

氏名(本籍)	小 ^こ 林 ^{ばやし} 秀 ^{ひび} 明 ^{あき}	(長野県)
学位の種類	博士(情報科学)	
学位記番号	情博第49号	
学位授与年月日	平成9年3月25日	
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当	
研究科, 専攻	東北大学大学院情報科学研究科(博士課程)システム情報科学専攻	
学位論文題目	上肢の位置決め制御動作に関する研究	
論文審査委員	(主査) 東北大学教授 猪岡 光 東北大学教授 中野 栄二 東北大学教授 谷 順二 東北大学助教授 石原 正 (工学研究科)	

論文内容要旨

第1章 序 論

近年要求が高まりつつある医療・福祉ロボットや、マスタ・スレーブマニピュレータなどの人間・機械システムにおいては、人間との間で力学的な相互作用を伴ったり、人間の意志の伝達手段として用いられりするため、人間の特性を考慮しなくてはならない。そのため、人間の作業中の制御特性を調べる必要がある。人間の上肢の特性を表現するのに、インピーダンス(スティフネス、粘性、慣性)が用いられている。人間の上肢の特性をインピーダンスを用いてモデル化することで、人間と機械の相互作用を有するシステムに応用されている。また、人間との接触を必要とするような環境においては、ロボットマニピュレータの制御方法としてインピーダンス制御が有効である。このことから、人間の作業中の制御特性として、インピーダンス制御特性を調べるのが有効である。

従来の研究では、筋活動度一定の姿勢保持状態か、もしくは、運動中の計測であっても最終的な位置決め精度は指示しない随意運動についてのインピーダンス計測がされてきたが、実際には位置決め精度が要求される作業が多い。よって、位置決め作業についての計測をする必要がある。また、手先に生じる力、または、トルクを力センサを使用して計測している例が多いが、手先力よりも筋力による計測の方が、より人間の腕の特性を表現できると考えられる。

本論文では、作業として位置決め動作を行わせて、作業中の上肢の制御特性を調べ、手先力でなく、人間の腕の特性を表現するのに適していると考えられる筋力を用いる。筋力は、筋電位を用いて推定する。位置決め精度の難易度は、位置決め精度、表示倍率により様々な難易度を設定する。さらに、これらの上肢の制御特性をふまえて、人間の感覚である操作器の操作性を筋力データから評価する方法を提案する。

第2章 筋骨格系

筋は、収縮力に比例して変化する粘弾性特性を持つ。筋の可変粘弾性特性をモデル化し、上肢の筋骨格系に用いたものが、図1に示す双線形モデルであり、この運動方程式は、次のようになる。

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

ただし、 u_f , u_e は上腕二頭筋、上腕三頭筋の収縮力、 k , b は定数、 I は前腕の慣性モーメントである。この式は、両筋の差が駆動トルク、両筋の和が関節の粘弾性特性を調節し、しかも独立に調節できるという筋骨格系の特徴を良く示している。

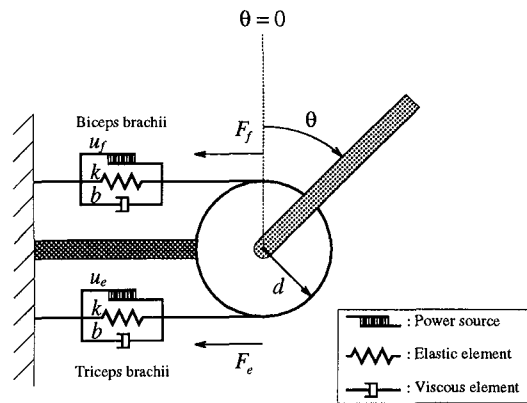


図1 上肢筋骨格系の双線形モデル

第3章 トルク外乱補償動作における筋の特性

図2のような実験装置を用い、トルク外乱補償動作による位置決め制御動作を行った。回転方向に1自由度の操作器を用い、肘の屈曲運動のみとなるようにすることで、動作する筋が上腕二頭筋と上腕三頭筋のみとなり、第2章で述べた双線形モデルをもとに解析することが可能となる。操作器にはトルク外乱が加わり、オペレータは、指定された位置決め精度内に操作器の位置が収まるように操作する。

ここで考えられる上肢の制御方法としては、(1)式で表される双線形モデルより2つ考えられる。1つは、主動・拮抗筋を同時に収縮させて関節スティフネスを高める制御である。この場合、関節を固定し動きを制限することができ、トルク外乱を相殺できる。よって、位置決め精度が高まれば、その分だけ関節スティフネスが増加するようになると考えられる。2つめは、駆動トルクによる制御である。この場合、トルク外乱は、駆動トルクで相殺し、操作器の位置の変動は、駆動トルクにより抑える。よって位置決め精度が高まれば、その分だけ駆動トルクが増加するようになると考えられる。この2つの特性を調べるために、関節スティフネス、駆動トルクについての指標をそれぞれ J_1 , J_2 として次式で定義する。

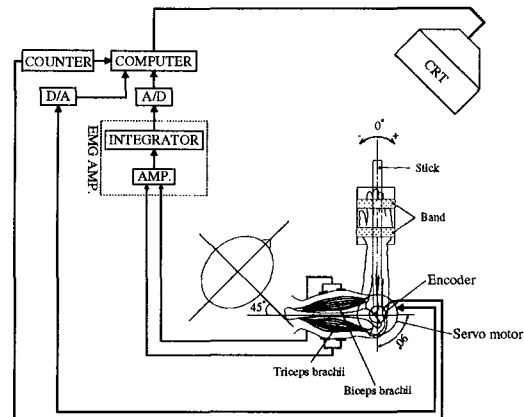


図2 実験装置

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

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

ここで、 $u_f(t)$, $u_e(t)$ は上腕二頭筋、上腕三頭筋の収縮力、 t_1 , t_2 は、それぞれ、指標を計算する開始時刻と終了時刻を示す。

結果としては、位置決め精度が高い時の方が、関節スティフネスが大きくなる傾向があった。一方、駆動トルクは、位置決め精度による指標値の差はあまり大きくなかった。よって、トルク外乱が与えられた時の位置決め制御動作時の上肢の制御は、関節スティフネスの制御によるものと考えられる。また、駆動トルクの運動指令と、関節スティフネスを高める運動指令が独立して与えられていることも確認された。

第4章 補償動作における筋の特性

図2のような実験装置を用い、補償動作による位置決め動作実験を行った。オペレータには、目標軌道と操作器の位置の偏差が表示される。そして、その表示を指定した拡大率によって拡大して表示する。オペレータは、目標軌道との偏差を減少させるように操作する。位置決め精度は、拡大率に関係なく一定である。

第3章で述べたように、上肢の制御には、関節スティフネスを高める制御と、駆動トルクによる制御の2つがある。関節スティフネスを高めると、関節を固定して安定な状態を保つことができる。位置決め精度が高まれば、操作が難しくなるため、その分関節スティフネスを増加させることで、安定な状態にすると考えられる。一方、駆動トルクによる制御では、位置偏差をなくすように、その分だけ駆動トルクを発生し、操作器の位置を位置決め精度内に留めようとする動作になる。よって、位置決め精度が高まれば、修正動作を頻繁にしなければならず、その分だけ駆動トルクが増加するようになる。そこで、前章と同じく(2),(3)式を用いて補償動作における筋の制御特性を調べた。

結果としては、関節スティフネスは、画面表示の拡大率が大きい方が、関節スティフネスが大きくなっている傾向があった。また、駆動トルクも、関節スティフネスと同様な傾向を示した。よって、補償動作では、作業条件に応じて関節スティフネスを調節し安定な状態を保った上で、駆動トルクによる制御をしていると考えられる。また、視覚フィードバックの違いでも腕の制御形態を変化させることが分かる。

第5章 ステップ操作における筋の特性

図2のような実験装置を用い、ステップ運動による位置決め動作実験を行った。目標位置は予め示されており、オペレータは、指定された目標位置に素早く操作器の位置を合わせる。この時、目標位置には、拡大率と位置決め精度の両方のパラメータが設定されている。

操作の特徴として、オーバーシュートは、最大速度に比例して増加し、最大加速度が最小加速度と比例関係にあることが見られた。また、駆動トルクと静止力も、比例関係がある。動作前半の動作では、加減速の大きさや減速のタイミングにこのような一定の法則があり、動作前半の動作はオープンループ的な制御となっていることが示された。神経の伝達速度などの要因から素早い動作中にフィードバックが働かず、このようなオープンループ制御となると考えられる。

関節スティフネス、駆動トルクの制御は、位置決め精度、拡大率に関わらず一定であった。目標近傍での修正動作では、高速動作からの動作であるため、視覚フィードバックが必要であり、拡大率が大きくなればその傾向は強まるが、視覚フィードバックは遅いために、目標近傍での修正動作も、位置決め精度、拡大率の影響をあまり受けないと考えられる。その後、筋力を次第に弱め、視覚フィードバックによる位置決めとなるが、この場合、前章までの実験と違い操作器の動きは十分予測可能である。このような場合では、駆動トルクのみでの制御になり、不必要に関節スティフネスを高める必要がなくなっていると考えられる。

第6章 筋電位を用いた操作性評価法

第3章、第4章、第5章で示された結果、すなわち関節スティフネスを作業環境によって変化させているということから、関節スティフネスの制御状態を、操作器の操作性の評価に応用した。関節スティフネスに基づいた指標を、次式で定義する。

$$J_1 = \int_{t_d}^{t_s} (u_r(t) + u_e(t)) dt \quad (4)$$

ここで、 $[t_d, t_s]$ は、指標を計算する時間を示す。提案した操作性指標の有効性は、筋電位を用いて実験により確認した。

指標の結果の例を図3に示す。操作性のパラメータは操作器の粘性係数 B_m である。図から分かるように、指標の最小値がオペレータによる主観的に操作性がよい範囲(図のハッチングの部分)に入っており、オペレータの評価と指標による評価が合っていることを示している。実験の結果、ゆっくりとした追従動作では、関節スティフネスに基づいて定義された指標がほぼオペレータの評価と同一となった。ステップ操作では、保持動作での指標の値で操作性を評価でき、さらに、操作対象が、動特性として一次遅れ要素を持つ時においても、指標の有効性が確認できた。よって、関節

スティフネスに基づいた指標により，操作器の操作性が定量的に評価できることが示された。

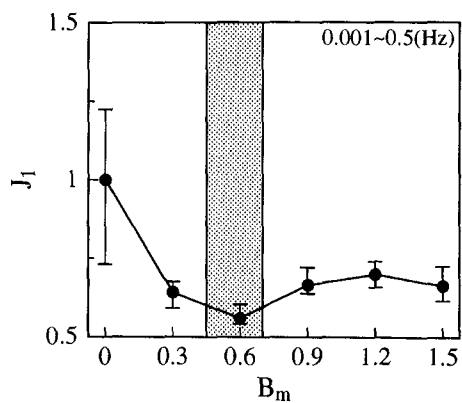


図3 カットオフ周波数 0.5 Hz

第7章 結 論

本章では，本論文の総括として各章の結論をまとめている。

審査結果の要旨

人間・機械システムがその機能を十分に発揮するためには、インターフェースのための操作器の特性が、人間の特性と合うことが必要である。しかしながら、人間が力を発生して操作器を操作する際の特性についての知見は少なく、その解明が望まれている。本論文は、上肢の位置決め動作における人間の制御特性について、筋電位を用いて種々な角度から行った研究成果をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、上肢の特性に関連する筋骨格系の特徴と双線形モデルについて述べている。

第3章では、トルク外乱に対する補償動作をオペレータに行わせ、位置決め精度による上肢の制御特性の変化を、関節スティフネス調整と駆動トルク調整の観点から考察している。位置決め精度を高くすると、駆動トルクの変化はなく関節スティフネスのみが大となることを明らかにしている。これは、駆動トルクの運動指令と、関節スティフネスを高める運動指令が独立していることを示唆しており、重要な知見である。

第4章では、目標軌道と実際の出力との偏差に対する補償動作をオペレータに行わせ、画面表示の拡大率変化のもとでの上肢の制御特性を調べている。拡大率を大とし困難な制御とした場合、関節スティフネスと駆動トルクがともに大となる。すなわち、偏差に対する補償動作では、作業条件に応じて関節スティフネスを調節し、安定な状態を保ちながら、駆動トルクにより制御をしていることになる。

第5章では、一定の目標値に対するステップ操作をオペレータに行わせ、位置決め精度と出力の拡大率を変化させた場合の制御特性を調べている。制御動作の前半部は開ループ的な制御であること、関節スティフネスと駆動トルクの制御は位置決め精度に影響されないなど、興味ある知見を得ている。

第6章では、位置決め動作で使用する操作器の操作性を取り上げ、関節スティフネスに基づく操作性指標を提案している。操作器の粘性を変化させて追従動作をオペレータに行わせ、提案する操作性指標を筋電位から求め、オペレータの主観的な操作性の評価と比較し、両者が良く一致することを確認している。本指標は操作性を定量的に評価するものであり、操作器の設計において重要な指針となる。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、筋電位を用いて位置決め制御動作における上肢の制御特性を明らかにすると共に、操作性の定量的な指標を提案しその有効性を示したものであり、人間工学、ロボット工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。