

論文審査の結果の要旨

氏名 瀧山 健

目的となる運動を達成するように、運動指令を修正していく学習過程を運動学習という。例えばリハビリテーション(以下リハビリ)などが、運動学習の例として挙げられる。本論文では運動学習の脳内メカニズムを理解するための手がかりとして、脳の構造、特に運動に関連する脳領域である運動野の構造に注目した運動野モデルに基づく理論的なアプローチを行っている。第2章では、運動野モデルを構成するニューロン数と運動学習の速度の関係を述べている。第3章では、運動野モデルに基づき、半球構造を利用することで、脳卒中患者に対して効果的なリハビリ方法が提案できることを示している。第4章では、運動学習中の運動野ニューロンデータを解析できる手法を提案した。

第2章では、運動野のモデルのニューロン数の冗長性を議論している。進化の過程と共に、ニューロンの数は指数的に増えている。その一方で、筋肉の数はあまり増えていない。このようなニューロンの数と筋肉の数が異なる構造を、ここでは冗長構造と呼ぶこととする。運動野モデルにおいても、冗長構造が顕著なモデルは説明能力が高いと考えられる。しかしながら、冗長構造が果たすそのほかの機能的役割は未だ明らかでなかった。そこで運動野モデルのニューロンの数のみを増減させ、冗長構造が顕著な場合とそうでない場合との比較を行った。その結果、冗長構造が顕著なほど運動学習の学習速度が速くなっていくことが理論的・数値的にあきらかになった。これは冗長構造が果たす機能的役割の一つとして、運動学習の学習速度の促進があることを示唆している。

第3章では、脳の半球構造と運動野モデルを組み合わせ、脳卒中のリハビリについて議論している。脳は左半球と右半球に分かれ、両半球の運動野間は脳梁により結ばれている。このような2半球が相互作用している2半球構造が運動学習に及ぼす影響は未だに明らかでなかった。右腕を動かすときは、左の運動野のみが主に活動することが知られている。また両腕を動かすときは左右の運動野が同時に活動し、脳梁を通じて両運動野が互いの活動に影響を及ぼすことが知られている。第3章では、これらの知見を元に、片腕運動時の運動野モデルと両腕運動時の運動野モデルとを比較し、2半球構造の機能的役割を検証している。その具体例として、脳卒中リハビリに着目して議論を行っている。従来の脳卒中リハビリ方法は、麻痺した腕のみを無理矢理使わせる片腕運動が主流である。その一方、麻痺した腕と健常に動く腕とを同時に動かす両腕運動により、片腕運動よりも効果的に麻痺が解消できる例が報告されている。しかしながら、全ての患者に両腕運動が有効なわけではない。

そこでここでは、なぜ両腕運動は脳卒中回復過程に有効なのか、両腕運動が推奨できる条件は何か、いう二つの問いをたて、運動野のモデルを用いて、その答えを理論的に

求めた。その結果、両腕運動と片腕運動とでは脳-脊髄経路に違いはなく、脳内情報処理に違いがあるため、両腕運動が脳卒中リハビリに有効な例があることを示した。加えて、左右の一次運動野間の結合強度が強い患者のみ両腕運動が推奨され、弱ければ片腕運動が推奨されることが示した。

第 4 章では、ベイズ推論を用いて実際のニューロン活動データを解析する手法を提案している。第 2 章、第 3 章で議論した運動野モデルは実際のニューロン活動データに基づいたモデルである。このモデルを検証するには、以下の二つの非定常性を取り扱える手法の開発が必須である。まず運動学習と共にニューロン活動は変化するため、試行間の非定常性が存在する。さらに、運動開始時や終了時などに不連続にニューロン活動が変化し、試行内の非定常性も存在することが予想される。第 4 章では、この 2 種類の非定常性を同時に解決し、より詳細に運動学習中の運動野ニューロン活動データを解析できる手法を提案した。本手法は、ニューロンの頻度の背後に存在する潜在構造として、頻度の平均値と分散が潜在構造ごとに異なるという確率モデルを用い、その潜在構造の数自体もデータのみから推定することに成功している。

以上のように、本論文の第 2 章、第 3 章では、運動野モデルに基づき、運動学習における運動野構造の冗長構造が果たす新しい機能的役割を提唱し、さらにリハビリ等に应用可能な知見を提唱することに成功している。また第 4 章では、これらの仮説を実証するために、新たなデータ解析手法を提案した。今後は、これらの知見にもとづき、新たな運動野モデルの構築とともに、新たな仮説を提唱が期待される。

なお、本論文第 2 章、第 3 章、第 4 章は岡田真人との共同研究であるが、論文提出者が主体となって解析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。

以上 1979 字