°	0°
	外旋	60°	60°
	内旋	80°	80°
	水平屈曲	135°	130°
	水平伸展	30°	20°
肘	屈曲	145°	125°
	伸展	5°	0°
前腕	回内	90°	30°
	回外	90°	90°

### 4.3. 姿勢教示実験

動作学習支援装置による姿勢教示効果を評価するために、動作教示の前実験として、姿勢教示実験を行った。実験の前準備として特定の姿勢に対するポテンショメータの値を測定しておき、その値を目標姿勢として設定した。実験中、被験者には、動作学習支援装置以外からの教示情報は一切与えられない。被験者は男子学生1名である。

#### 4.3.1. 実験方法

姿勢教示実験は以下の手順で行った。

- ①被験者には、動作学習支援装置を装着した状態で自由に右上肢を動かしてもらう。
- ②各関節における、目標姿勢の関節角度と被験者の関節角度の差が $\pm 3^\circ$ 以下ならば、アクチュエータを作動させ、その関節を拘束する。
- ③目標角度と一致した関節、すなわち拘束された関節は、対応する LED が点灯することで、被験者は視覚情報からも、どの関節が一致したかを確認することができる。
- ④すべての関節が拘束され、姿勢が一致したと判断したときに、姿勢をデジタルカメラで撮影することで、目標姿勢と被験者の最終的な姿勢の比較を行う。

#### 4.3.2. 実験結果

実験結果として、目標姿勢と被験者の最終的な姿勢を図 4.2 に示す。(a)は目標姿勢、(b)は被験者が最終的にとった姿勢である。これらの写真を見比べると、目標姿勢と被験者の姿勢はほぼ同じ姿勢であるため、本装置を用いることで意図した姿勢を教示することが可能であると言える。

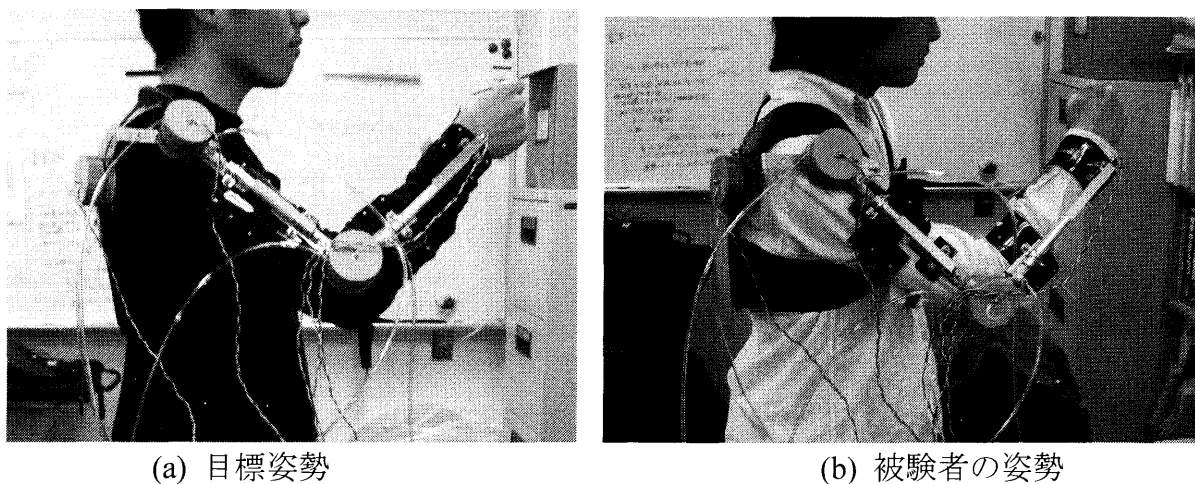


図 4.2 姿勢教示実験結果

## 4.4. 考察

開発した動作学習支援装置についての評価実験を行った。その結果、本装置を用いることで、意図した姿勢の教示が可能であることが分かった。しかし、正確な姿勢の教示を行うためには、解決すべき問題が数多く残されている。そこで、今回の実験で判明した問題点を以下に記す。

(1)外骨格機構の干渉等により関節可動域が制限されてしまう

(2)装置と身体の固定が不十分なため、ずれが生じ正確な教示が困難である

(1)の可動域が制限されてしまう問題は、機構同士の干渉の他に、装置が外骨格機構であり、人間の関節の回転中心と装置の回転中心を完全に一致させることができていないことが原因としてあげられる。これらの問題を解決するためには、機構同士の干渉が起こらないように、外骨格の形状や配置を最適化すること、人体の関節の回転中心と拘束装置の回転中心を、できる限り近づけることが重要になる。

また、現段階では、装置と身体の固定をバンドで締め付けるという方法を適応している。これは、装置の装着が短時間で容易に行えるように配慮した結果である。しかし、この方法ではどうしても身体と装置の間に隙間ができてしまうため、ズレが生じてしまって正確な拘束ができず、(2)のような問題が生じてしまう。この問題を解決するためには、ユーザの体格に合ったパーツで身体を覆う等してがっちり固定する必要がある。しかし、がっちりとした機構であるほど、ユーザが拘束感を感じてしまい、十分な動作を行うことができなくなってしまうため、しっかりとした固定と、動きやすさを両立することが、ウェアラブルロボットに関する研究における大きな課題であるといえる。

姿勢教示実験によって、意図した姿勢の教示が可能であることが確認できたが、本研究の最終目的である「動作教示」の可能性については、まだ検証が行えていない。そのため、今後の研究では、本装置による動作教示手法の確立及び、その検証を行う必要がある。

## 5. まとめ

本論文では、動作を教示するための装置として、動作拘束による動作教示手法を提案し、教示のための装置として、加圧拘束型アクチュエータを用いた動作学習支援装置を開発した。そして、本装置を用いた姿勢教示実験を行い、本装置を用いることで、意図した静止姿勢をユーザに教示することが可能であることを示した。本装置を用いた動作教示の一例として、静止姿勢の教示を連続で行うことにより、踊りのようなゆっくりとした動作に対しても教示が可能であると思われる。ただし、本装置のみでの教示には限界があるため、システムに組み込まれているセンサの値を用いて姿勢情報をディスプレイ上に表示し、目標姿勢と比較することで、より効果的な動作教示が可能であると考えられる。

また、実現の可能性を検証していないため、本編には記載していないが、巻末付録において本動作学習支援装置を用いた動作教示手法の一例について記載したので、参照して頂きたい。

## 参考文献

- [1] 本莊直樹, 伊坂忠夫, 満田隆, 川村貞夫, HMD を用いたスポーツスキルの学習方法の提案, 日本バーチャルリアリティ学会論文集 Vol.10, No.1, pp.63-70, 2005
- [2] Jeff Lieberman, Cynthia Breazeal, TIKL:Development of a Wearable Vibrotactile Feedback Suit for Improved Human Motor Learning, IEEE TRASACTION ON ROBOTICS, VOL.23, NO.5, pp.919-926, 2007
- [3] 満田隆, 松尾憲親, 真空圧を利用した形状固定具(連結型機械拘束要素の力学特性), 日本機械学会論文集(C編), 72巻719号, 2006
- [4] 小林宏, 鈴木秀俊, 伊庭雅弥, 長谷川翔, 上肢動作補助用マッスルスーツの肩機構開発と姿勢制御手法の提案, 計測自動制御学会論文集, Vol.42, No.4, 2006
- [5] HIROAKI KAWAMOTO, YOSHIYUKI SANKAI, Power assist method based on Phase Sequence and muscle forge condition for HAL, Advanced Robotics, Vl.19, No.7, pp.717-734, 2005
- [6] 編著代表 長田義仁, ソフトアクチュエータ開発の最前線 人工筋肉の実現を目指して, エヌ・ティー・エス, 2004
- [7] 米本恭三, 石神重信, 近藤徹, 関節可動域表示ならびに測定法, リハビリテーション医学 Vol.32, No.4, pp207-217, 1995

# 付録

## 動作学習支援装置を用いた動作教示手法の提案

以下に提案する手法は、実現の可能性を検証していないため本編に記載しなかったが、開発した動作学習支援装置を用いることで、実現が可能であろうと考えられる教示手法である。また、本装置に組み込まれたセンサの値から、ユーザの姿勢をリアルタイムで計測することで、ユーザの動作をディスプレイに表示することが可能となる。目標動作とユーザの動作を比較することにより、視覚からも教示データが得られるため、教示効果の向上が期待できる。

### 1. 姿勢教示を連続で行うことで動作を教示する

教示方法としては、4.3 節の姿勢教示実験を連続で行う教示手法である。まず、目標となる動作の姿勢を一定間隔ごとに記録し、複数の姿勢情報を取得する。この姿勢情報を用いて、コマ送りのように連続して姿勢教示を行うことで、擬似的に動作教示を行う。

### 2. 関節の曲がる方向を限定することで、動作を教示する

目標動作から遠ざかる動作を行った関節のアクチュエータを一定時間拘束することで、「間違った方向に運動した」という情報を与える手法。各関節が目標動作に近づく方向にしか動かすことができなくなるため、正しい動作の教示が行える。

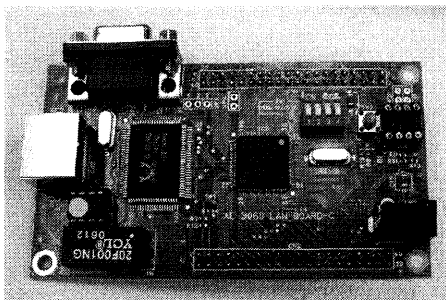
### 3. 仮想的な壁を作り出すことによって、動作軌道を教示する

目標動作の軌道から一定以上離れると動作拘束を行うようにすることにより、目標動作の軌道から一定の幅を持たせた仮想的な壁を作り出す。これにより、目標軌道から逸脱する動作を行うことができなくなるため、目標軌道上での動作を教示することができる。研究分野としては、VRの研究に近いと思われる。



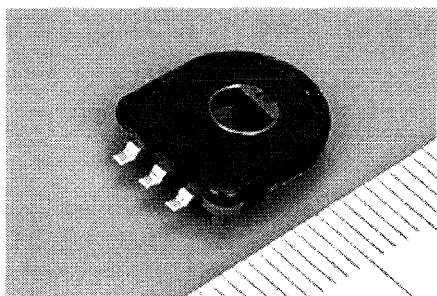
## 本システムの構成部品仕様

### ・マイコン



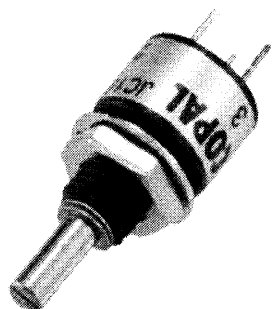
品番	駆動電圧	サイズ	重量	制作会社
H8/3069	5V	幅 7.5mm 長さ 113mm 厚さ 0.4mm	20g	秋月電子

### ・ロータリーエンコーダ



品番	駆動電圧	サイズ	重量	制作会社
RDC506	5V	幅 11mm 長さ 15mm 厚さ 3.5mm	0.5g	ALPS

### ・ポテンショメータ



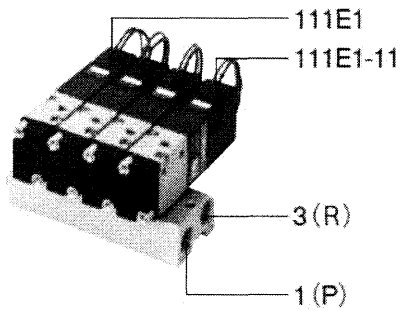
品番	駆動電圧	サイズ	重量	制作会社
RDC506	5V	直径 10mm 長さ 28mm	3g	COPAL

・エアコンプレッサ



品番	駆動電圧	サイズ	重量	制作会社
6-15(6-S)	100V	高さ 480mm 幅 380mm 奥行き 380mm	26kg	JUN-AIR

・電磁弁



品番	駆動電圧	サイズ	重量	制作会社
111M8F	12V	高さ 50mm 幅 150mm 奥行き 80mm	0.78kg	コガネイ

## 謝辞

本研究の機会を与えてくださり，終始適切な御指導，御討論頂いた野村由司彦教授および杉浦徳宏准教授に深く感謝いたします．また，本研究を進めるにあたり，熱心に討論頂き，協力して下さった三重大学メカトロニクス研究室の皆様に心よりお礼申し上げます．