

令和元年5月16日現在

機関番号：13302

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12476

研究課題名(和文) 計算論モデルの予言に基づく筋シナジー操作とスキル獲得法への応用

研究課題名(英文) Control of muscle synergy based on computational model and application to skill acquisition

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：既に構築した運動学習モデルによって、運動学習に伴う筋活動の変化を説明することを試みた。Barradasら(2018)が行った仮想手術課題に着目し、モーメントアームが急激に変化する、もしくは徐々に変化する実験条件における筋活動の変化をモデルで再現した。その結果、筋活動パターンの分布が非等方性への変化もしくは等方性の維持という実験結果を再現できた。これはGolubら(2018)がサルでの電気生理実験で観測した運動野の神経活動パターンの分布の変化の特徴とも一致している。以上の研究によって、本研究で構築した筋シナジー運動制御仮説に基づいた運動学習モデルの情報処理が、実際に脳内で行われていると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

身体運動に含まれる高次元自由度を縮約し、シナジーと呼ばれる低次元自由度で効率よく制御を行うとする「シナジー制御仮説」が提唱されている。実験的にシナジーの存在は確かめられているものの、どのようにシナジーが獲得されているのかは未解明であった。本研究で構築した計算論モデルにより、運動学習の行動的・生理的・神経活動的特徴を系統的に調べることができ、報告された実験結果を説明することができた。本研究の成果に基づき、小脳モデル・脳波実験・信号解析法などといった今後に関わる展開も見せており、今後は運動制御に留まらず神経科学全般への発展が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Based on the computational model constructed already, we tried to explain changes in muscle activities observed during motor learning. We focused on the virtual surgery task of Barradas et al (2018) and reproduced the changes in muscle activities in two conditions of abrupt and gradual transformations of moment arms. Consequently, our model reproduced the experimental findings of non-uniform and uniform distributions of muscle activities in the two condition. This result is consistent with the changes of neuronal preference in the motor cortex reported in Golub et al. (2018). We therefore conclude that our computational model based on the muscle-synergy control hypothesis explains the information processing in the brain.

研究分野：計算論的神経科学

キーワード：計算論モデル 運動制御 シナジー 筋活動 スキル獲得

## 1. 研究開始当初の背景

ヒト身体運動には高次元の自由度があるが、主動筋と拮抗筋が独立ではなく一対の活動として制御されるように、観測される自由度は元々の自由度より小さい。身体運動で観測される低次元の協調的自由度を「シナジー (synergy)」として定義し、脳は高次元の独立運動自由度ではなく低次元の協調自由度内で制御するとする仮説を「シナジー運動制御仮説」と呼ぶ。ここ 20 年ほど、上腕運動・把持運動・歩行運動・バランス運動といった多様な運動がシナジー、すなわち協調的な低次元の自由度で記述されることを明らかにしてきた。このようにシナジーは多様な身体運動で報告されている一方、シナジー運動制御仮説に対しては根強い反対意見がある。バイオメカニクスの制約 (例: 主動筋と拮抗筋の作用が骨格により制限される) 課題の単調性 (例: 実験室課題では運動の多様性が限られる) またはシナジー抽出法 (例: 頻繁に使われる主成分分析はそもそも次元縮約の解析法) により、身体運動における見かけの自由度が低くなってしまおうという反論である。そのため、シナジー運動制御仮説は仮説の域を脱していない。この問題は従来のシナジー研究が単に実験データからのシナジー抽出に留まっていたことに起因すると考えられる。本研究では、シナジー運動制御仮説に基づく計算論モデルを構築し、運動課題に応じてシナジーがどのように変化すべきかに関して定量的な予言を行うことで、シナジー仮説を検証する。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、「高次元身体自由度における低次元強調自由度 (シナジー) を用いて脳は身体運動を制御する」というシナジー運動制御仮説を検証することである。具体的には、シナジー運動制御仮説に基づく計算論モデルを構築し、新規運動環境においてシナジーがどのように変化すべきかを予言する。その予言に基づき機能的電気刺激で筋活動を操作することで、ヒト運動技能の操作を可能とする。従来のシナジー研究が実験データからの観測に留まっていたのに比して、本研究ではシナジーを計算論の予言に基づき操作できることが特色である。

本研究ではモデル研究に加えて、計算論モデルの予言を具体的に検証する行動実験も提案する。モデルから導かれる学習則に従い、機能的電気刺激でシナジーを操作することでスキル獲得を加速することができれば、シナジー運動制御仮説を支持する強力な証拠となり得る。応用面での展開として、シナジー操作による訓練法が期待できる。従来のスポーツ訓練法やリハビリ法では訓練者の経験や主観に頼る部分が多く、また被訓練者の個人性に対応するのが難しいという問題点があった。健常者と脳損傷患者でのシナジーを比較した研究 (例 Cheung et al. (2012) PNAS) がある一方、どのような訓練をすべきかという指針は与えられていない。計算論的シナジー操作法は科学的かつ系統的なスキル獲得法であり、被訓練者のシナジーに基づき機能的電気刺激を行う個人性に対応できる方法である。

## 3. 研究の方法

本研究では、計算論モデルによりシナジー運動制御仮説の検証を行う。具体的には、「どのような運動学習が可能か (もしくは不可能か)」や、「運動学習の前後にどのような筋活動や神経活動の変化がみられるか」といった問題に対して、先行研究での実験結果の再現と検証を行う。計算論モデルで運動学習をシミュレートすることで、シナジー運動制御仮説で説明できる運動学習の特性と説明できない運動学習の特性を同定する。また、シナジー運動制御仮説で説明できない運動特性を再現するために、どのような計算要素を考慮すべきか、具体的に特定することができる。これは計算論モデルを用いた本研究の強みである。

その計算論モデルでの結果を踏まえ、行動実験で学習可能な運動学習と学習不可能な運動学習を被験者に行わせ、計算論モデルと行動実験の結果を定量的に比較する。本研究は Berger ら (2013) の仮想手術課題から着想を得ている。そこでは仮想現実下で筋の様々な付け替えを行い、被験者がその付け替えをどのように学習するかで、シナジー仮説を検証する。シナジー基底で学習可能な力場を課す compatible 条件と学習不可能な力場を課す incompatible 条件での実験を行い、計算論モデルによる運動学習のシミュレーションにより、その実験結果の再現を行う。並行して、行動実験で Berger らの結果を再検証し、計算論モデルの予測と比較・検討を行う。

## 4. 研究成果

**【計算論モデル】** 理論面では、筋シナジー獲得の脳内メカニズムに関する計算論的モデルを検証するため、運動誤差を基にしたいくつかの筋活動調節アルゴリズムを用いて仮想手術課題を

計算機上でシミュレーションした。その結果、各筋肉が発揮する力の方向（筋肉のモーメントアーム）として、手術前の情報を用いて学習を行った場合では compatible 条件においても適切な筋活動が獲得できないこと、手術後の情報を用いて学習を行った場合では compatible と incompatible 条件ともに適切な筋活動が獲得できてしまうことが確かめられた。

これらの結果は、Berger et al. (2013) のシナジー仮説と相容れないものであり、運動誤差を基にした筋活動調節アルゴリズムが脳内で行われていると仮定した場合には、運動誤差を筋肉の活動誤差に変換するために用いられる筋肉のモーメントアームの情報として、手術前後の実際のものが用いられているわけではないことが示唆される。一方、筋活動だけでなく、筋肉のモーメントアームもタスクを実行中に獲得する学習アルゴリズムを用いたシミュレーションを行った結果、incompatible 条件において、適切なモーメントアームを獲得することが難しいこと、それに関連して適切な筋活動の獲得が難しいことが確かめられた。シナジーの先行研究では運動の基底であるシナジーに着目してきたが、運動学習時には運動を生成するモーメントアームも学習しなくてはならない。これは身体の状態に関する脳のモデルであり、内部順モデルと考えてよい。脳が内部順モデルとシナジー基底をどのように同時に学習できるかに関して、数理のおよび数値的に解析し、学習可能または不可能な条件に分類することができた。これは上記に述べた我々の実験で見出されたシナジー仮説だけでは説明できない要素と考えられる。

さらに過去の計測実験で観測された運動学習前後の筋活動の特徴が、昨年度までに構築した運動学習モデルによって再現できるかを検証した。特に、Barradas ら (2018) が行った仮想手術課題に着目し、筋肉のモーメントアームが突然大きく変わる実験条件と少しずつ段階的に変わる実験条件における筋活動の変化の特徴を再現することを試みた。その結果、前者の条件では筋活動パターンの分布が非等方性に、また後者の条件では等方性に近い分布を保つという実験結果の特徴を再現できることを確かめた。また、この結果は、Golub ら (2018) がサル電気生理実験で観測した運動野の神経活動パターンの分布の変化の特徴とも一致している。以上の研究によって、本研究で構築した筋シナジー運動制御仮説に基づいた運動学習モデルで表される情報処理が、運動学習中の脳内で行われている可能性を示唆することができたと考えられる。

**【行動実験】** 実験面では先行研究の追試のために、Berger et al. (2013) と同様の条件の仮想手術課題実験を行い、Berger et al. (2013) と同様、compatible 条件では適切な筋活動が獲得でき、incompatible 条件では適切な筋活動が獲得できないことが確かめられた。先行研究ではシナジー基底で学習可能な力場を課す compatible 条件と学習不可能な力場を課す incompatible 条件での実験を行い、前者に比べて後者の学習率が小さいことを報告している。一方、我々の追試では compatible/incompatible という違いよりも、もともとの力場からどれくらい変換を受けたかの変換量のほうが学習率を定めるという予備的結果を得た。これはシナジー仮説だけでは説明できない要素があることを示している。これは上記の計算論モデルでの検証でも確認されたものであり、正しく運動学習をできるためには、シナジーだけでなく、筋肉の作用であるモーメントアームの学習も必要であることを示唆している。

このように、シナジー運動制御仮説で説明できる実験結果を得た一方、説明できない実験結果があることも明らかになった。我々の結果は、部分的にシナジー運動制御仮説を支持するが、同時に内部順モデルなどといった他の学習要素も考慮する必要があることを示したという点で、運動学習の理解のために重要な成果と考える。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計14件)

1. Tanaka, H., & Miyakoshi, M. (2019) Cross-correlation task-related component analysis (xTRCA) for enhancing evoked and induced responses of event-related potentials, *NeuroImage*, 197, 177-190, <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.04.049> ( 査読有 ).

2. 田中宏和, 石川享宏, 寛慎治. (2019) 状態予測器としての小脳. *Clinical Neuroscience*, 37(8) 受理, 印刷中(ページ数未定) ( 査読無・招待論文 ).

3. 寛慎治, 李鍾昊, 石川享宏, 田中宏和, 鏡原康裕, 三苫博 (2019) 腕運動の小脳制御：予測的制御への小脳の関与. *Clinical Neuroscience*, 37(8), 受理, 印刷中(ページ数未定) ( 査読無・招待論文 ).

4. Tanaka, H., Ishikawa, T., & Kakei, S. (2019). Neural Evidence of the Cerebellum as a State Predictor. *The Cerebellum*, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s12311-018-0996-4> ( 査読有 ).

5. Tanaka, H., Miyakoshi, M., & Makeig, S. (2018). Dynamics of directional tuning and reference frames in humans: A high-density EEG study. *Scientific reports*, 8(1), 8205. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26609-9> ( 査読有 ) .
6. Cai, C., Ogawa, K., Kochiyama, T., Tanaka, H., & Imamizu, H. (2018). Temporal recalibration of motor and visual potentials in lag adaptation in voluntary movement. *NeuroImage*, 172, 654-662. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.02.015> ( 査読有 ) .
7. Mejia Tobar Alejandra, Hyoudou Rikiya, Kita Kahori, Nakamura Tatsuhiro, Kambara Hiroyuki, Ogata Yousuke, Hanakawa Takashi, Koike Yasuharu, Yoshimura Natsue. (2018). Decoding of Ankle Flexion and Extension from Cortical Current Sources Estimated from Non-invasive Brain Activity Recording Methods, *Frontiers in Neuroscience*, Vol.11, 733 (2018). <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00733> ( 査読有 ) .
8. Shin, D., Kambara, H., Yoshimura, N., & Koike, Y. (2018). Control of a Robot Arm Using Decoded Joint Angles from Electroencephalograms in Primate. *Computational intelligence and neuroscience*, Vol. 2018, 2580165. <https://doi.org/10.1155/2018/2580165> ( 査読有 ) .
9. Takagi, A., Kambara, H., & Koike, Y. (2018). Reduced Effort Does Not Imply Slacking: Responsiveness to Error Increases With Robotic Assistance. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(7), 1363-1370. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2018.2836341> ( 査読有 ) .
10. Yoshimura, N., Tsuda, H., Kawase, T., Kambara, H., & Koike, Y. (2017). Decoding finger movement in humans using synergy of EEG cortical current signals. *Scientific Reports*, 7(1), 11382. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09770-5> ( 査読有 ) .
11. 神原裕行、宮腰誠、田中宏和、香川高弘、吉村奈津江、小池康晴、マケイグスコット. (2017). ジャグリング動作中の脳波信号解析. *電子情報通信学会技術研究報告*, vol.117, no.361 ( 査読有 ) .
12. 田中宏和. (2017). 運動制御と感覚処理の最適理論. *日本ロボット学会誌*, 35(7), 500-505. <https://doi.org/10.7210/jrsj.35.500> ( 査読有 ) .
13. 田中宏和. (2016). 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*, 68(11), 1379-1384 ( 査読無・招待論文 ) .
14. Tanaka, H. (2016). Modeling the motor cortex: Optimality, recurrent neural networks, and spatial dynamics. *Neuroscience research*, 104, 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.neures.2015.10.012> ( 査読有 ) .

[ 学会発表 ] ( 計 2 3 件 )

1. Hirokazu Tanaka, Computational modeling of the motor cortex and the cerebellum Neuromathematics seminar, University of Bologna, Italy, 2019.
2. Hirokazu Tanaka, Computational modeling of the motor cortex and the cerebellum Neuromathematics seminar, College de France, France, 2019.
3. Hirokazu Tanaka, Dynamics of directional tuning and reference frames in humans: A high-density MoBI study, The 3rd Conference on Mobile Brain/Body Imaging, Germany, 2018.
4. Hirokazu Tanaka, Neural evidence of the cerebellum as a state predictor Neuro2018, the Japanese Neuroscience Society, Kobe, 2018.
5. Hiroyuki Kambara, Haruka Shimizu, Toshihiro Kawase, Atsushi Takagi, Natsue Yoshimura, Yasuharu Koike, Reaching movements in force-fields simulated by a motor control-learning model without desired trajectory, in *Neuroscience 2018*, San Diego, USA, November 2018.
6. 神原裕行、宮腰誠、田中宏和、香川高弘、吉村奈津江、小池康晴、Scott Makeig、ジャグリングに関する脳身体運動イメージング、モーターコントロール研究会、東京、8月、2018.

7. 田中宏和, 試行再現性最大法: 脳波信号解析と BCI 応用への可能性, 大阪大学 脳情報通信融合研究センター, 2018.
8. 田中宏和, 試行再現性最大法: 脳波信号解析と BCI 応用への可能性, 研究会 「日常のこころを読み解く脳信号解析法」 広島大学 霞キャンパス, 2018.
9. H. Kambara, H. Shimizu, A. Takagi, T. Kawase, N. Yoshimura, Y. Koike, Motor learning model adapting to velocity force-field reaching task, 第 27 回日本神経回路学会全国大会、福岡県小倉市, 2017.
10. Toshihiro Kawase, A. Nishimura, A. Nishimoto, F. Liu, Yeong Dae Kim, Hiroyuki Kambara, Natsue Yoshimura, and Yasuharu Koike, Relationship between muscle synergies and physical performance in patients with hemiparesis, Society for Neuroscience Meeting, Washington D.C., U.S.A., 2017.
11. H. Kambara, M. Miyakoshi, H. Tanaka, T. Kagawa, N. Yoshimura, Y. Koike, S. Makeig, Dynamic modulation of brain activities during three-ball juggling, Society for Neuroscience Meeting, Washington D.C., U.S.A., 2017.
- 12., H. Kambara, M. Miyakoshi, H. Tanaka, T. Kagawa, N. Yoshimura, Y. Koike, and S. Makeig, EEG Analysis during Juggling, ニューロコンピューティング研究会、名古屋大学, 2017.
13. 神原裕行, ジャグリング運動中の脳・身体活動イメージング -自然な行動中の脳機能の理解に向けて- 第 2 回ヒューマンセントリックシンポジウム、東京工業大学, 2017.
14. H. Kambara, M. Miyakoshi, H. Tanaka, T. Kagawa, N. Yoshimura, Y. Koike, and S. Makeig, Dynamic modulation of brain activities during three-ball cascade juggling The 5th Yamada Symposium on “Neuroimaging of Natural Behaviors”, Tokyo, Japan, 2017
15. Tanaka H., Miyakoshi M., & Makeig S., Mobile Brain/Body Imaging for Natural Movements, MoBI (Mobile Brain/Body Imaging) Workshop, San Diego, U.S.A., 2016.
16. Kambara, H., Tanaka H., Miyakoshi M., & Makeig S., Mobile brain/body imaging during 3-balls juggling performance, MoBI (Mobile Brain/Body Imaging) Workshop, San Diego, U.S.A., 2016.
17. Tanaka H., Miyakoshi M., & Makeig S., Dynamics of directional tuning and reference frames in humans: A high-density EEG study, Neuroscience 2016 Annual Meeting, San Diego, U.S.A., 2016.
18. 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, San Diego, U.S.A., 2016.
19. Tanaka H., Miyakoshi M., & Makeig S., Directional tuning and reference frames revealed by noninvasive EEG in humans: a computational MoBI study, The 31st International Congress of Psychology, Yokohama, Japan, 2016.
20. Tanaka H., Miyakoshi M., & Makeig S., Dynamics of directional tuning and reference frames in humans: A mobile brain/body imaging study, The Japan-Europe International Meeting about Embodied Brain, Taormina, Italy, 2016.
21. Tanaka H., Miyakoshi M., & Makeig S., 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), Tokyo, Japan, 2016.
22. Tanaka H., Miyakoshi M., & Makeig S., 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, 富山市, 2016.

23. 神原裕行, 吉村奈津江, 小池康晴, 力場適応を行う到達運動学習モデル, 第 29 回自律分散システム・シンポジウム、調布市, 2016.

〔図書〕(計 1 件)

1. 田中宏和, 森北出版, 「計算論的神経科学: 脳の運動制御・感覚処理機構の理論的理解へ」, 2019, 304 ページ.

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：神原 裕行

ローマ字氏名：Hiroyuki Kambara

所属研究機関名：東京工業大学

部局名：科学技術創成研究院

職名：助教

研究者番号 ( 8 桁 ): 50451993

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。