

## 学位論文題名

## ヒトの上肢運動における軌道計画とその応用に関する研究

## 学位論文内容の要旨

ヒトは複雑なメカニズムを持つ身体を巧みに制御し、多様な運動を優雅に実現している。このようなヒトの優れた運動制御機能を明らかにすることは、ヒトの運動の本質を理解するために必要不可欠であるばかりではなく、高度な制御能力をもつマニピュレータや自然な制御感覚をもつ動力義手などの開発に、有効な手段を与えるものと考えられる。本研究はヒトの上肢の基本的な動作である2点間到達運動を研究対象とし、上肢の運動軌道がいかに計画されているかを解明するとともに、この成果をマニピュレータへ応用することで、作業能力および効率が大きく改善できることを示す。

はじめに、ヒトの上肢運動で重要な役割を担う筋肉の粘弾性特性を解析して、この特性を表現する筋肉のモデル化を行うとともに、筋肉を含めた上肢の運動モデルを構築する。さらに、軌道決定の規範として筋肉の活動度に対応する等尺性張力を用いて評価関数を定義し、最適軌道生成の定式化および最適解探索のアルゴリズムの構築を行う。また、視覚情報を主体とした軌道解析システムを構築して、拘束がない自由な動作条件のもとで2点間到達動作実験を行い、ヒトの上肢運動の軌道を解析する。この観測軌道と提案する規範のもとで生成した軌道を比較・解析して、筋肉の粘弾性特性がヒトの軌道計画で重要な役割を果たすことを示すとともに、従来までの研究では必ずしも明らかにされていなかったヒトの運動軌道の個体差が粘弾性の係数の相違に起因していることを示す。

このように、筋肉の粘弾性特性を考慮したヒトの軌道計画の解析から、運動軌道の決定に筋肉の力学的な特性が大きく関与していることが確認できたことは、ヒトの運動原理の理解にとって重要な意味を持つ。しかし、ヒトの軌道計画の本質を明らかにするにはさらに精度の高い軌道決定の規範を構築するとともに、ヒトの運動軌道の生理的な利点を解明しなければならない。そのために、まず筋肉の収縮時の挙動を忠実に表現できる運動モデルおよび収縮の過程で筋肉が生理的に消費するエネルギーを表現する数学モデルを求める。また、筋肉で消費するエネルギーと筋肉の挙動を決定する状態量(等尺性張力、外部に作用する張力および短縮速度)の関係を定量的に解析することで、ヒトの軌道計画における最も妥当な規範として筋肉の等尺性張力(関節レベルではトルク)の時間微分最小規範を提案する。さらに、この規範にもとづいて生成した軌道は、(1)手の経路は直線とは限らず、特定の動作領域で曲線となる(2)動作条件の変化にかかわらず、手の速度パターンは常にベル状である(3)動作時間がある範囲で変化しても、手の経路と速度パターンは不変(invariant)である、といったヒトの運動軌道の特性を再現すること示す。また、動作実験で得た観測軌道とこの規範を含む代表的な規範のもとで生成した運動軌道を定量的に解析して、ヒトの運動軌道は運動中に消費するエネルギーを十分に抑制したものであることを明らかにする。

次に、二つの視点からヒトの軌道計画のマニピュレータへの応用に関する研究成果を述べる。第一はヒトの運動軌道を目指したマニピュレータの軌道計画である。ヒトの上肢とマニピュレータではその機構学的な構造は類似しているものの、動力発生機構であるヒトの筋肉とマニピュレータの駆動モータでは明らかに特性が異なる。従って、ヒトの運動軌道と同一の特性を有する軌道を生成してマニピュレータに適用するには、ヒトの運動軌道を幾何学的視点から分析し、この軌道の特徴を幾何学的に表現する軌道計画を考察するのが適当である。この場合、ヒトの筋骨格系の複雑さや現在の所未解決の筋肉の過渡的な運動特性に拘束されずに軌道計画を行えるので、保持質量や動作時間などの動作条件の変化に柔軟できる軌道計画が可能となる。このような視点からヒトの運動軌道の作業座標および関節座標空間における特性を分析して、ヒトの運動軌道と同一の特性を持つ軌道を生成するための評価関数を定義する。さらに、解法が極めて難解でマニピュレータの軌道計画の障害となっている最適軌道生成問題に対して、関節角の軌道を微分方程式で近似することで、簡潔な手順でしかも十分に高い精度で最適軌道が近似できることを示す。また、動作実験結果との比較を行い、この規範のもとで生成した軌道がヒトの運動軌道を表現していることを検証する。さらに、この軌道計画手法で生成する軌道は動作の開始と終了位置が同一のとき、他の動作条件が変化しても運動軌道が不変であるといったヒトの運動軌道と同一の特性を持つことを理論的に示す。

第二の応用に関する研究成果は消費エネルギー最少規範にもとづくマニピュレータの軌道計画である。ヒトの運動軌道が生理的な利点を追求して計画されているとすれば、マニピュレータにとって消費エネルギーを最少にする軌道計画は工学的な利点にもとづいた重要な研究課題である。この場合、特定の規範にもとづく最適制御といった視点から、ヒトの軌道計画と同一の枠組みでマニピュレータの軌道計画を論じることが可能である。基本的にはヒトの上肢のパラメータとエネルギー消費特性をマニピュレータに置き換えるだけで最適軌道を生成することができる。まず、マニピュレータが運動中に消費するエネルギー消費量を求め、さらに構造上必然的に制約される駆動モータのトルク限度のもとで消費エネルギー最少規範による最適制御問題を定式化する。また、2自由度のマニピュレータモデルを設定してシミュレーションを行い、動作時間を考慮した最適軌道の利点を定量的に明らかにするとともに、ここで提案する軌道計画を適用することで、マニピュレータの作業効率が大きく改善できることを示す。

# 学位論文審査の要旨

主査 教授 島 公 脩  
副査 教授 土 谷 武 士  
副査 教授 山 本 克 之  
副査 教授 新 保 勝  
副査 助教授 石 動 善 久

## 学位論文題名

### ヒトの上肢運動における軌道計画とその応用に関する研究

近年、ヒトの優れた運動制御機能の解明を目指した基礎的な研究として、ヒトの上肢運動における軌道計画に関する研究が広く行われている。しかし、その多くは幾何学的あるいは力学的な視点から軌道計画を考察したものであり、生理的視点からの研究はほとんどないのが現状である。

本論文は、ヒトの上肢の2点間到達動作を研究対象とし、ヒトの上肢運動における軌道は何らかの評価規範を最小とするように計画されているとの立場から、ヒトの運動原理を研究するとともに、マニピュレータの軌道計画への応用を研究しており、その主要な成果は次のように要約される。

(1) ヒトの上肢運動で重要な役割を担う筋肉の粘弾性特性を解析して、粘弾性係数が陽に表れる形で筋肉の特性を双線形関数で近似し、その上で複数の筋肉で構成する関節部を筋肉の特性にもとづいてモデル化している。次に、筋肉のエネルギー消費と密接に関係する筋肉の等尺性張力(関節レベルではトルク)を用いて軌道決定の規範を定め、最適軌道生成の定式化を行うとともに、最適解探索のアルゴリズムを示している。また、拘束がない動作条件のもとでヒトの自然な動作の運動軌道を計測するために、視覚情報を主体とした軌道解析システムを構成し、垂直面内でのヒトの運動軌道を求めている。そこで得られた軌道と生成した軌道を比較することで、ヒトの運動軌道における筋肉の粘弾性特性の関与を解析し、同時に筋肉の粘弾性係数を推定している。これにより、従来までの研究では明らかにされていなかったヒトの運動軌道の個体差を筋肉の粘弾性係数の相異により説明している。

(2) ヒトの軌道計画に対する理解をさらに深めるために、筋肉の力学的な挙動および生理的に消費するエネルギーを詳細に表現する数学モデルの構築を行い、これらを用いて筋肉のエネルギー消費と筋肉の状態量(等尺性張力、外部に作用する張力および短縮速度)の関係について定量的な検討を行っている。それをもとに、ヒトの軌道計画における規範として筋肉の等尺性トルクの時間微分最小規範を提案し、これを最小とする軌道がヒトの運動軌道を再現していることを動作実験およびシミュレーションにより検証している。また、この軌道は他の代表的な規範を用いて生成した軌道に比べ、ヒトの運動軌道に最も良く一致し、しかも運動中に消費するエネルギーが最小であることを定量的に解析し、提案する規範の妥当性を示している。

(3) ヒトの運動原理の解明と並行して、ヒトの運動軌道を分析し、この軌道の特徴を実現する観点からマニピュレータの軌道計画を提案している。まず、ヒトの運動軌道は特定の動

作領域で手の位置または肩と肘の関節角の経路が線形関係を示すことに着眼し、このような特性を持つ軌道を生成するための規範を手の位置と関節角の躍度およびこれらを結合する重み関数で定義している。次に、解法が難解でマニピュレータの軌道計画の障害となっている最適軌道生成問題に対して、関節角の軌道を6階の微分方程式で近似する近似最適軌道の生成手法を提案している。そこで得られた軌道は高精度で最適軌道を近似し、またヒトの運動軌道を再現していることを確認している。さらに、この軌道はヒトの運動軌道が持つ動作時間および保持質量に関する不変性を保存していることを理論的に示している。(4) ヒトの軌道計画のより直接的な応用として、ヒトの上肢のパラメータとエネルギー消費特性をマニピュレータに置き換えることで、基本的にはヒトの軌道計画と同一の枠組みで消費エネルギー最小規範によるマニピュレータの軌道計画を検討している。具体的には、構造上必然的に制約される駆動モータのトルク制限のもとで、動作時間を考慮した消費エネルギー最小規範による軌道計画問題として定式化している。また、2自由度のマニピュレータモデルを用いてハンドの移動位置と保持質量を変化させた時のシミュレーションを行い、この軌道計画手法を適用することで、マニピュレータのエネルギー消費特性が大きく改善できることを定量的に示している。

これを要するに、著者は、ヒトの上肢運動における軌道計画に関して、ヒトの運動軌道と筋肉の粘弾性特性の関係および筋肉の生理的特性にもとづいたヒトの運動原理について新知見を得るとともに、その応用としてマニピュレータの軌道計画手法を提案したものであり、生体工学および制御工学に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。