



|              |  |
|--------------|--|
| Title        | ヒト上肢多関節運動における最適軌道の生成と制御  |
| Author(s)    | 宇野, 洋二   |
| Citation     | 大阪大学, 1988, 博士論文   |
| Version Type |  |
| URL          | <a href="https://hdl.handle.net/11094/35937">https://hdl.handle.net/11094/35937</a>  |
| rights       |  |
| Note         | 著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed</a> 大阪大学の博士論文について |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

|         |   |
|---------|---|
| 氏名・(本籍) | 宇野 洋二   |
| 学位の種類   | 工学博士  |
| 学位記番号   | 第 8200 号  |
| 学位授与の日付 | 昭和 63 年 3 月 25 日                                |
| 学位授与の要件 | 基礎工学研究科物理系専攻<br>学位規則第 5 条第 1 項該当                |
| 学位論文題目  | ヒト上肢多関節運動における最適軌道の生成と制御                         |
| 論文審査委員  | (主査) 教授 鈴木 良次<br>(副査) 教授 有本 卓 教授 有働 正夫 講師 川人 光男 |

### 論文内容の要旨

本論文は、随意運動の計算論的な観点から導かれる 3 つの問題（軌道決定、座標変換、制御）のうち、最初の軌道決定の問題を主に論じたものである。

ヒトが手がある位置から他の位置へ動かす場合、運動の始点から終点に至る軌道は一般に無数に存在し得るが、運動が遂行される時にはただ一つの軌道が選択される。ヒト上肢運動においては、概ね滑らかな軌道が生成されているが、このような軌道はどん基準で決定され、どのように制御されているのであろうか。

本論文ではヒト上肢運動における軌道生成に対する一つの数学的モデル（トルク変化最小モデル）を提案する。このモデルは最適軌道を定める評価関数を次のように定義することによって定式化される。すなわち、トルクの変化率の二乗を運動時間にわたって積分したものを評価関数とする。このモデルから計算された軌道（評価関数の値を最小する軌道）は、米国 M. I. T. の研究者たちによって実験的に見いだされたヒト上肢運動の特徴を非常に良く再現した。更に、本研究ではヒト上肢の二関節（肩、肘）運動を計測する装置を製作し、様々な条件のもとで行動実験を行い、モデルから予測される軌道と比較した。その結果、2 点間を結ぶ自由運動、ある経由点を通過する運動、パネ等で拘束された運動などについてトルク変化最小モデルの有効性を確認することができた。

評価関数を用いて最適な軌道を決定する方法はロボットマニピュレータの軌道計画と制御に応用することも可能である。評価関数から定まる最適軌道を求めるには、マニピュレータのダイナミクスを拘束条件とする最適制御問題を解かねばならないが、これを解析的に求めるのは一般に極めて困難である。本論文では、最適軌道とそれに対応する運動司令（入力トルク）を同時に計算するような繰り返し学習

アルゴリズムを開発してこの問題を解決している。この方法は、数学的には、最適制御理論から導かれる非線形微分方程式の多点境界値問題を広義ニュートン法の繰り返しで解くものである。また工学的にも、このアルゴリズムを用いれば、逆運動や逆動力学の問題を直接解かずに、マニピュレータを繰り返し動かしそのときの軌道を何回か計測するだけで最適軌道とそれを実現する制御入力を同時に求めることができる。

広義ニュートン法に基づく繰り返しのアルゴリズムは直列計算であるが、本論文ではまた、オス決定の非線形最適化問題の解を並列分散処理によって求める多層の神経回路モデルも示す。ここで示された神経回路は次の2種類の並列情報処理を行って、最適軌道を実現することができる。まず、神経回路網のシナプス荷重の調整を行うことによって制御対象のダイナミクスを学習し順システムの内部モデルを形成する。次にユニット間の相互作用によってあるエネルギー関数の最小化を行い、トルク変化最小軌道を実現する。

### 論文の審査結果の要旨

ヒトが行う随意運動は、作業座標上での軌道決定、その軌道実現に必要な各関節の回転角の算出および上肢運動の制御という三つの問題に分けることが出来る。

本論文は、二点間の手先の移動運動に関しての最適な軌道決定の問題を主に扱っている。

手先の二点間移動の最適軌道については、すでに米国M I TのFlash, Hoganによる躍度最小モデルが提案されている。しかし、これは運動の適用範囲が限定されること、上肢の動力学的特性が考慮されていないなどの問題があった。本論文では、関節に与えるトルクの時間変化の自乗を運動時間にわたって積分したものを評価関数とする「トルク変化最小モデル」を提案している。

このモデルに従う最適軌道を求めるには、上肢の動力学的特性を拘束条件とする最適制御問題を解かなければならぬが、これを解析的に求めるのは一般にきわめて困難である。本論文では、最適軌道とそれを実現する入力トルクを同時に計算することの出来る繰り返し学習アルゴリズムを開発している。これは、数学的には、最適制御理論から導かれる非線形微分方程式の多点境界値問題を広義ニュートン法の繰り返しで解くものである。この方法によって得られた最適軌道はヒトの上肢の自由運動、経由点を通過する運動、バネなどで拘束された運動など広い範囲で実験結果と良い一致を示した。

モデルの評価にあたっては、制御対象として二関節系の運動方程式を用いているが、この解法を実際のマニピュレータに適用するとき、動特性を知らなくとも最適軌道と必要なトルクが同時に求められるというもので、工学的に応用可能なものである。

本論文では、さらに、軌道決定の非線形最適化問題の解を並列分散処理によって求める多層の神経回路モデルも示している。これは神経回路網のシナプス荷重の調整を行うことによって制御対象の動力学特性を学習し、得られた回路でのあるエネルギー関数の最小化を行い、トルク変化最小軌道を実現するというものである。

以上、本論文は隨意運動制御における最適化問題の解法に新しい手法を導入したもので、工学博士の論文として、価値あるものと認める。