

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：13302

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2013～2016

課題番号：25430007

研究課題名（和文）空間表現に基づく身体運動の統一的計算論的モデルと運動野ネットワーク神経活動の解明

研究課題名（英文）Unified computational model of motor control based on spatial representation and understanding of neural activities in motor-related brain network

研究代表者

田中 宏和（Tanaka, Hirokazu）

北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・准教授

研究者番号：00332320

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,100,000円

研究成果の概要（和文）：身体の空間ベクトル表現に基づくニュートン・オイラー力学により第一次運動野（M1）が視覚運動変換を行っているという計算論モデルを提案し、M1神経活動における多様な性質を統一的に説明した。このモデルはヒト運動適応実験の汎化パターンなど様々な結果も説明できることを示した。M1に加えて、頭頂葉や小脳を含む運動野ネットワークのモデル化も試みた。小脳の神経活動をモデル化し、小脳の入力である苔状繊維から出力である小脳核で予測的な変換が行われていることが分かった。これらの計算論モデルから、運動野ネットワークにおける身体運動の予測と制御に関する神経表現や計算アルゴリズムを解明することができた。

研究成果の概要（英文）：I proposed a computational model of the primary motor cortex (M1) in which visuomotor transformation is solved through Newton-Euler dynamics with spatial representations, and explained a variety of findings about M1 neural properties in a unified way. In addition to neural properties, the model also explained various findings from human psychophysics of motor adaptation such as generalization patterns. Extending the model of M1, I attempted to construct a model of the motor-related network including the parietal cortex and the cerebellum. Especially, I discovered, by constructing a model of cerebellar activities, a predictive computation from inputs of the mossy fibers to outputs of the cerebellar nuclei. With these models, I clarified the neural representations and the algorithms with which the brain predicts and controls body movements.

研究分野：計算論的神経科学

キーワード：計算論モデル 脳科学 神経科学 運動制御 感覚処理 最適制御 最適推定

1. 研究開始当初の背景

第一次運動野 (Primary Motor Cortex, 以下 M1) は身体との体部位対応を持ち、錐体路繊維を通して脊髄運動ニューロンに投射するが、M1 が上腕の到達運動をどのように制御するかについて完全には理解されていない。加えて、M1 への上流である運動前野・後頭頂葉・小脳がそれぞれどのような計算的役割を担っているか、各部位間で情報がどのように伝達されて合目的でなめらかな身体運動が実現されているかについて、完全には理解されていない。運動制御の計算論的研究において、到達運動の計算論的モデルは最も詳しく研究されてきたが、行動データの再現に力点が置かれており、神経活動データの説明はほとんどなされていない。これは豊富な神経活動データを理解するための理論が完全ではないことを示唆しており、新たな計算論的枠組みが必要である。

2. 研究の目的

運動制御の計算論モデルを構築し、各計算過程がどの運動関連部位で行われているのかを解明することである。従来提案されてきた関節角の代わりにデカルト座標での空間ベクトルを用いると開リンク系の運動方程式が非常に簡略化され系統的になることを見いだした。空間表現に基づく運動方程式を用いて運動野は空間運動情報を到達運動ダイナミクスに変換していると仮定すると、第一次運動野の神経活動データを良く再現することができる。具体的には、以下の4点を目的とする。

- ・空間表現に基づく運動野ネットワーク(第一次運動野・運動前野・後頭頂葉・小脳)の計算論的モデルを構築する。
- ・上記の計算論的モデルの枠組みにおいて、従来提案されてきた軌道形成・座標変換・多感覚統合・最適制御の計算モデルを統合する。
- ・既に論文として発表されている運動野ネットワークの神経データを解析し、上記モデルのシミュレーションと比較することで、各部位の計算論的役割を明らかにする。
- ・提案する計算モデルに基づく新規なヒト心理物理およびサル電気生理実験を検証可能な形で提案する。

3. 研究の方法

本研究は数理解析と数値シミュレーションを用いた計算論的神経科学研究である。まず、空間表現に基づく運動野ネットワークモデルを構築し、従来提案されてきた軌道形成・座標変換・多感覚統合・最適制御の計算モデルを統合する。特に詳細な神経活動データが得られている第一次運動野のモデル化に注力し、モデルと神経活動データを比較することで本提案モデルが妥当であることを確立する。次に、初年度で構築したモデルを拡張し、運動前野・頭頂葉・小脳を含むネットワークモデルを構築する。モデルで必要とされ

る、軌道形成・座標変換・多感覚統合・順モデル予測・最適制御といった各計算過程からどのような神経活動が予測するかを検証可能な形でシミュレートし、既に論文として発表されている神経活動データと比較することで、運動関連各部位が果たす計算論的役割を解明する。

4. 研究成果

まず、神経活動が最も詳しく調べられている第一次運動野 (M1) の計算論モデルを構築した。従来用いられてきた関節角表現ではなく、身体運動を空間ベクトルとして表現し、その空間ベクトルから関節トルクへの変換をニュートン・オイラー運動方程式として定式化した。この視覚運動変換中に現れるベクトル外積を M1 神経活動と仮定すると、M1 神経活動の様々な性質が統一的に説明できることを示した。加えて、この計算モデルは運動適応の汎化パターンなど、ヒト心理物理実験の結果も説明することができる。

M1 の計算モデルに加えて、小脳(小脳皮質および小脳核)の計算モデルも構築した。これまでの臨床観察と心理物理実験から、小脳は身体の状態を予測する「順モデル」として働いていると考えてられてきたが、未だ神経活動からの直接の証拠はない。小脳の入力である苔状線維、小脳皮質の出力であるプルキンエ細胞、そして小脳の出力である小脳核細胞の神経活動を詳しく調べ、小脳のフィードフォワード回路で予測的な計算が行われているとする計算論モデルを構築した。小脳と大脳皮質のモデルを結合し、小脳が大脳皮質からの入力を予測するとする計算論モデルを構築し、大脳皮質の内部順モデルとしての小脳という描像を提案した。上記の研究は、大脳皮質運動野と小脳の計算論的連関を明らかにする初めての計算論モデルである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

1, Tanaka, H., Modeling the motor cortex: Optimality, recurrent neural networks, and spatial dynamics, Neuroscience Research, 査読有, 104, 2016, 64-71.

2, 田中宏和, 脳を理解するとはどういうことか ある計算論的神経科学者の頭の中, BRAIN and NERVE-神経研究の進歩, 査読無, 68, 2016 1379-1384.

3, Tanaka, H., & Sejnowski, T. J., Motor adaptation and generalization of reaching movements using motor primitives based on spatial coordinates. Journal of Neurophysiology, 査読有, 113, 2015 1217-1233.

4. Tanaka, H., Katura, T., & Sato, H., Task-related oxygenation and cerebral blood volume changes estimated from NIRS signals in motor and cognitive tasks. *Neuroimage*, 査読有, 94, 2014, 107-119.

[学会発表](計28件)

1. Tanaka H., Mobile Brain/Body Imaging for Natural Movements, MoBI (Mobile Brain/Body Imaging) Workshop, 2016年11月22日, San Diego (U.S.A.)

2. Kambara, H., Tanaka, H., Miyakoshi M., Yoshimura, N., Koike, Y., Makeig S., Directionally tuned signals in human EEG during step-tracking wrist movement, Neuroscience 2016 Annual Meeting, 2016年11月14日, San Diego (U.S.A.)

3. Tanaka H., Miyakoshi M., & Makeig S., Dynamics of directional tuning and reference frames in humans: A high-density EEG study, Neuroscience 2016 Annual Meeting, 2016年11月14日, San Diego (U.S.A.)

4. Tanaka H., Directional tuning and reference frames revealed by noninvasive EEG in humans: a computational MoBI study, The 31st International Congress of Psychology, 2016年07月26日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

5. Tanaka H., Dynamics of directional tuning and reference frames in humans: A mobile brain/body imaging study, The Japan-Europe International Meeting about Embodied Brain, 2016年05月31日, Taormina (Italy)

6. Tanaka H., Temporal dynamics of directional tuning and reference frames in human reaching task revealed with high-density EEG, The 1st International Symposium on Embodied-Brain Systems Science (EmboSS 2016), 2016年05月08日, 東京大学(東京都文京区)

7. Tanaka H., Directional tuning and reference frames revealed by noninvasive EEG in humans: a computational MoBI study, 第55回日本生体医工学会大会, 2016年04月28日, 富山国際会議場(富山県富山市)

8. Li L., Imamizu H. and Tanaka H., Is movement duration predetermined in visually guided reaching? A comparison of finite- and infinite-horizon optimal

feedback control, International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM) 2015, 2015年12月06日, 早稲田大学(東京都新宿区)

9. Satou H., Sasaki A., Nozaki D. and Tanaka H., Formation of internal forward model with sensory and reward prediction errors: A behavioral confirmation, International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM) 2015, 2015年12月06日, 早稲田大学(東京都新宿区)

10. Tanaka, H., How motor cortex represents body movements: Optimality, recurrent neural networks and spatial dynamics, IEEE The 24th International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), 2015年08月31日, 神戸国際会議場(兵庫県神戸市)

11. Tanaka, H., Miyakoshi, M., & Makeig, S., Movement Representation in the Motor System: Computational Modeling and EEG experiment, Brain Connectivity Workshop 2015, 2015年06月12日, San Diego (U.S.A.)

12. Tanaka, H., Miyakoshi, M., & Makeig, S., Coordinate Systems in the Motor System: Computational Modeling and EEG experiment, The 5th International Conference on Cognitive Neurodynamics, 2015年06月04日, Sanya (China)

13. 田中 宏和, 到達運動の運動方程式と頭頂前頭運動野の座標系, 第92回日本生理学学会 第120回日本解剖学会 合同大会, 神戸国際会議場(招待講演) 2015年03月21日, 神戸国際会議場(兵庫県神戸市)

14. 田中 宏和, Computing Reaching Dynamics in Motor Cortex with Cartesian Spatial Coordinates, Fetz 博士記念シンポジウム - Frontier of Systems Neuroscience of Motor Control (運動制御にかかわるシステム神経科学の最前線), 2014年09月14日, 国立精神・神経医療センター(東京都小平市)

15. 田中 宏和, 第一次運動野は空間ベクトルを用いて到達運動ダイナミクスを計算する, SICE 中部支部制御理論研究委員会ワーキングセミナー, 2014年09月11日, 名古屋大学(愛知県名古屋市)

16. 田中 宏和, Directional tuning and reference frames revealed by non-invasive EEG in humans, 第8回モーターコントロール研究会, 2014年08月09日, 筑波大学(茨城県つくば市)

17. Tanaka H., Miyakoshi M., & Makeig S., Directional tuning and reference frames revealed by non-invasive EEG in humans, Organization of Human Brain Mapping 2014 Annual Meeting, 2014年06月12日, Hamburg (Germany)

18. 田中 宏和, Sejnowski, T. J., 第一次運動野は空間ベクトルを用いて到達運動ダイナミクスを計算する, 視覚科学統合研究センターシンポジウム「視覚情報処理の新展開—局所回路から認知へ」, 2014年03月14日, 立命館大学(滋賀県草津市)

19. 田中宏和, 小幡亜希子, 桂卓成, アンダーサンプリング NIRS 信号からの瞬時心拍数測定法, 第 16 回日本ヒト脳機能マッピング学会, 2014年03月07日, 仙台国際ホテル(宮城県仙台市)

20. 田中宏和, 桂卓成, 佐藤大樹, 脱酸素化ヘモグロビンの共変動を用いた課題関連成分分析による血液量と血中酸素濃度変化の推定法, 第 16 回日本ヒト脳機能マッピング学会, 2014年03月07日, 仙台国際ホテル(宮城県仙台市)

21. 田中宏和, Sejnowski, T. J., 第一次運動野は空間ベクトルを用いて到達運動ダイナミクスを計算する, 脳と心のメカニズム第 14 回冬のワークショップ, 2014年01月09日, ルスツリゾートホテル(北海道留寿都村)

22. 田中宏和, 第一次運動野は何を表現し計算しているのか, Autumn School of Computational Neuroscience (ASCONe), 2013年10月12日, かたくらホテル(長野県諏訪市)

23. 田中宏和, 運動野の情報表現—計算論的モデル—, 身体性基盤研究会, 2013年09月30日, 東北大学(宮城県仙台市)

24. Tanaka H., Katura T., Sato H., Task-related component analysis for functional neuroimaging, Mobile Brain/Body Imaging (MoBI) Workshop, 2013年09月6日, Delmenhorst (Germany)

25. Tanaka H., Sejnowski T.J., Motor cortex computes reaching dynamics using Cartesian spatial coordinates, Mobile Brain/Body Imaging (MoBI) Workshop, 2013年09月6日, Delmenhorst (Germany)

27. 田中宏和, 桂卓成, 佐藤大樹, 課題関連成分分析法による NIRS 信号のヘモダイナミクス反応成分と全身性変動成分の課題およ

び刺激応答性, 第 15 回日本ヒト脳機能マッピング学会, 2013年07月06日, 東京大学(東京都文京区)

28. Tanaka H., Sejnowski T. J., Understanding movement representations in the motor cortex for functional recovery, Neuro2013 シンポジウム「計算論的間隔運動制御とリハビリテーションの統合」, 2013年06月21日, 京都国際会議場(京都府京都市)

〔図書〕(計1件)

1. Tanaka, H., Miyakoshi, M., & Makeig, S., Springer Singapore, Advances in Cognitive Neurodynamics (V), 2016, pp. 85-92.

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

https://www.jaist.ac.jp/is/keyword/list/tanaka_h.html

<https://www.youtube.com/user/ht2022columnbia>

6. 研究組織

(1)研究代表者

田中 宏和 (HIROKAZU TANAKA)

北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・准教授

研究者番号: 00332320