

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K16122

研究課題名(和文)片腕運動-両腕運動の運動学習統一理論モデルの構築、実証とその応用

研究課題名(英文)A unified model of unimanual and bimanual movements - theory, validation, and application

研究代表者

瀧山 健(Takiyama, Ken)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・特任准教授

研究者番号：40725933

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)：片腕運動時と両腕運動時の脳内情報処理の関係は明らかでなく、片腕、両腕運動を統一的に議論できる理論的枠組みは数少ない。本研究では、運動プリミティブの枠組みを発展させ、片腕運動時における運動学習過程と両腕運動時における運動学習過程を同時に記述する片腕-両腕運動統一理論モデルの構築を行った。これにより、従来別々のモデルで別々に考慮されていた片腕運動、両腕運動を統一的に扱うことが可能となった。加えて、提案モデルを実証する行動実験、より生物学的に妥当な数理モデルによる実装を行った。

研究成果の概要(英文)：In our daily life, we manipulate our smartphones unimanually and tablet devices bimanually. Although unimanual and bimanual movements are familiar, the relation between those movements remains unclear. We investigated the relation based on computational modeling and behavioral experiments (in particular, motor adaptation experiments). Based on mathematical conditions to explain some previous behavioral results, it was possible to propose a novel mathematical model to explain the relation between unimanual and bimanual movements. We further validated the model based on behavioral experiments and the implementation of the model in a biologically plausible neural network model.

研究分野：身体運動制御・身体運動学習

キーワード：身体運動学習 運動プリミティブ 片腕運動 両腕運動 神経回路網モデル

### 1. 研究開始当初の背景

ピアノを練習する際、しばしば片手で練習をした後、両手演奏に挑む。しかし、片手での練習が両手での演奏にどれだけ有効なのか定かでない。片腕運動時と両腕運動時の脳内情報処理の関係は明らかでなく、片腕、両腕運動を統一的に議論できる枠組みがないためである。

応募者は誤差の予測が入力となる神経回路網モデル(誤差の予測モデル)は、片腕運動に関する様々な実験結果を統一的に再現でき、誤差の予測が片腕運動時の脳内情報処理に重要な要素であることを示した(Takiyama et al., 2015, Nature Comm)。

### 2. 研究の目的

本研究では誤差の予測モデルを拡張させ、片腕、両腕運動を統一的に議論できる神経回路網モデルの提案に挑み、誤差の予測が片腕運動時と両腕運動時の脳内情報処理に共通した重要な要素であることを示す。更に、モデルに基づき片腕、両腕運動が効率的に上達する練習方法を提案する。

### 3. 研究の方法

1年目に誤差の予測モデルを生物学的に妥当に拡張し、片腕-両腕運動の運動学習統一理論モデルの提案に挑む。そして未だ明らかでない片腕運動時、両腕運動時の脳内情報処理過程の関係に対して、誤差の予測が双方に共通した重要な要素であることを示す。更に、提案モデルが生み出す予測を行動実験により実証し、モデルの妥当性を示す。

2年目に提案モデルのシミュレーションに基づく効果的なトレーニング方法を提案する。

### 4. 研究成果

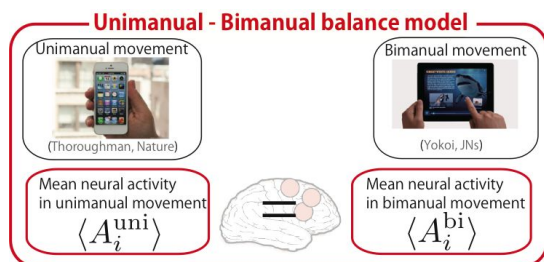


図1: 提案モデルの概要

1年目は本研究課題の軸となる両腕運動と片腕運動の運動学習を統一的に説明する数理モデルの構築に関する研究成果を Neural networks 誌にオープンアクセス誌として発表した(Takiyama & Sakai, 2017, Neural networks)。本研究課題前に、申請者は片腕運動から両腕運動への運動学習効果の転移を説明する数理モデルを発表していた(Takiyama & Sakai, 2016, Scientific Reports)。この自身の先行研究モデルを進展させ、従来別々に提案されてきた片腕運動の

運動学習モデル(Thoroughman & Shadmehr, 2000, Nature)と両腕運動の運動学習モデル(Yokoi et al., 2011, JNS)を統一的に説明できる数理モデルを提案した(図1)。また、行動実験の結果のみならず、片腕運動、両腕運動におけるニューロン活動も同時に説明できることを示した。更に、提案した数理モデルは右半球における運動野、左半球における運動野間の結合において、興奮性と抑制性の結合がバランスしているときに脳内実装できることも示した。本研究成果と並行して、Node perturbation と呼ばれる強化学習アルゴリズムに基づく運動学習の数理モデルを Journal of Physical Society of Japan 誌に、右腕の運動計画情報と左腕の運動計画情報を最適に統合する生物学的に妥当な神経回路網モデルに関する研究成果を Journal of Physics A 誌に発表した。

2年目は、1年目に提案した数理モデルを実証する行動実験を行った。加えて、片腕運動-両腕運動という運動パターンに限定せず、運動パターン普遍に運動学習過程を記述するための数理モデルを構築することに従事した。これにより、様々な運動パターンによる効率的なリハビリテーション、様々な運動パターンによる効率的なスポーツトレーニング方法の提案可能性が期待できる。本目的を達成する第1段階として、目標となる運動を達成する目標指向形の全身運動における動作計測を行い、各身体部位の各時刻の動きがパフォーマンスに寄与する割合を同定する機械学習手法を提案するに至った。具体的には、投擲動作、跳躍動作において、本来身体運動が従う非線形な運動方程式を考慮せずとも、比較的単純な線形な機械学習手法により、身体運動とパフォーマンスの関係性を記述できることを示した。本研究成果はオープンアクセスジャーナルである Scientific Reports 誌に掲載された(Furuki & Takiyama, 2017, Sci Rep)。本研究成果と並行して、下記の研究に従事した。身体運動が従う運動方程式はユークリッド幾何ではなく、リーマン幾何に従う。それに加えて、身体運動はばらつく。リーマン幾何上におけるばらつきを考慮した、確率的運動計画法の提案を行い、本研究成果は Neural networks 誌に掲載された(Takiyama, 2017, Neural Networks)。更に、前年からの研究を引き継ぎ、神経可塑性が存在する中で右腕の運動計画情報と左腕の運動計画情報を最適に統合する生物学的に妥当な神経回路網モデルに関する研究成果を Journal of Physics A 誌に発表した(Takiyama, 2017, J Phys A)。

### 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 8件)

1. Daisuke Furuiki, Ken Takiyama, Detecting the relevance to performance of whole-body movements, Scientific Reports, 7(1), 2017, 15659 1-14, 査読有  
DOI:10.1038/s41598-017-15888-3
2. Ken Takiyama, Influence of neural adaptation on dynamics and equilibrium state of neural activities in a ring neural network, Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, 50(49), 2017, 495601 1-13, 査読有  
DOI: 10.1088/1751-8121/aa91ae
3. Ken Takiyama, Bayesian geodesic path for human motor control, Neural networks, 93, 2017, 137-142, 査読有  
DOI: 10.1016/j.neunet.2017.05.005
4. Ken Takiyama, Optimal multiple-information integration inherent in a ring neural network, Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, 50(8), 2017, 085601 1-12, 査読有  
DOI: 10.1088/1751-8121/aa5577
5. Ken Takiyama, Yutaka Sakai  
A balanced motor primitive framework can simultaneously explain motor learning in unimanual and bimanual movements, Neural networks, 86, 2017, 80-89, 査読有  
DOI: 10.1016/j.neunet.2016.10.013
6. Ken Takiyama  
Maximization of learning speed due to neuronal redundancy in reinforcement learning Journal of Physical Society of Japan, 85, 2016, 114801, 査読有  
DOI: 10.7566/JPSJ.85.114801
7. Ken Takiyama, Masahiro Shinya  
Development of Portable Motor Learning Laboratory (PoMLab) PLOS ONE, 11(6), 2016, e0157588, 査読有  
DOI: 10.1371/journal.pone.0157588
8. Ken Takiyama  
Bayesian estimation inherent in a Mexican-hat type neural network Physical Review E, 93(5), 2016, 052303 1-5, 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevE.93.052303

〔学会発表〕(計 30件)

1. Ken Takiyama  
Prospective coding in motor learning and motor decision making, the 18th workshop

of brain and mind, Rusutsu, Jan. 13 (2018)

2. 瀧山 健, Prospective coding in motor learning and motor decision making, 脳科学ライフサポート研究センター, Jan, 19, 2018
3. Ken Takiyama, Koutaro Ishii, Takuji Hayashi  
Influence of switching rule on motor learning, Annual meeting of Society for Neuroscience (SfN2017) San Diego, USA, Nov 11-17. (2017)
4. Keiji Ota, Takuji Hayashi, Ken Takiyama  
Competitive game influences risk-sensitivity in motor decision-making Annual meeting of Society for Neuroscience (SfN2017) San Diego, USA, Nov 11-17. (2017)
5. Takuji Hayashi, Ken Takiyama, Daichi Nozaki  
Motor learning rate is influenced by prior motor learning through reconfiguration of directional preference of motor primitives, Annual meeting of Society for Neuroscience (SfN2017) San Diego, USA, Nov 11-17. (2017)
6. Masahiro Shinya, Ken Takiyama, Takeshi Sakurada, Shin-ichi Muramatsu, Hirofumi Ogiwara, Takaaki Sato, Taiki Komatsu  
Application of Portable Motor Learning Laboratory (PoMLab): cross-syndrome comparison of implicit visuomotor adaptation among patients with stroke and Parkinson's disease, Annual meeting of Society for Neuroscience (SfN2017) San Diego, USA, Nov 11-17. (2017)
7. 瀧山 健, パフォーマンスに関連した運動要素の同定, 日本機械学会 シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2017, Nov, 9, 2017
8. 瀧山 健, 平島雅也, 野崎大地, 運動学習の統一理論モデル -誤差の予測の重要性- 数理生物学会, Oct, 6, 2017
9. 瀧山 健, 石井恒太郎, 林拓司, ルールの切り替えが運動学習に及ぼす影響, 日本神経回路学会, Sep, 20, 2017
10. 瀧山 健, パフォーマンスに関連する・関連しない運動要素の同定, スポーツ科学セミナー, Sep, 19, 2017, 広島大学
11. 太田啓示, 瀧山 健, 競争課題は運動意思決定におけるリスク感受性に影響する,

体力医学会, Sep, 18, 2017

12. 瀧山 健, 自分の運動学習能力を測ってみよう, 創発シンポジウム, Sep, 9, 2017

13. 瀧山 健, 石井恒太郎, 林拓司, ルールの切り替えが運動学習に及ぼす影響, Motor Control 研究会, Aug, 26, 2017

14. Ken Takiyama, Daisuke Furuki  
Detecting the relevance of each motion component in whole-body motion to performance, the XXVI Congress of the International Society of Biomechanics (ISB), Brisbane, Jul. 25 (2017)

15. Ken Takiyama, Kohtaro Ishii, Takuji Hayashi, Influence of switching rule on motor learning, 日本神経科学学会, Jul, 22, 2017

16. 瀧山 健, 古木大祐, 全身運動におけるパフォーマンスへの関連度の同定, 第 61 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI '17), May, 25, 2017

17. 瀧山 健, 運動学習の統一理論モデル - 誤差の予測の重要性 -, 電子情報通信学会東海支部 第 3 回学生会講演会, Jan, 16, 2017

18. 瀧山 健, 古木大裕, 運動パフォーマンスに関連する運動要素の同定, 第 4 回野球科学研究会, Dec, 4, 2016

19. Mashiro Shinya, Ken Takiyama  
Portable Motor Learning Laboratory (PoMLab), Annual meeting of Society for Neuroscience (SfN2016) San Diego, USA, Nov 11-16. (2016)

20. Takuji Hayashi, Ken Takiyama, Daichi Nozaki  
Rotation of preferred direction of motor primitive explains the dependence of shape of visuomotor map on visuomotor adaptation rate, Annual meeting of Society for Neuroscience (SfN2016) San Diego, USA, Nov 11-16. (2016)

21. Ken Takiyama,  
Prospective errors determine motor learning - a step towards a unified model of motor learning - Neurolunch, Harvard University, Nov. 7 (2016)

22. 瀧山 健, 運動学習の統一理論モデル - 誤差の予測の重要性 -, 計測自動制御学会ライフエンジニアリング部門シンポジウム「身体運動基礎研究の新展開」, Nov, 4, 2016

23. 古木大裕、瀧山 健, 身体運動の"クセ"を見破る, 第 10 回 Motor Control 研究会, Sep, 3, 2016

24. 進矢正宏、瀧山 健、佐藤剛章、小松泰喜, いつでもどこでも運動学習測定-PoMLabの開発、評価、そして現場での測定-, 第 10 回 Motor Control 研究会, Sep, 3, 2016

25. 林拓志、瀧山 健、野崎大地, 運動プリミティブの至適方位の回転による運動学習基盤の再構成, 第 10 回 Motor Control 研究会, Sep, 3, 2016

26. 進矢正宏、瀧山 健, 運動学習測定アプリケーション PoMLab の開発, 第 71 回日本体力医学会大会 盛岡市民文化ホール、岩手県盛岡市, Sep, 24, 2016

27. 瀧山 健, 運動学習の統一理論モデル - 誤差の予測の重要性 -, 第 10 回 Motor Control 研究会 シンポジウム「身体運動基礎研究の新展開」, Sep, 1, 2016

28. Ken Takiyama, Bayesian estimation inherent in a Mexican-hat-type neural network mode, 日本神経科学学会, パシフィコ横浜, Jul, 20, 2016

29. Ken Takiyama, Simultaneous estimation of state transitions and instantaneous firing rates using switching state space model, ASPIPA BioSiPS Workshop 2016 Koganei, Japan, Jul 14. (2016)

30. Ken Takiyama  
Prospective errors determine motor learning - a step towards a unified model of motor learning - Modeling Neural Activity (MONA2), Jun. 21 (2016)

〔図書〕(計 0 件)

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
瀧山 健 (TAKIYAMA, Ken)  
東京農工大学・大学院工学研究院・特任准教授

研究者番号 : 40725933