

令和元年6月20日現在

機関番号：82609

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K21649

研究課題名(和文)運動学習制御における内部モデル機能解明に関する研究

研究課題名(英文)Study for internal models in motor learning control

研究代表者

本多 武尊 (HONDA, Takeru)

公益財団法人東京都医学総合研究所・運動・感覚システム研究分野・主任研究員

研究者番号：20761307

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)：運動学習における小脳の内部モデル機能を解明するために、プリズム適応課題を応用したヒトの行動実験によって内部モデルが学習する条件を調査し(実験研究)、この実験で得られた知見を基に実験式を提案した(理論研究)。さらに、その理論から指標を開発し、脊髄小脳変性症患者の分布を調査し(臨床研究)、論文にまとめ、国際誌(PNAS)に掲載された。小脳に学習される内部モデルに、(1)順モデルと逆モデルの両方が存在すること、そして、(2)誤差信号からの学習によって順モデルが得られ、正しい運動を随意的に行えるようになり、その正しい運動を実現することで学習が起こり、逆モデルが学習されることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

腕の運動制御に関して「小脳で学習される内部モデルはどのような入出力関係で何をモデル化しているのか」という長年の懸案に対して、腕がどこに動くのかという情報(順モデル)と動かす方法についての情報(逆モデル)の両方を学習しモデル化していることを明らかにした。また、順モデル、そして、逆モデルという順番で学習することを明らかにした。脊髄小脳変性症によって順モデルと逆モデルの両方の学習機能、または、逆モデルの学習機能のみ低下することを発見し、世界で初めて、脊髄小脳変性症についての学習機能低下の病態を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To clarify mechanism of internal models in the cerebellum during motor learning, we research conditions of updating internal models by experiments for human reaching movements in the prism adaptation task, built experimental formulas, and research distribution of clinical indexes which we developed about internal models of patients with cerebellar degenerations. We published a paper in an international journal (PNAS). We found (1) that there are both forward and inverse models in motor control and (2) that teaching signals generated by updating forward model due to error signals updates inverse model.

研究分野：理論脳神経生理学

キーワード：運動制御 順モデル 逆モデル 脊髄小脳変性症 プリズム適応課題 小脳 運動学習

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

目の前にあるコップへ手を動かす時、目を閉じた状態でも正確に運動が出来る。これは**内部モデル**として保持した運動に関する脳内情報によって可能となる。この内部モデルに小脳が関与し、その内部モデルは**順モデル**(手が運動した結果を予測した情報)であるという考えが1970年に提案された[1]。一方、1987年に、内部モデルは**逆モデル**(手がコップに到達するための運動指令情報)であるという考えに基づいたフィードバック誤差学習が提案された[2]。運動制御には順モデルも逆モデルも両方必要であるが、小脳が貢献する**内部モデルが順モデルなのか逆モデルなのか**という議論が今現在まで45年も続いている。

<引用文献>

1. M. Ito, International journal of neurology, 7, 162 (1970).
2. M. Kawato, K. Furukawa, R. Suzuki, Biological cybernetics 57, 169 (1987).
3. T. A. Martin, J. G. Keating, H. P. Goodkin, A. J. Bastian, W. T. Thach, Brain : a journal of neurology 119 (Pt 4), 1183 (Aug, 1996).

2. 研究の目的

腕の運動制御に関して「小脳で学習される内部モデルはどのような入出力関係で何をモデル化しているのか」という長年の懸案を解決し、臨床応用可能な小脳障害の病態モデルを作る。プリズム適応課題を応用したヒトの行動実験を行い、内部モデルが学習する条件を調査し(実験研究)、この実験で得られた知見を基に理論式を提案する(理論研究)。さらに、その理論から指標を開発し、小脳に障害のある患者にご協力をいただき、その指標の分布を調査する(臨床研究)。これら3つの立場の研究の融合(融合的研究)によって、小脳の内部モデル機能の解明を目指す。

3. 研究の方法

プリズム適応課題を試行できるシステムを開発し、健常被験者のデータを採取する(実験研究)。運動学習制御に関する実験式を提案し、計算機シミュレーションを行う(理論研究)。多施設の協力を得て小脳患者に協力していただき、データを採取する(臨床研究)。健常被験者と小脳患者の違いを明らかにし小脳機能としての内部モデルの理論的解明を目指す(融合的研究)。

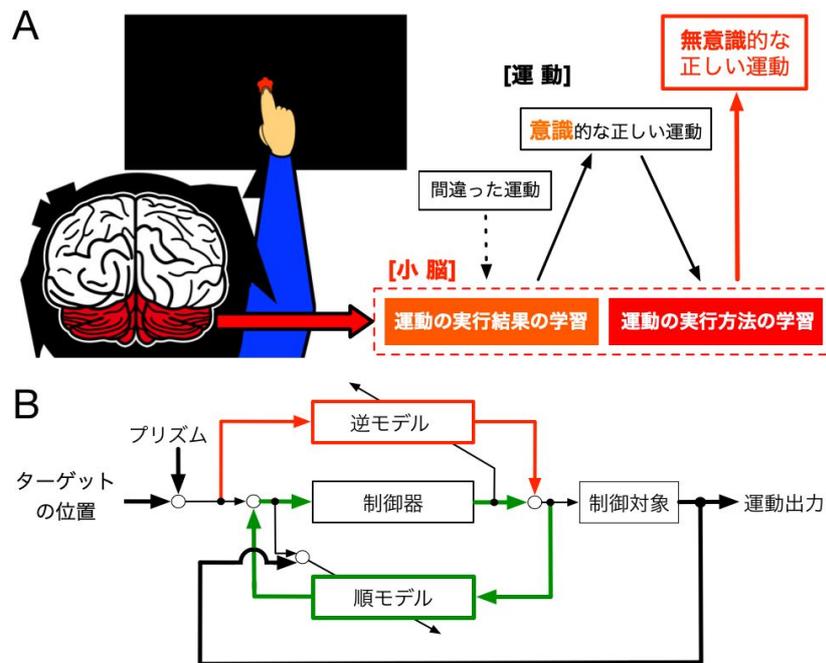


図1. タンデム内部モデル学習理論[主な発表論文, 主な発表図書]。

4. 研究成果

視界を右へずらしてしまうプリズムレンズをかけた被験者が、右手で右耳に触れ、ディスプレイに映し出されるターゲットへ向かってディスプレイをその右手でタッチする運動を繰り返し行った。プリズムレンズによって視界が右へとずれてしまうため、最初はターゲットをタッチできず、ターゲットから右の方へ離れたところをタッチする。しかし、それを繰り返していくと学習が進み、ターゲットを正確にタッチできるようになる。この課題によって、(1) 間違った運動である自分の運動の実行結果を見て学習し、その学習した情報(順モデル)を使って意識的に正しい運動を行い、(2) 正しい運動を行うことで、「運動を実行する方法」(逆モデル)を学習し、無意識的に正しい運動を実行できるようになることを発見した(図1)。さらに、意識的に正しい運動

を行わないでいると「運動を実行する方法」そのものを正しく学習できないことも発見された。つまり、意識を利用することによって逆モデルを学習するかどうかを選択できることを示唆する。さらに、順モデルの学習は意識で制御できないことも示唆された。これらの結果は定式化でき、疾患による小脳へのダメージがあるとき、順モデルを学習できないケースと、逆モデルを学習できないケースがあることを予測した(図2 灰色領域)。実際に、脊髄小脳変性症の患者さんはこの予測の通りに逆モデルを学習できないケース(図2A と図2C 青)と、順モデルと逆モデルの両方学習できないケース(図2B と図2C 赤)に分類でき、これまでにない臨床像を明らかにすることができた。このように、運動への意識の関与を明らかにするばかりでなく、この研究成果は病気の理解と治療やリハビリテーションの開発への促進となることが期待される。

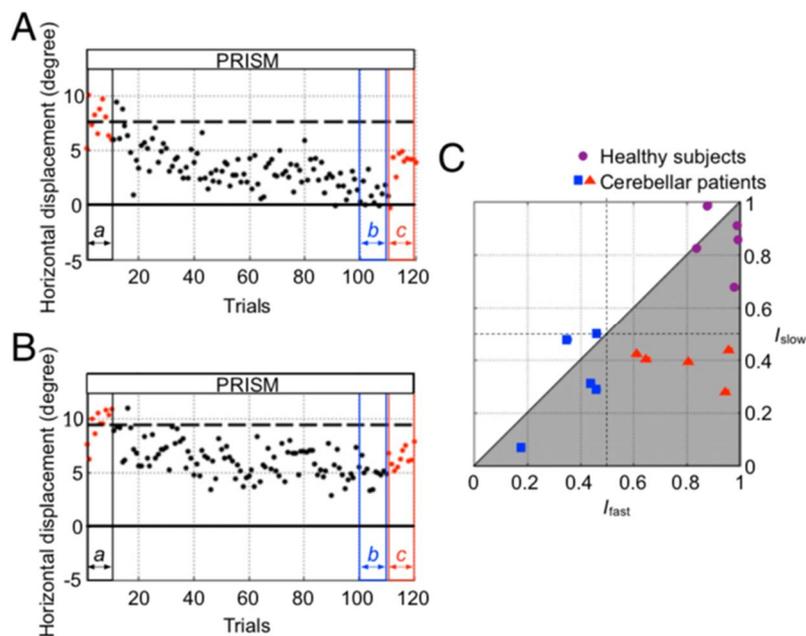


図2. 脊髄小脳変性症患者と健常者の分布。 I_{fast} は順モデル学習機能, I_{slow} は逆モデル学習機能を表す[主な発表論文]。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

Honda T, Nagao S, Hashimoto Y, Ishikawa K, Yokota T, Mizusawa H, Ito M, Tandem internal models execute motor learning in the cerebellum, PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America) 115(28) 7428-7433 2018年 査読有り
<https://doi.org/10.1073/pnas.1716489115>

[学会発表](計8件)

本多 武尊, 運動学習機能から見る熟練への道、東京大学進化認知科学研究センター公開シンポジウム「熟練と脳認知機能」 2019年 [招待講演]

本多 武尊, モーションキャプチャー技術を応用した小脳失調症状の定量評価
 第9回小脳研究会 2019年 [招待講演]

Takeru Honda, Hiroataka Yoshida, Kyota Bando, Arito Yozu, Hidehiro Mizusawa, Takashi Hanakawa, Shinji Kakei, “Function of Tandem Internal Model in Motor Control”, The 2nd International Symposium on Embodied-Brain Systems Science(EmboSS 2018), December, 2018.

Takeru Honda, Tandem internal models fulfill precise motor learning, 第75回 藤原セミナー The Cerebellum as a CSN hub -from its evolution to therapeutic strategy, 2018. [招待講演]

本多 武尊, 正しい運動を実行するための運動学習の仕組みの解明、平成30年度第2回福祉保健局事業所長会 2018年 [招待講演]

Takeru Honda, Ken Matsumura, Youji Hashimoto, Kinya Ishikawa, Hidehiro Mizusawa, Soichi

Nagao Novel clinical indexes for evaluating cerebellar internal models revealed by prism adaptation of human hand-reaching behavior the 8th International Symposium of the Society for Research on the Cerebellum and Ataxia (SRCA), 2017.

Takeru Honda, “Tandem internal model predicts two types of cerebellar patients”, Society for Neuroscience (SfN 2017), Session no. 362, Neuroscience Meeting Planner, 2017.

Takeru Honda, Tandem Internal Models Fulfill Adaptive Motor Control, RIKEN BSI Retreat 2016 2016. [招待講演]

〔図書〕(計 1 件)

本多武尊, 正しい運動を実行するための運動学習の仕組みの解明, 都医学研 NEWS NO.033 2019

〔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

正しい運動を実行するための運動学習の仕組みの解明

<http://www.igakuken.or.jp/topics/2018/0625.html>

正しい運動を実行するための運動学習の仕組みの解明

<http://www.igakuken.or.jp/project/to-tomin/to-pro25.html>

正しい運動を実行するための運動学習の仕組みの解明

http://www.riken.jp/pr/press/2018/20180626_1/

6 . 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

なし

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。