

(様式3)

## 論文内容の要旨

氏名 横山 寛

脳は冗長な筋骨格系を巧みに制御し、多様な運動を可能とする。これにより、我々は特に意識することもなく日常生活における様々な動作をスムーズに行うことができる。しかし、我々が日常において無意識に行っている複雑な運動制御が脳内でどのようなメカニズムで実現されているのかについては、未だ議論がある。このような疑問を解決するため、脳科学では、計算論的神経科学と呼ばれる数理モデルを用いた研究アプローチから、運動の計画や実行において必要とされる計算原理とアルゴリズムについて議論してきた。特に、ヒト腕運動制御に関する研究では、水平面における2点間の到達運動を例に様々なモデルが提案されている。一方、神経生理学的な観点から運動制御のメカニズムを理解しようとするアプローチの研究もある。これらの研究では、実験・計測によって得られた行動指標と生理学的指標との間の相関関係から、運動制御に関わる脳の仕組みを理解していくアプローチを取っている。とりわけ近年では、拘束性が低く、より日常動作に近い運動における脳活動が計測しやすいというメリットから、機能的近赤外分光法(functional near-infrared spectroscopy: fNIRS)や脳波(Electroencephalogram: EEG)など非侵襲的な脳機能計測器を用いた研究が注目されている。以上からわかるように、ヒトの運動制御メカニズムの研究は、大きく分けて、2つのアプローチの研究があり、それぞれの研究を通し、得られた知見を包括的に議論しながら脳のメカニズムを理解していくことが重要である。本研究では、それぞれのアプローチに基づいた異なる2つの研究成果を例にヒトの運動制御メカニズムについて考察する。

1つ目の研究では、脳波の位相同期現象と運動切り替えのメカニズムとの関係について考察する。近年の研究において、脳波の位相同期現象が脳内のネットワーク構造と情報伝達のタイミングを反映していることが示唆されている。これらの知見は、脳が持つ高度な情報処理が、大域的な脳内ネットワークのダイナミクスに反映されている可能性を示している。そこで、我々は、脳波の位相同期現象に反映される脳内ネットワークのダイナミクスが運動制御においても重要な役割を果たしているという仮説から、階層クラスタリングをベースとする提案手法を用いて、運動切り替えに関する機能的な脳内ネットワークの同定を試みた。その結果、運動切り替えの際に $\alpha$ 帯域における右側頭頂部の同期が有意に増大していることが確認された。本研究成果より、機械学習に基づくデータ駆動的なアプローチと位相同期現象という生理学的な知見を組み合わせた解析手法を提案することで、脳内ネットワークのダイナミクスが、運動制御のメカニズムと深く関わっているという本研究の仮説を支持する結果を得た。そして、これらの結果は、運動メカニズムを理解する上で重要な情報が脳波の位相同期現象に反映されていることを意味している。

2つ目の研究では、ヒト腕運動において見られる特徴的な傾向と運動制御メカニズムの関係について議論する。ヒトを対象とした研究では、運動距離が異なる2つの類似し

た楕円軌道を連続的に描くような腕の運動を行った場合、運動距離の違いの有無に関わらず2つの軌道の運動時間は一定になるという現象(等時性現象)が知られている。しかし、そのような現象がどのような運動制御原理によって保証されているかは未だ不明瞭である。本研究では、指令トルク変化最小モデルに基づくヒト腕運動に関するアルゴリズムを拡張し、「運動距離に関わらず各運動区間のトルク変化の時間平均値(duration average of commanded torque change: DCTC)は一定となる」という数理的仮説を立てた。この仮説の妥当性を検証するため、本研究では運動距離の異なる2つの楕円軌道を含む運動を行い、運動距離が長い軌道(large loop)と短い軌道(small loop)の間の運動時間やDCTCの関係を検証した。その結果、運動時間は2つのloopの間の運動距離比にかかわらずDCTCの比率は一定となる一方で、運動時間の比率は運動距離比に相関し、緩やかに増加する傾向を得た。したがって、これらの結果は、本研究の仮説の妥当性を支持する結果であり、同時に、ヒトは指令トルク変化最小規範に基づいたヒト腕運動制御を行っている可能性を示している。そして、本研究ではさらに、予備的な考察として同様の実験課題における運動時の腕の筋電図の変化と関節トルクの間に関係が成り立つ可能性を示唆し、指令トルク変化最小規範に基づくヒト腕運動制御のメカニズムを筋活動のような生体情報を基に考察できる可能性を示した。

以上を踏まえて、本論文では、前述の2つの研究成果を基に、それぞれの観点からヒトの運動メカニズムについて考察し、包括的に議論した。