Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-06-19

生体の運動制御における軌道計画規範に関する研究

中野, 恵理

(Degree)
博士（学術）
(Date of Degree)
1999-03-31
(Resource Type)
doctoral thesis
(Report Number)
甲2005
(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1002005

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。

氏名・（本籍）	中野恵理（兵庫県）
博士の専攻分野の名称	博士（学術）
学位記番号	博い第310号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位授与の日付	平成11年3月31日
学位論文題目	生体の運動制御における軌道計画規範に関する研究
審査委員	主査 教授 森脇俊道 教授 田中克己　教授 赤澤堅三 教授 松島隆二

論文内容の要旨

第一章　序論

平面内での多関節到達運動において，計画された手先軌道にはある普遍的特徴が観察され，またその曲率は前後運動と左右運動（あるいは上下運動）では異なることが知られている。脳はこのような運動を実行する際に，最適化原理に基づいて，軌道計画，座標変換，運動指令生成などに関する不良設定問題を解決し，実際に観察されるような普遍的特徴を持つ軌道を，予め計画していると考えられている。この未決定問題を解くための必要な拘束が，どのような空間で与えられているかについて，心理学や生理学からの先行研究を紹介しつつ議論した。先行研究では，特定の数ヵ所の場所で実行された運動が取り上げられてきたが，本研究では，定量的かつ統計的な検討のために，作業空間内の広い範囲で多数の軌道データを計測した。この軌道データに基づき，これらの軌道計画の空間を検証することを本研究の目的とした。

第二章　軌道計画の最適化モデルの提案

従来の研究において提案されてきた最適化理論に基づく軌道計画モデル（手先躍度最小モデル，関節角躍度最小モデル，トルク変化最小モデル，指令トルク変化最小モデル）を，モデルが指定する変数が定義される空間（外部座標・キネマティック，身体座標・キネマティック，身体座標・ダイナミック・メカニカル，身体座標・ダイナミック・ニューラル）に関して分類し，紹介した。次に本論文で提案する指令トルク変化最小モデルを説明した。指令トルク変化最小モデルは粘性を考慮している。この粘性は関節の受動的特性ではなく，筋肉が運動ニューロンからインパルスを受け取って張力を発生させるまでの生化学的な過程に由来すると考えられている。従ってトルクを計算する際に粘性を考慮するということは，腕のリングダイナミクスと筋肉の両方を制御対象とみなしていることになる。この意味で，指令トルクは筋張力を支配する運動指令の表現を近似していると考えられる。

第三章　軌道計画の空間の検証：二点間到達運動

多関節による二点間到達運動に関して行った二つの実験について述べる。平面内で行われた運動を計測したデータに基づき，軌道計画が外部座標系で行われているのか，身体座標系で行われているの

か，またダイナミクスも考慮しているのか，キネマティックのみを考慮しているのかについて検討した。肩と肘の回転の量と方向という意味では，各運動はそれぞれ水平面と矢状面の間で同じになるように設定された。これらの平面で対応する運動軌道の曲率はほぼ一致した。この結果は，手先軌道の曲率はダイナミックな表現を含む身体座標系と関係していることを示唆する。またこの曲率は肩と肘が同方向に回転する量（coordinated rotation of joints）から線形回帰で，高い精度で再構成できた。このことから，軌道の曲率は運動の行われる場所と方向に系統的に依存することがわかった。次に同じ軌道データを用いて軌道が計画される空間の次の４つの候補を検証した。第一は手先位置のデカルト座標や極座標等キネマティックな外部座標，第二は関節角度や筋肉の長さ等キネマティックな身体座標，第三はトルク，筋張力等ダイナミック・フィジカルな身体座標，第四はα運動ニューロンの発火頻度等ダイナミック・ニューラルな身体座標である。その結果，軌道の曲率，位置，速度，加速度，トルクなどの特徴全てに関して，第四の空間で定義される指令トルク変化最小モデルが最も実際の軌道に似た軌道を再現できた。またダイナミックな規範によれば，運動時間は手先軌道に影響することが予測される。運動時間の制限を緩めた水平面内での到達運動において，運動時間が長いと軌道は曲がるという指令トルク変化最小モデルの予測を支持する結果を得た。

第四章　軌道計画の空間の検証：経由点通過運動

経由点通過運動に関して行った実験について述べた。ここでは，被験者に経由点を通る運動を練習させて，計測された軌道の学習前後の特徴を各軌道計画モデルの最適軌道の特徴と比較した。その結果，身体座標系で定義されるモデル（関節角躍度最小，トルク変化最小，指令トルク変化最小モデル）が，学習後の手先軌道の特徴によく似た特徴を持つ軌道を予測した。CNS には最終的に指令トルクの空間や運動指令の空間など，より高次の空間で最適化を行うように学習するための指向性があると思われる。

第五章　全体の考察および結論

本研究において，運動時間や運動を行う場所と方向に依存して，手先軌道の曲率が異なることが，初めて定量的かつ統計的に示された。また軌道計画の空間の議論に関して，三つの実験で得られた全ての結果をまとめると，最も良く手先軌道の特徴を再現できるのは指令トルク変化最小モデルであることがわかった。従って，脳は身体座標において腕や筋肉のダイナミクスを考慮し，筋張力を制御する運動指令を反映した表現を用いて，手先軌道を学習かつ計画していると考えられる。

論文審査の結果の要旨

ヒトは多種多様で複雑な運動をほとんど意識せずに行っている。本論文は手先の運動に関する軌道計画規範について，理論的実験的な研究をまとめたものである。すなわち脳は到達運動を実行する際に，何らかの最適化原理に基づいて，軌道計画，座標変換，運動指令生成などに関する不良設定問題を解決し，実際に観察されるような普遍的特徴を持つ軌道を，予め計画していると考えられている。ここではこの未決定問題を解くために必要な拘束が，どのような空間で与えられているかについて検討したものである。

先ず第１章においては，心理学や生理学からの先行研究について検討し，本研究における目的を，多数の計測データに基づいてこれらの軌道計画の空間を検証すること，と設定している。

第２章においては，従来の研究において提案されてきた最適化理論に基づく軌道計画モデル（手先躍度最小モデル，関節角躍度最小モデル，トルク変化最小モデル，指令トルク変化最小モデル）を，

モデルが指定する変数が定義される空間（外部座標・キネマティック，身体座標・キネマティック，身体座標・ダイナミック・メカニカル，ダイナミック・ニューラル）に関して分類し，紹介している。ついで本論文で提案する指令トルク変化最小モデルについて説明を行い，何故指令トルクが運動指令を反映していると考えられるのかについて議論している。

第３章においては，多関節による二点間到達運動に関して行った二つの実験について述べている。先ず平面内で行われた運動を計測したデータに基づき，軌道計画が外部座標系で行われているのか，身体座標系で行われているのか，またダイナミクスも考慮しているのか，キネマティクスのみを考慮しているのかについて検討している。また，計測データを用いて最適軌道を予測し，軌道が計画される空間について議論している。それらの結果として，手先軌道の特徴は，身体座標系でダイナミクスに関連した変数で表され，また指令トルク変化最小モデルが最も良く実際の軌道の特徴を説明し得ることを明らかにしている。

第４章においては，経由点通過運動に関して行った実験について述べている。ここでは被験者に経由点を通る運動を練習させ，計測された軌道の学習前後の特徴を各軌道計画モデルの最適軌道の特徴と比較している。その結果，身体座標系で定義されるモデル（関節角躍度最小，トルク変化最小，指令トルク変化最小モデル）が学習後の手先軌道の特徴によく似た特徴を持つことを明らかにしている。

第５章においては本研究全体の考察を行い，運動時間や運動を行う場所と方向に依存して，手先軌道の曲率が異なることを，初めて定量的かつ統計的に示している。また軌道計画の空間の議論に関して，三つの実験で得られた全ての結果をまとめると，最も良く手先軌道の特徴を再現できるのは指令トルク変化最小モデルであると結論づけている。

以上，本論文は手先軌道計画の規範に関して新たな知見を得たものであり，生体の運動制御に関して重要な知見を得たものとして，価値ある集積であると認める。

よって学位申請者中野恵理は博士（学術）の学位を得る資格があると認める。