

令和 6 年 6 月 8 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03932

研究課題名（和文）直立・歩行の予測制御を構成する神経基盤の構成論的理解

研究課題名（英文）Constructive approach to neural basis for predictive control of gait and posture

研究代表者

船戸 徹郎（Funato, Tetsuro）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：40512869

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：ヒトや動物が示す、状態予測に基づく運動制御メカニズムの解明を目的として研究を行った。神経制御系がモデル予測制御に基づいて構成されるという作業仮説を立て、ヒト及びラットの予測実験と数理シミュレーションにより検証を行った。ヒト実験では、合図後に外乱を与えると予測動作がみられ、モデル予測制御によるシミュレーションでは、この予測動作と一致する振る舞いが見られた。さらに、ラットにおいて同様の予測実験を行ったところ、健常ラットで見られた予測動作が小脳障害ラットでは見られなかった。これらの結果は、モデル予測制御のような制御則が小脳を含めた神経系によって構成され、動作生成に使われていることを示唆している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、予測制御メカニズムと神経系の関係を明らかにした点にある。ヒトの実験では、モデル予測制御がヒトの予測動作を説明できることが示され、小脳障害ラットの実験では、小脳の予測制御における役割が明らかになった。これにより、モデル予測制御の理論が神経制御に適用可能であることが示唆された。本研究の成果は、ヒトの動作制御の原理を人工物に応用する有効な知見となるとともに、小脳に障害を持つ患者の運動障害メカニズムに知見を与えるものである。これにより障害メカニズムに基づく効果的な診断とリハビリテーションにつながることを期待できる。

研究成果の概要（英文）：The study aimed to elucidate the mechanisms of movement control based on state prediction exhibited by humans and animals. We hypothesized that the neural control system is structured based on model predictive control and tested this through predictive experiments and mathematical simulations with both humans and rats. In human experiments, predictive movements were observed when disturbances were introduced after a cue, and simulations using model predictive control showed behaviors consistent with these predictive movements. Furthermore, similar predictive experiments in rats revealed that the predictive movements seen in healthy rats were absent in cerebellum-injured rats. These results suggest that control laws similar to model predictive control are utilized by the nervous system, including the cerebellum, in generating movements.

研究分野：システム工学、制御工学、バイオメカニクス

キーワード：モデル予測制御 予期的姿勢調節 姿勢制御 小脳

1. 研究開始当初の背景

ヒトや動物は、歩行中に周囲の環境を基に自己の将来状態を予測することで、運動環境が変わる前に運動状態を変化させる。例えば平坦な床から階段を上る時、その最初の足の運びから運動の変化は始まる。予測に基づく運動には、①予測のための自己及び環境の内部モデル、②モデルに基づく予測と行動決定機構の2つの要素が必要となる。これまでリーチングや眼球運動などの動作や神経系の解析を基に、小脳における内部モデルの存在や評価関数の議論がされてきた。一方で、運動指令の生成の際に、どのように内部モデルを用いて運動を予測し、運動制御指令を構成するかという制御の問題には、未解決の問題があった。そこで本研究では、内部モデルによる予測制御のシステムモデルを構築し、実験で得られた動作と比較することで、神経系で用いられる予測制御の原理に迫る研究を行う。

2. 研究の目的

予測を伴う運動を可能にする神経制御系の原理を明らかにするにあたり、制御系がモデル予測制御によって構成されているという作業仮説をおく。モデル予測制御では、内部順モデルを基に、一定時間先までの状態を予測する。実行可能な制御指令の中で、予測された将来までの評価が最適になるように制御指令が決定する。モデル予測制御には内部モデル、予測、最適化の機構が必要であり、それらは個々に神経系に存在すると指摘されている。このような複数の機能要素を統合した神経の予測制御系に迫るためには、○予測に基づく動作と神経障害の影響に迫る実験、○システムモデル及びシミュレーション環境の構築と検証を並行して行い、神経系と制御系の両面からアプローチをすることが有効である。

本研究では、実験とモデル化の2つのアプローチにおいて、下記の具体的な目標を設定して研究を行う。①予測動作実験：健常被験者及び小脳に障害を与えたラットの2足直立中に予測可能な情報を提示し、外乱を与えることで、予測動作とそれに関わる神経基盤を明らかにする。②制御系：予測制御系の学習則及びシミュレーション環境を構成し、実験と同条件で予測動作を生成する。以上の実験・制御系の構築と検証を通して、モデル予測制御と神経制御系の機能・構造を比較することで、神経系の予測制御メカニズムを明らかにすることが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) ヒトの直立予測動作とシステムモデルの構築

予測動作の生成メカニズムに迫るにあたり、直立中の外乱に対するヒトの姿勢制御を例として取り上げ、この時現れる予測動作がモデル予測制御で説明できるかを検討する。具体的な対象として、図1Aのように傾斜角度が変わる台の上で直立した被験者に対して、音を与えてから傾斜外乱を与える状況を考える。この状況を繰り返し経験すると、被験者は外乱前に外乱に備える動作を行うようになる。予測動作の性質を調べるため、10人の健常な被験者を対象に、合図の音がない外乱を30回与えた後に、合図の音がある(予測可能な)外乱を30回与えて応答を調べた。外乱は1秒間に4度傾く外乱を、被験者が実験装置上に直立して20秒後に与えた。合図の音として、外乱開始の約2~3秒前からブザーがなるようにした。モーションキャプチャシステムによって動作を計測し、筋電計によって腓腹筋及び前脛骨筋の活動を計測した(図1A)。

この時現れる予測動作の生成メカニズムを調べるにあたり、実験を通して動作や筋活動の性質を調べるとともに、力学シミュレーションを用いた構造的アプローチを行う。すなわち、直立中のヒトの身体の数理モデルを(運動方程式を基に)構築し、モデル予測制御によって安定化を行うシステムモデルを作成する。予測可能な傾斜外乱に対する応答を力学シミュレーションによって再現し、ヒトの振る舞いとどの程度を比較を行うことで、モデル予測制御がどの程度ヒトの予測動作を説明できるかを検証する。システムモデルとして、2リンクの骨格モデルに筋(前脛骨筋・腓腹筋・腸腰筋・大殿筋)を配置した身体筋骨格モデルと、モデル予測制御によって筋を駆動する制御力を決定する制御モデルからなる、図1Bのシステムモデルを構築した。なお外乱は身体骨格モデルが乗る床が傾く振る舞いを、足首周りの角度変化として与えた。シミュレーションによってシステムモデルの挙動を調べ、実験におけるヒトの予測動作と比較した。

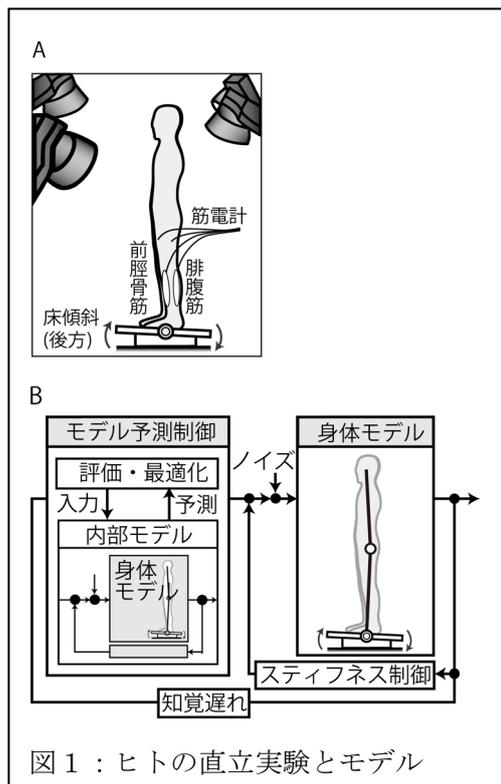


図1：ヒトの直立実験とモデル

(2) 小脳障害ラットの直立動作実験による神経系へのアプローチ

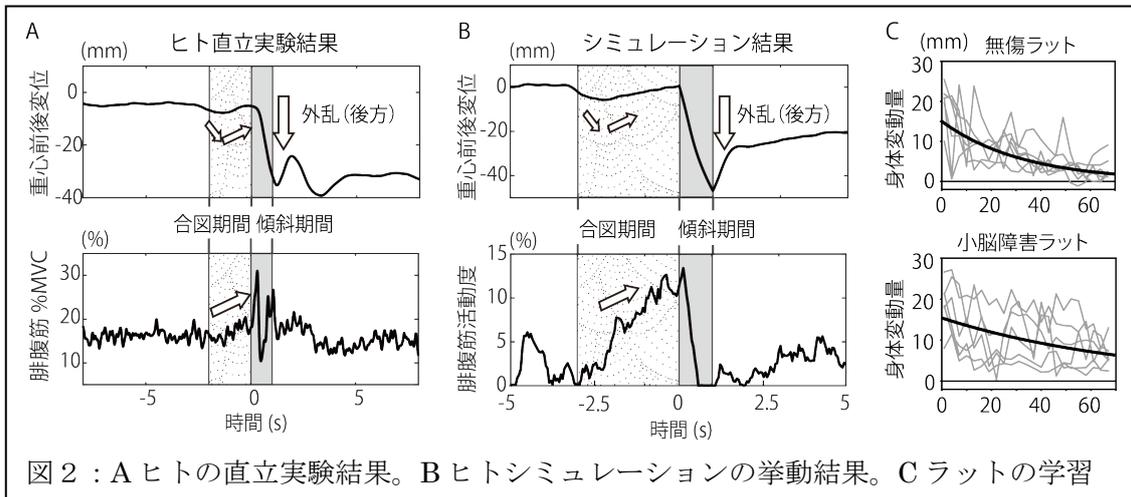


図2：A ヒトの直立実験結果。B ヒトシミュレーションの挙動結果。C ラットの学習

動作生成がモデル予測制御で説明できるのであれば、それが神経系においてどのように構成されているのか？という問題を考える。神経系の機能に迫るにあたり、ヒトを対象とした実験に加えて動物実験を行うことで、神経系に対する直接的な介入が可能になり、より詳細なメカニズムに迫れると期待できる。そこで、ヒトと同様の実験系を、ラットを対象として構築し、神経系の障害に伴うラットの挙動の変化から予測に関わる神経系の仕組みに迫る。ヒトの実験（図1A）と同様にラットを後肢2足のみで直立させ、床を回転することで外乱を与える。外乱前に光による合図を与えることで外乱の予測が可能な状態で実験を行った。実験系において、無傷ラットの学習的挙動を調べるとともに、小脳障害ラットを対象とした学習実験によって小脳障害の姿勢制御動作への影響を調べ、予測制御における小脳の働きに迫る。小脳障害ラットでは小脳内で姿勢機能に関わる領域である小脳虫部領域に吸引除去による局所的な障害を与えた。

4. 研究成果

(1) ヒト直立実験

図2Aに音あり試行での代表的な被験者の応答を示す。図2Aに示すように、音による合図が入ると重心が一度外乱方向（後方）に動き、その後実際の外乱が加わるまで重心が徐々に前方に移動した。この間の腓腹筋の活動は、合図期間で徐々に上昇していた。興味深いことに、腓腹筋の活動は身体を後方に引っ張るように力を発揮する。すなわち合図期間では、前方に倒れようとする身体を腓腹筋で抑えるように制御し、外乱に備えるという戦略が生じたと考えられる。合図期間に腓腹筋が徐々に上昇するこのような振る舞いが10名の被験者のうち6名の被験者で見られた。

傾斜外乱に対するヒトの予測動作のメカニズムを、モデル予測制御による動作との比較によって調べる。そのために、ヒトの筋骨格系の数理モデルとモデル予測制御によって生じる振る舞いを力学シミュレーションによって実現し、実験と比較した。システムモデルの力学シミュレーションを行うことで、モデル予測制御によって駆動する身体モデルがどのような振る舞いをするかを検証し、ヒトの振る舞いとを比較を行った。図2Bにシミュレーション結果（代表的な挙動の例）を示す。図2Bより、重心は外乱によって大きく後方に動き、その後元の位置に戻っていった。注目すべきは予測期間（外乱3秒前から0秒までの期間）の挙動である。重心は、合図が入ると一度後方に動き、その後実際の外乱が入るまで徐々に前方に移動していた。さらに腓腹筋の活動を見ると、合図が入ってから外乱が入るまで徐々に活動が上昇していた。これらの重心及び筋活動はヒトの振る舞い（図2A）と一致していた。これは、予測動作の生成において、ヒトとシミュレーションの間で同様の仕組みが働いた可能性を示唆する結果であった。

(2) 小脳障害ラットの実験

図2Cに無傷ラット及び小脳障害ラットの試行ごとの外乱後の身体変動の大きさを示す。無傷ラットでは、試行を重ねることによって外乱に対する変動が明らかに低下していったのに対し、小脳障害ラットでは、試行に伴う身体変動の減少が起きにくくなっていた。このことは小脳虫部における局所的な障害によって、予測を伴う姿勢制御の機能が低下したことを示している。この結果をこれまで想定していたモデル予測制御と比較して考えると、小脳障害によって内部モデルもしくは内部モデルの学習機能が低下し、将来状態の予測に障害が生じたことで、合図を基に予測を行いながら外乱に備えるような制御指令の生成が困難になったと考えることができる。すなわち、小脳がモデル予測制御の構成にあたって重要な機能を担っていると考えられる。

(3) まとめ

ヒトの直立実験とモデルにより、モデル予測制御のような予測された将来状態を最適化するような制御系が、ヒトの予測動作をうまく表現することから、予測制御にこのようなメカニズムが働いている可能性があることが明らかになった。また小脳障害ラットの実験を通して、この予測制御メカニズムには、小脳の（内部モデルに関わる）機能が関与していることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Konosu Akira, Matsuki Yuma, Fukuhara Kaito, Funato Tetsuro, Yanagihara Dai	4. 巻 14
2. 論文標題 Roles of the cerebellar vermis in predictive postural controls against external disturbances	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 3162
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-024-53186-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Funato Tetsuro, Hattori Noriaki, Yozu Arito, An Qi, Oya Tomomichi, Shirafuji Shouhei, Jino Akihiro, Miura Kyoichi, Martino Giovanni, Berger Denise, Miyai Ichiro, Ota Jun, Ivanenko Yury, d'Avella Andrea, Seki Kazuhiko	4. 巻 4
2. 論文標題 Muscle synergy analysis yields an efficient and physiologically relevant method of assessing stroke	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Brain Communications	6. 最初と最後の頁 fcac200
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/braincomms/fcac200	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 船戸 徹郎	4. 巻 57
2. 論文標題 シナジー解析と関節間協調性	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 理学療法ジャーナル	6. 最初と最後の頁 526 ~ 530
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11477/mf.1551203046	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Konosu Akira, Funato Tetsuro, Matsuki Yuma, Fujita Akihiro, Sakai Ryutaro, Yanagihara Dai	4. 巻 15
2. 論文標題 A Model of Predictive Postural Control Against Floor Tilting in Rats	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Systems Neuroscience	6. 最初と最後の頁 141
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fnsys.2021.785366	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Funato Tetsuro, Sato Yota, Sato Yamato, Fujiki Soichiro, Aoi Shinya, Tsuchiya Kazuo, Yanagihara Dai	4. 巻 11
2. 論文標題 Quantitative evaluation of posture control in rats with inferior olive lesions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 20362
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-99785-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計10件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Kaito Fukuhara, Akira Konosu, Tetsuro Funato, Dai Yanagihara
2. 発表標題 Effect of Pharmacological Inactivation of the Cerebellum on Learning Function for Predictive Postural Control in Rat
3. 学会等名 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akira Konosu, Kaito Fukuhara, Tetsuro Funato, Dai Yanagihara
2. 発表標題 Predictive postural controls in bipedal rats: roles of cerebellar vermis and mathematical simulation
3. 学会等名 HypAd2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 杉岡 潤, Wang Sentong, 船戸 徹郎
2. 発表標題 反射系に基づくヒト歩行の筋骨格シミュレーションの構築
3. 学会等名 第35回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 船戸 徹郎
2. 発表標題 脳卒中回復評価動作の筋シナジー解析
3. 学会等名 第20回日本神経理学療法学会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小川 翠帆, Wang Sentong, 船戸 徹郎
2. 発表標題 床傾斜に対する直立姿勢系の予測動作の解析
3. 学会等名 第40回 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鴻巣暁, 船戸徹郎, 松木勇磨, 酒井隆太郎, 柳原大
2. 発表標題 予測的姿勢制御における小脳虫部の役割
3. 学会等名 日本小脳学会 第12回学術集会・総会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuma Matsuki, Akira Konosu, Akihiro Fujita, Tetsuro Funato, Dai Yanagihara
2. 発表標題 Modelling Posture Control to Predictable Perturbation in Rats
3. 学会等名 HypAd2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鴻巣暁、船戸徹郎、松木勇磨、酒井隆太郎、柳原大
2. 発表標題 予測的姿勢制御における小脳虫部の役割
3. 学会等名 日本小脳学会 第12回学術集会・総会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小川 翠帆, 船戸 徹郎
2. 発表標題 ヒトの直立予測姿勢系の構築による予測的姿勢調節(APA)の解明
3. 学会等名 第34回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遠藤 啓輔, 酒井 隆太郎, 柳原 大, 船戸 徹郎
2. 発表標題 ラットの歩行運動制御系の解明のための筋骨格モデルの構築
3. 学会等名 第34回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	柳原 大 (Yanagihara Dai) (90252725)	東京大学・大学院総合文化研究科・教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------