

論文内容の要旨

Abstract of Dissertation

氏名Name 武田 美咲

ヒト脳が持つ優れた情報処理機構の解明に向けて計算論的アプローチの研究が行われている。運動軌道制御の計算理論に焦点を当てれば、これまで最適化規範に基づく運動軌道生成モデルがいくつか提案されてきた。その中でも、Wada and Kawato (1993, 2004)の最適化原理に基づく計算論的軌道生成モデルは、指令トルク変化最小規範を計算理論とし、経由点を表現として順逆緩和型神経回路網 (FIRM) をハードウェアおよびアルゴリズムとしたモデルであり、到達運動のみならず書字運動のような複雑なヒト腕運動の特徴も良く再現した。しかし、これまでの軌道生成モデルは軌道自体の計画に重点が置かれ、運動時間の議論は十分ではなかった。一方、実験的には、Fitts' lawによって運動時間は手先終端の許容誤差により決まることが示されている。Fitts' lawは様々な条件でのヒトの運動において成立したが、その理論的妥当性は明らかではなかった。

本研究では、第一に、ヒト運動指令依存ノイズを前提とした腕ダイナミクスモデルに基づき運動時間から手先終端誤差を予測する理論的なモデルを導出した。モデルの終端誤差は運動時間に対して反比例の形で表され、定性的にはFitts' lawを支持するモデルである。本モデルの妥当性を検証するために、上肢到達運動の軌道計測実験を行った。運動時間に対するモデルにより予測された終端誤差と実際のヒトの終端誤差を比較した結果、モデルは0.0043 [m]ほどの平均平方二乗誤差で計測値と良く一致し、モデルの終端誤差の分布は、計測終端誤差の分布に近い形状を示した。また、モデルは実際のヒトの運動においてみられる速度と精度のトレード・オフを表し、運動方向によってばらつきが大きさが異なるというヒトの運動特性を捉えていた。さらに、Fitts' lawが回帰モデルであるのに対して、提案モデルは理論的に導出されたため回帰モデルではないにも関わらず、全運動時間にわたってFitts' lawと同程度の推定ができた。これらのことから、本モデルはFitts' lawを理論的に説明し、定量的にも支持したといえる。これにより、ヒト脳が運動時間を計画する計算理論の可能性を示唆した。

第二の研究では、従来の軌道計画モデルであるFIRMを展開し、第一の研究で得られた結果を用いて、運動指令の滑らかさと終端での許容誤差を考慮した運動時間計画を組み込んだ軌道計画モデルを提案した。提案モデルは、行動実験により取得した実際のヒトの運動においてみられる速度と精度のトレード・オフを良く再現し、計測された運動時間は前後左右の4つの方向の中で左方向において最も長く、後方において最も短いという方向依存性を再現した。モデルの運動時間の平均値と計測した運動時間の平均値の間の平均絶対誤差を算出した結果、モデルの運動時間は実際のヒトの運動時間に対して平均0.0883 [s]程度の誤差で一致した。提案したモデルにより計画した運動時間でFIRMにより生成した手先軌道および速度波形は、実際のヒト腕運動軌道の特徴を良く再現した。以上のことから、提案モデルにより推定した運動時間、軌道および速度波形は行動実験の結果を良く予測し、本モデルはヒト脳の運動時間の計算アルゴリズムの可能性を示唆した。

本研究ではヒト上肢到達運動の速度と精度のトレード・オフに主眼を置き、運動時間計画の計算論モデル構築に向けた2つの研究を行った。これら2つの研究の成果は、ヒト脳の情報処理のうち、特にヒト腕運動制御の運動時間計画メカニズムを解明するための重要な知見である。