

上肢位置決め制御動作の習熟過程

Acquiring Process of Positioning Motion in a Human Upper Link

○山本隆司, 小林秀明, 猪岡光

○Takashi Yamamoto, Hideaki Kobayashi, Hikaru Inooka

東北大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

キーワード : 筋電位 (electro-myogram), インピーダンス (impedance), 習熟過程 (acquiring process),
上肢 (human upper link), 位置決め動作 (positioning motion)

連絡先 : 〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉 東北大学 情報科学研究科 知能制御システム学研究室
山本隆司, Tel. : (022)217-7021, Fax. : (022)217-7019, E-mail : yamamoto@control.is.tohoku.ac.jp

1. 緒言

従来の危険な作業を人間と隔離された空間で行う産業用ロボットでは、軌道計画や運動制御に関して、高精度、高速性、作業能率などが重要な要素である。一方、開発が切望されている医療や福祉といった人間と作業空間を共有するロボットでは、その軌道計画や運動制御に関して、人間の心身に対し危害を加えない事に配慮する必要がある。その実現の手段の一つとして、人間の動作特性をロボットに持たせることがあげられる。そのため、人間の動作特性に関する研究が様々な方面でなされている。^{1,2,3)}

人間の動作特性を解析する上で、動作の軌道解析^{4,5)}のみならず、動特性を考慮する事は、非常に重要である。また、生体の運動は、筋の収縮運動を動力源にしており、筋運動に伴って発生する筋電位 (electro-myogram: EMG) 情報を用いて動作の特性を評価する手法が提案されている。^{6,7,8)}

動作中に関節インピーダンスを変えられる⁹⁾ことが、人間の動作における特徴の一つである。この能力によって、人間は様々な対象、人間や道具

などに危害や損傷を与えることなく非常にフレキシブルな動作をすることができる。また、経験を積むことによって関節インピーダンスの調節法を学習し、同じもしくは同等の動作をより素早く、効率的に行うようになる事も、人間特有の特性といえる。

本研究では、前腕位置決め動作における肘関節インピーダンスが、習熟過程でどのように変化していくかを、筋電位情報をもとにした指標を用いて分析を試みる。

2. 前腕肘関節の筋骨格系

生体運動は、筋の発生する筋力をその動力源としている。筋は、収縮力のみを発生するアクチュエータであるため、関節を自由に駆動するには関節毎に二つ以上の筋が必要で、関節の駆動力は各筋の収縮力の総和となる。従って同じ駆動力を発生する場合においても、関節まわりの筋の収縮力を変えることができる。つまり同じ加減速、静止動作をする場合においても、関節のインピーダンスは可変であり、人間の動作にフレキシブル性を

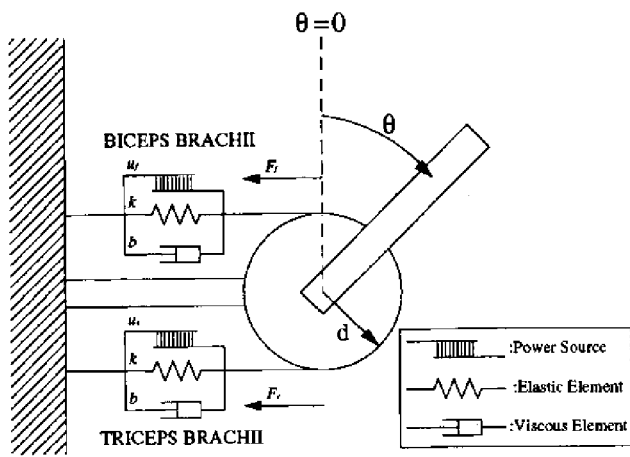


図1 上肢筋骨格系の粘弾性モデル

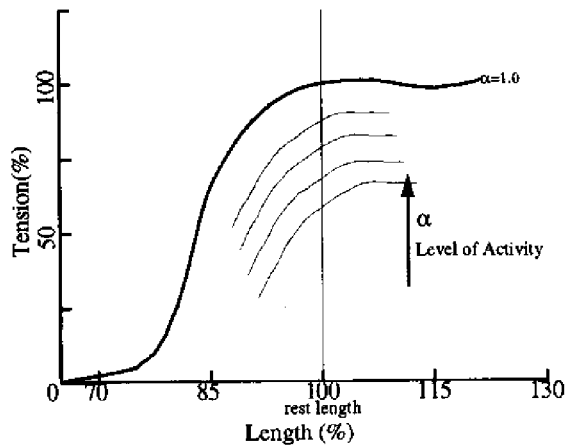


図2 張力-長さ曲線

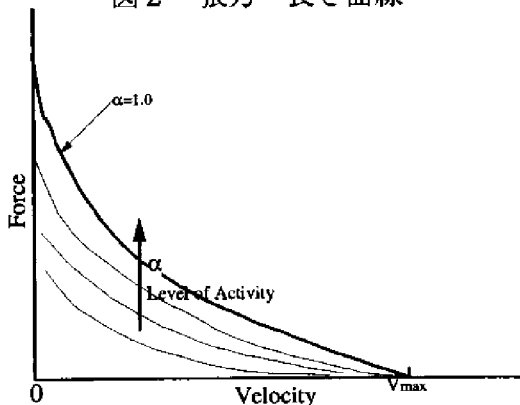


図3 力-速度曲線

与えている。

具体例として、人間の四肢における前腕肘関節(図1)を考える。前腕は、上腕二頭筋(Biceps Brachii)と、上腕三頭筋(Triceps Brachii)の収縮力の差によって駆動される。筋は、その長さが長くなると張力が増加する弾性特性(図2)と、短縮速度に反比例して収縮力が減少するという粘性特性(図3)を持っており、次式に示される双線形モデルの運動方程式を用いてモデル化される。¹⁰⁾

$$\frac{I}{d}\ddot{\theta} = u_f - u_e - (u_f + u_e)(k\theta + b\dot{\theta}) \quad (1)$$

ここで、 I は前腕の慣性モーメントであり、 u_f と

u_e は、それぞれ上腕二頭筋と上腕三頭筋の発生する収縮力を示す。 θ は、肘関節回りの回転角度であり、(1)式中の I/d が慣性、 $(u_f + u_e)k$ が弾性項、 $(u_f + u_e)b$ が粘性項である。(1)式に示すように、粘弾性は上腕二頭筋と上腕三頭筋の収縮力の和($u_f + u_e$)に比例する形で示される。(kとbは定数である。)前腕が静止している状態で、上腕二頭筋と上腕三頭筋が同じ収縮力を発生した場合、上腕の駆動トルクは0で、前腕は静止した状態を保つ。しかし、両筋の収縮力が大きい場合は肘関節の粘弾性は大きくなり(関節が固くなる)、両筋の収縮力が小さい場合は肘関節の粘弾性は小さくなる(関節が柔らかくなる)。

3. 実験

3.1 実験装置

実験装置を図4に示す。実験装置のアームに前腕を乗せ、バンドで前腕をアームに固定する。肩関節は体に対して 90° になるようにし、上腕、前腕を同一水平面内に拘束する。この場合、アームに固定された前腕は、上腕二頭筋と上腕三頭筋の収縮力の差によってのみ駆動される。肘関節まわりの前腕の運動には、式(1)の運動方程式で示される双線形モデルを適用できる。肘関節角度は、アームにとりつけられたエンコーダにより測定される。筋の収縮力は、上腕二頭筋及び上腕三頭筋上の皮膚にとりつけた電極を用いて測定される表面筋電位(EMG)を用いて推定する。なお、測定される表面筋電位は、同一個人でも測定時に張り

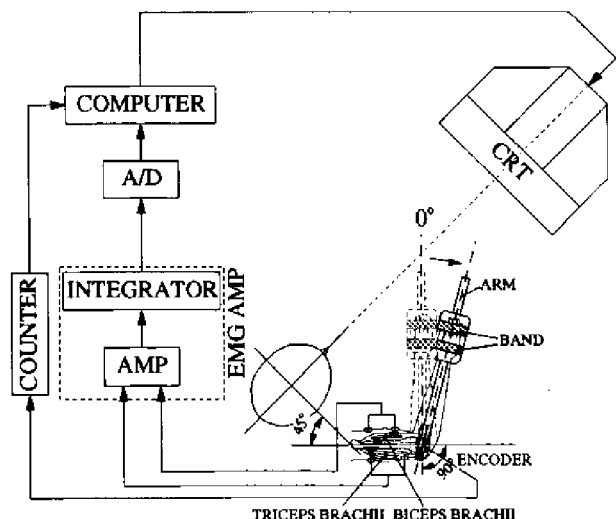


図4 実験装置

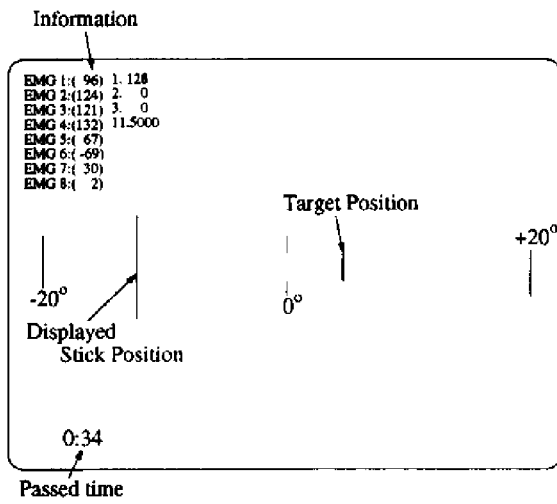


図5 CRTの表示

付けた電極の微妙な位置の違いにより測定される値が異なるため、あらかじめキャリブレーションを行う。また、式(1)で示される双線形モデルの粘弾性係数は、定数部分(k, b)を求めることができないため、インピーダンス特性の解析は評価関数を用いて評価する。

3.2 実験方法

図4に示される 0° の手先位置を、手先位置の原点とし、時計周り方向の回転角度を正とする。被験者は、CRT表示(図5)に従って $+20^\circ \sim -20^\circ$ の間でランダムに示される目標位置にすばやくアームを移動、静止させる位置決め動作(ステップ運動)をするよう指示されている。アームが目標位置近傍 $\pm 0.1^\circ$ に2秒間静止すると、コンピュータは位置決め動作の完了と判断し、新たな目標位置を被験者に提示し、被験者は新たな位置決め動作を開始する。この動作を、最初の動作開始時から80秒間繰り返し行うものとする。

実験は、この実験装置を用いた作業の未経験者と、作業を十分経験した熟達者の2人(いずれも20代前半の男性)を被験者とし、それぞれが80秒間のステップ運動状の位置決め動作を続けて8回行った。

4. 結果と考察

4.1 実験結果

実験により得られたデータの一部を、図6、図7に示す。図6は、実験装置での作業未経験者の80秒間の位置決め動作の1回目と8回目の手先位

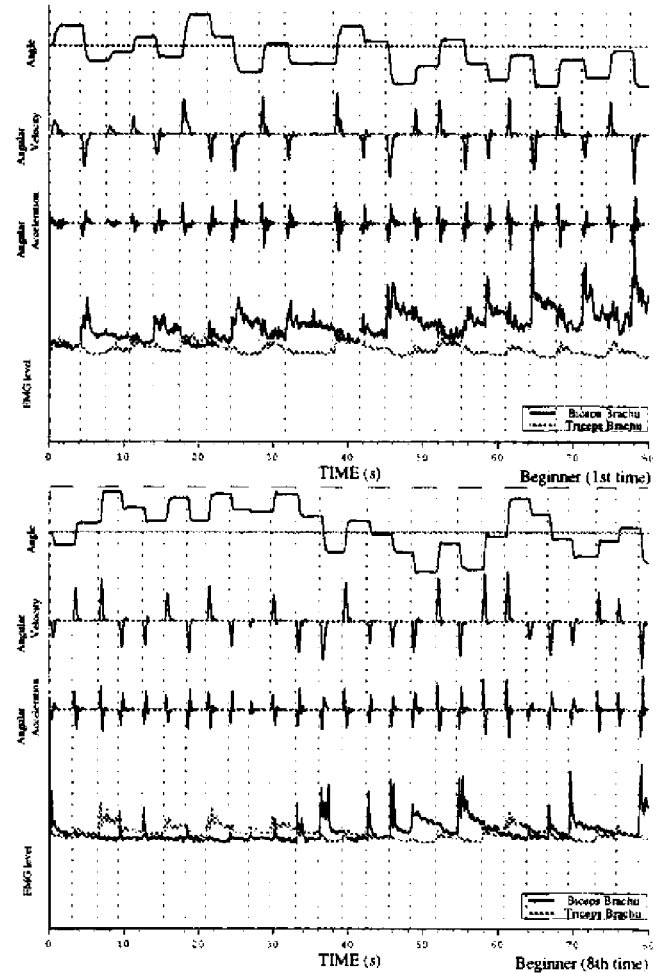


図6 初心者の位置決め動作実験の結果

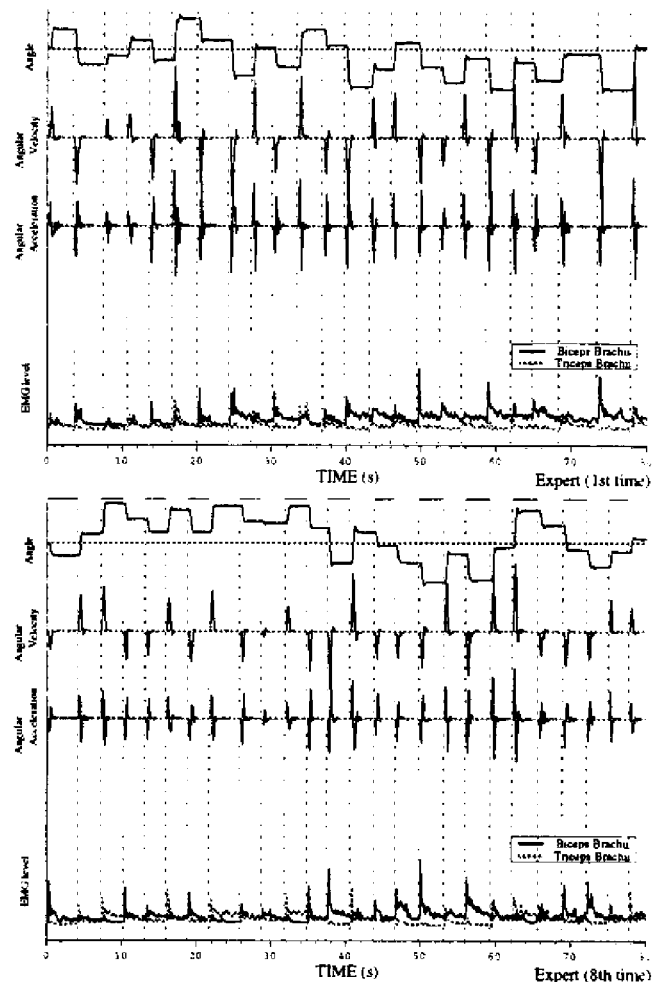


図7 熟達者の位置決め動作実験の結果

置 (角度), 手先速度 (角速度), 手先加速度 (角加速度) と上腕二頭筋と上腕三頭筋の収縮力である。図 7 は熟達者の場合である。

作業未経験者の場合, 80 秒間全体を通して上腕二頭筋, 上腕三頭筋が非常に大きな収縮力を発生していることが分かる。両筋の収縮力が非常に大きい場合は, 式 (1) に示されるように, 関節での粘弾性が非常に大きくなるため, 前腕の駆動には非常に大きな収縮力が必要となるが, 静止動作は容易になる。一回目では, この被験者は上腕二頭筋の制御でほとんどの動作を完了している。8 回目になると, 正方向の動作時には, 上腕三頭筋を収縮し, 負方向に動作する場合には上腕二頭筋を収縮するようになることが分かる。これは, 上腕二頭筋と上腕三頭筋の両方を同時に制御する未経験者にとって困難であり, 習熟することにより両筋の同時制御を行うようになっていくということが分かる。

熟達者の場合, 未経験者に比べて両筋の収縮活動は, 80 秒間全体を通じて非常に小さい。つまり関節のインピーダンス (粘弾性) を小さくしたままで位置決め動作をしていることになる。関節の粘弾性が非常に小さいため, 前腕の加減速のための筋の収縮力も少なくなっている。

4.2 位置決め動作の分割

図 8 は, 実験中のある時間に新たな目標が示されてから, その目標位置への位置決め動作が完了するまでの, 手先位置 (角度), 手先速度 (角速度), 手先加速度 (角加速度) と上腕二頭筋と上腕三頭筋

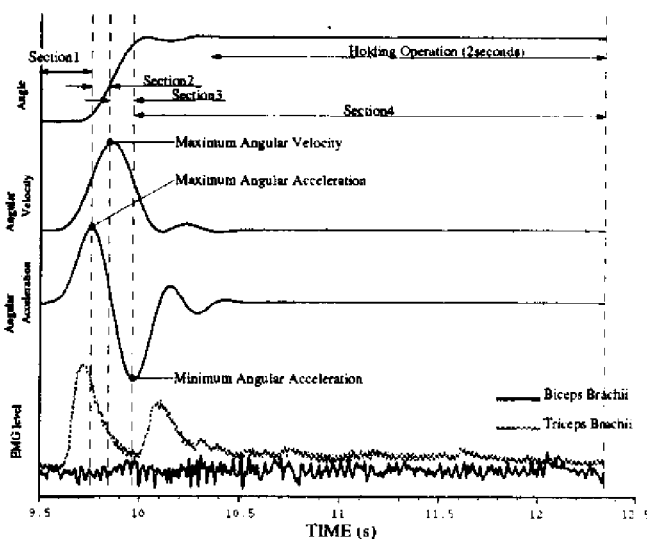


図 8 位置決め動作の分割

の収縮力を示したものである。新たに示された目標位置が, 現在の手先位置よりも図 4 に示す正方向にあるため, 上腕三頭筋が収縮して前腕を加速しているが, 減速動作のために上腕二頭筋が強く収縮するような動作は行われず, つまり, 減速, 静止動作は肘関節の粘弾性で行っていることが分かる。

ここで, 個々の位置決め動作を, 手先速度 (角速度) と手先加速度 (角加速度) のピークにより 4 つの区間に分割する。新しい目標が示されてから手先加速度 (角加速度) が最大になるまでを区間 1, 手先速度 (角速度) が最大になるまでを区間 2, 手先加速度 (角加速度) が最小になるまでを区間 3, 静止動作完了までを区間 4 とする。

4.3 評価指標の定義

一連の位置決め動作を, 以下の 3 つの評価式を用いて評価する。

肘関節周りの筋骨格系は, (1) 式に示される双線形モデルで示され, 粘弾性が, 上腕二頭筋と上腕三頭筋の収縮力の和 ($u_f + u_e$) に比例する可変粘弾性を持つ。そこで, 粘弾性に関する指標 J_1 を以下のように定義する。

$$J_1 = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (u_f(t) + u_e(t)) dt}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

肘関節での駆動トルクは, 上腕二頭筋と上腕三頭筋の収縮力の差に比例した形, $(u_f(t) - u_e(t))d$ で示される。従って, 駆動トルクに関する指標 J_2 を以下のように定義する。

$$J_2 = \frac{\int_{t_1}^{t_2} |u_f(t) - u_e(t)| dt}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

また, 上腕二頭筋と上腕三頭筋の両筋の同時活動は, 関節のインピーダンスを高め, さらに前腕の加減速に必要な筋の収縮を増大させる。そこで, 両筋の収縮力の和 ($u_f + u_e$) から, 駆動力に比例する両筋の収縮力の差 ($u_f - u_e$) を差し引いた以下の式で指標 J_3 を, 両筋の同時活動により増大した粘弾性によって浪費されるエネルギーに関する評価式として定義する。

$$J_3 = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (u_f(t) + u_e(t) - |u_f(t) - u_e(t)|) dt}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

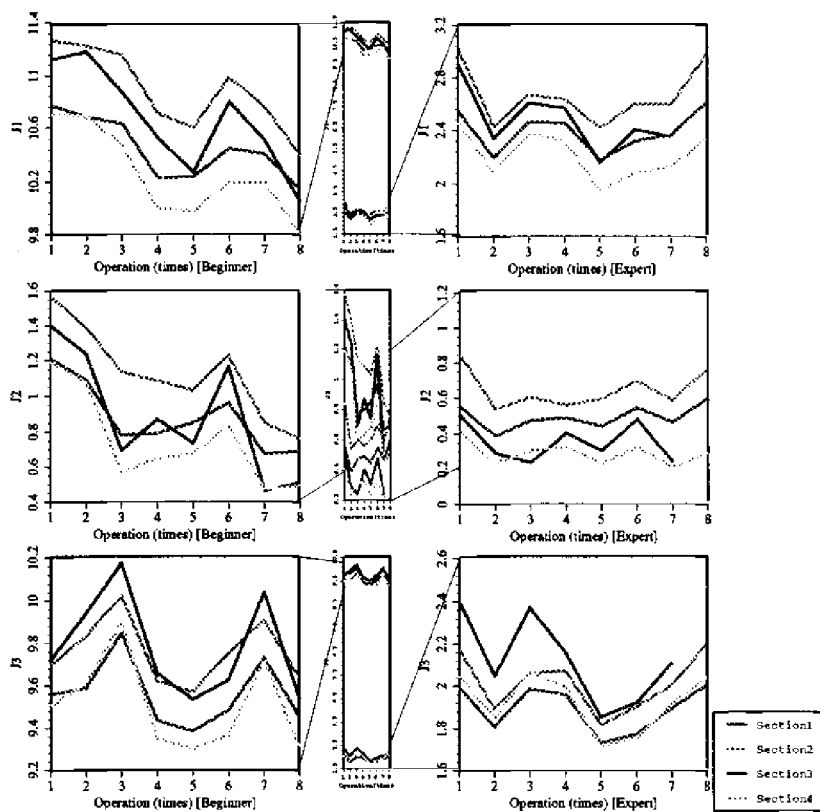


図9 各指標の変化

4.4 評価指標を用いた解析

前節で定義した評価式を、各区間の位置決め動作ごとに計算し、80秒間で完了した動作で平均した結果を図9に示す。(熟達者の区間3での指標値は、計算不能であったためプロットされていない。)

指標 J_1 は、粘弾性に関する指標である。未経験者は、熟達者に比べ関節での粘弾性が非常に大きい。また、習熟していく過程で徐々に粘弾性を減少させていくこと分かる。前腕が加減速される区間1~3で指標値が大きくなっているが、これは加減速に伴う筋の収縮のためであると考えられる。

駆動トルクに関する指標が、指標 J_2 である。未経験者は、関節の粘弾性を非常に大きい状態で動作を行うため、大きな駆動トルクを必要とする。また、習熟過程で粘弾性を減少させていくにつれて、駆動トルクも減少していくことが分かる。区間別に見ると、手先加速度(角加速度)のピークから手先速度(角速度)のピークまでの区間2で、最も大きな駆動トルクを、熟達者の場合は、次いで動作開始時から手先加速度(角加速度)のピークまでの区間2で、大きな指標値を取っている。減速をする区間3では、指標値が小さくなっているこ

とからも、減速動作は主に粘弾性を利用しておこなわれていることが分かる。一方、未経験者の場合は加速をおこなう区間2に比較して、減速をおこなう区間3での指標値は、場合によっては値が大きくなっている。このことから、未経験者の場合、減速動作では、粘弾性だけでなく、減速トルクを利用しているのではないかと考えられる。

指標 J_3 は、両筋の同時活動により増大した粘弾性によって浪費されるエネルギーに関する指標である。未経験者では関節の粘弾性が非常に大きいため、結果的にエネルギー浪費も大きくなる。また、関節の粘弾性に関する指標 J_1 や指標 J_2 と比較して、8回の経験を通して明らかな減少傾向は見られない。熟練者の場合には指標値が非常に小さな値を取っていることから、エネルギー浪費はより経験を積まなければ減少できないのではないかと考えられる。

5. 結言

本研究では、肘関節インピーダンスが前腕位置決め動作の習熟過程でどのように変化するかを、筋電位情報をもとにした指標を用いて分析を試みた。そして、本研究で用いた実験装置での作業未経験者と、作業に熟達した2人の被験者の動作データを比較し、指標を用いた分析により以下のようなことが確認された。

熟達者の位置決め動作に比べると、未経験者の動作では関節の粘弾性が非常に大きく、前腕駆動に必要な駆動トルクも大きい。そのため、エネルギー消費が非常に大きくなる。また、習熟過程の早い段階で粘弾性を減少させていき、それに伴って駆動トルクも減少させていくが、効率的な作業の習熟にはより多くの経験が必要と思われる。

現時点の問題点は、以下の2点である。関節角度はエンコーダを用いて測定しており、実験途中での被験者の姿勢変化(身を乗り出すなど)によって実際の関節角と、測定値とに誤差が生じていることが予想される。また、筋電位情報に収縮力に対してのキャリブレーションは行っているが、オフセットに対するキャリブレーションは行って

いない。このため、指標での評価の正確性に疑問が残る。以上の点を改善し、より長時間での習熟過程について、データを収集する必要がある。

参考文献

- [1] 辻, 横山, 三木, 伊藤 : 回転作業における人間の運動制御方策, 第5回生体生理工学シンポジウム論文集, pp.41-44 (1990)
- [2] 横山, 辻, 伊藤 : 回転作業における人間の運動制御方策の解析, 信学技報, MBE 90-137, pp.103-110 (1991)
- [3] 菅野, 波元, 加藤 : 拘束動作における手・腕協調動作の分析, 第12回バイオメカニズムシンポジウム前刷, pp.293-304 (1991)
- [4] Flash, T. and HoganÅCN : The Coordination of Arm Movements, As Experimentally Confirmed Mathematical Model, J. of Neuro-sicences, vol. 5, no. 7, pp. 1688-1703 (1985)
- [5] 柴田論, 大場光太郎, 猪岡光 : 位置決め精度が必要な人間上肢運動に関する実験的考察, 人間工学会 vol.29, no.5, pp.279-287 (1993)
- [6] 南京政信 : 人間オペレータの動特性を考慮したマスターアームの操作性に関する研究, 東北大学大学院工学研究科機械工学専攻修士学文位論文 (1993)
- [7] 小林秀明 : 生体信号を用いた操作機の操作性評価に関する研究, 東北大学大学院工学研究科機械工学専攻修士学文位論文 (1994)
- [8] 小林ら: 位置決め動作におけるインピーダンス特性の実験的考察, 人間工学 第32巻 特別号, 48/49, (1996)
- [9] 羅志偉, 伊藤広司, 伊藤正美, 加藤厚生 : 接触動作における関節インピーダンス制御の双線形モデル, 計測時動制御学会論文集, vol.27, no.9, pp.1070-1072 (1991)
- [10] 伊藤(宏)ら : 筋骨格系の双線形特性と義肢制御への応用, 電気学会論文誌, C,105-C, 201/208 (1985)