

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01393

研究課題名（和文）小脳における直立姿勢制御系の学習と機能回復の設計原理

研究課題名（英文）Learning and recovery mechanism of posture control in the cerebellum

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） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：小脳における学習を伴う姿勢制御の原理に、小脳障害ラット・患者の直立運動計測、直立ラットの外乱学習実験と数理モデルを通してアプローチを行った。下オリーブ核障害ラットでは非線形制御系、小脳疾患患者では積分制御機能が低下し、ともに内部モデル学習の障害による予測制御機能の低下が示唆された。内部モデルに基づく姿勢制御モデルを構築し、直立外乱学習の結果との比較により評価を行った。これにより、小脳における学習を伴う姿勢制御が、内部モデルに基づく予測制御によって説明できることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

小脳における障害は姿勢維持機能の低下を生じ、歩行や直立の動作機能に影響を与える。小脳障害に伴う姿勢維持機能の低下と回復原理が解明できれば、効果的なリハビリテーション法の構築につながる。本研究の結果、小脳系の障害に伴う姿勢機能の低下、及び学習による姿勢機能の構築を説明する、内部モデルを用いた制御系のシステムモデルが構築された。本モデルは小脳における運動学習と回復メカニズムの幅広い研究に応用ができ、モデルに基づくりハビリテーション法の構築につながると期待できる。

研究成果の概要（英文）：The principle of postural control with learning in the cerebellum was approached through measurements of standing motion in rats and patients with cerebellar disorders, disturbance learning experiments in standing rats, and mathematical modeling. The nonlinear control system in rats with lesion in the inferior olivary nuclei and the integral control function in patients with cerebellar ataxia were impaired, both suggesting a decrease in predictive control function due to impaired internal model learning. A posture control model based on the internal model was constructed and evaluated by comparison with the results of disturbance learning of standing rats. The results showed that the postural control with learning in the cerebellum can be explained by the predictive control based on the internal model.

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：姿勢制御 予期的姿勢調節 小脳 学習 モデル予測制御

### 1. 研究開始当初の背景

小脳における障害は姿勢維持機能の低下を生じ、それによって直立や歩行が困難となる。疾患に伴う姿勢維持機能の低下と回復に係るメカニズムを明らかにすることが、効果的なりハビリテーションにつながる。ヒトや動物の姿勢動作には学習的な動作生成の存在が指摘されている。例えば、ヒトが斜面で直立をすると、床状態に応じて学習的に姿勢を変化することが、平面に戻った後に傾斜姿勢を維持するアフターエフェクトによって示唆されている。疾患後の回復には、このような姿勢の学習機構が寄与すると考えられるが、これまでに学習を用いた姿勢制御の数理構造は示されておらず、学習系が神経制御にどのように使われるかは未解決であった。我々は、「小脳における身体内部モデルの学習が、直立姿勢制御の構造に含まれ、常に使われている」という仮説を立て、実験と数理モデルの2つの観点から研究を行うことで、姿勢における学習に迫れると考えた。

我々はこれまでの研究で、ラットの直立姿勢実験環境を構築し、姿勢の神経構造へアクセスする手法を構築してきた。さらに姿勢制御の数理モデルを構築し、実験データと統合することで、姿勢制御系を定量評価する手法を構築してきた。そこで本研究では、疾患ラット及びヒトの姿勢実験と数理モデルの2つ手法を統合し、学習を伴う姿勢制御系のメカニズムに迫ることにした。

### 2. 研究の目的

「小脳における身体内部モデルの学習が、直立姿勢制御の構造に含まれ、常に使われている」という仮説を立て、ラット及びヒトの姿勢制御動作の計測と数理モデルの構築、数理モデルを用いた制御系の定量評価(同定)を行うことで、運動学習を伴う直立姿勢制御メカニズムにアプローチする。小脳系における身体内部モデルの学習に迫るため、①疾患に伴う姿勢制御系の変化と②運動学習による姿勢制御系の変化の2つの過程に着目し、それぞれ以下の具体的な研究を行う。

- ① (内部モデル学習に寄与する) 下オリーブ核障害に伴うラットの姿勢制御系の評価、及び小脳疾患患者の姿勢制御系の評価を行い、姿勢制御における内部モデルの寄与を調べる。
- ② 運動学習に伴う姿勢制御系の変化に直接的にアプローチをするために、合図の後に傾斜外乱を与えることで予測可能な直立実験系を構築し、学習に伴う姿勢制御系の変化を調べる。内部モデルを用いた将来状態の予測に基づいて姿勢制御を行う制御系の数理モデルを構築し、小脳における内部モデル学習が姿勢制御にどのように寄与しているのかを調べる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 下オリーブ核障害ラットの姿勢実験

疾患に伴う姿勢動作の変化は、姿勢の制御を構成する脳の仕組みを解き明かす手がかりとなる。一方で患者の計測では、疾患が生じている脳部位やその特徴、そして扱える手法に制約があるため、姿勢のメカニズムを解き明かすにあたって、ヒトの運動計測だけでは不十分な点があると考えた。そこで我々はラットを用いて直立状態の姿勢制御系を調べる実験系を構築した。図1Aのように、ラットに後肢2足で直立させ、その時のラットの姿勢をモーションキャプチャ及び床面に配置されたフォースプレートによって詳細に計測できる環境を構築した。2足直立状態を維持するためには、重心を足裏の狭い範囲に留める必要があるため、不安定な状態となる。ラットはこの状態を維持するために脳から姿勢維持の制御指令を与えて身体を動かす。従ってこのときの動作の特徴を調べることで、姿勢制御の性質に迫れると期待できる。

構築した実験系において、小脳障害ラットの運動を評価し、姿勢制御動作の性質を健常ラットと比較することで、障害の姿勢制御への影響を評価した。小脳系において、特に内部モデルの学習に関与する下オリーブ核に薬理的に障害を与え(3アセチルピリジンを腹腔内投与)、姿勢動作の変化を調べた(以下無傷ラットをIntactラット、下オリーブ核に傷害を与えたラットをI0ラットと呼ぶ)。実験では、6匹のIntactラット計11試行、4匹のI0ラット計10試行において60秒以上の直立動作を計測した。モーションキャプチャシステム(計測周波数300Hz)を用いて動作を計測し、動

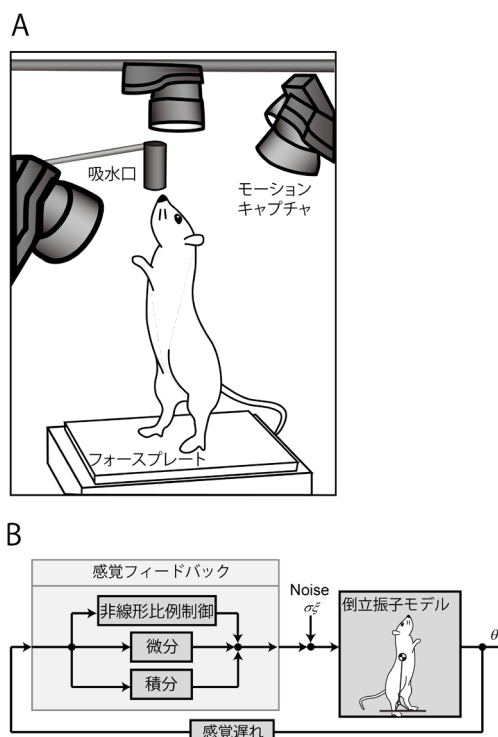


図1A: ラットの直立実験環境。B: 直立姿勢制御系の数理モデル

作から重心位置のパワースペクトラムを求め、Intact ラットと I0 ラットの間で比較を行った。

実験で得られた Intact ラットと I0 ラット間の動作の違いが、制御系のどのような変化によるものかを調べるために、直立制御系の数理モデルを構築し、数理モデルに基づく制御系の定量評価を行った。ラットの姿勢制御系のモデルとして、ラットの身体を足首から重心までを1リンクとする倒立振子とし、安定化制御系として、3次の非線形性を含んだ感覚フィードバック制御を用いる図1Bのモデルを構築した。このシステムモデルは線形比例制御、非線形比例制御、微分制御、積分制御の4つの制御パラメータを持ち、これらの値によって動作が変化する。モデルにラットの身長、体重、感覚遅れを設定し、数値シミュレーションによって動作を計算する。さらに、計算された動作から重心分布とパワースペクトラムを算出し、シミュレーションと実験値の間でこれらの差が小さくなるようにモデルの制御パラメータを探索(同定)する。Intact ラットの動作を基に同定した制御パラメータと、I0 ラットの動作を基に同定した制御パラメータを比較し、制御系における変化を調べた。

## (2) 小脳疾患患者の姿勢計測

ラットにおける研究とともに、小脳疾患患者の姿勢制御系の性質を調べ、実際の人の姿勢制御系における内部モデルの寄与を調べることが、直立姿勢制御系を調べるにあたり重要と考えた。そこで、脊髄小脳患者に直立をしてもらい、25秒間に角度が1度変化する微小な傾斜を与えた。被験者には、傾斜の60秒前から傾斜後60秒間直立を維持してもらい、145秒間の動作を計測した。この速度の傾斜では足の反射系が働かず、上位の神経系による姿勢制御の性質が調べられると期待できる。実験には小脳疾患患者7名、健常者2名に参加して頂いた。フォースプレート(計測周波数1kHz)及びモーションキャプチャ(500Hz)を用いて動作を計測し、重心の動きを調べた。さらに直立制御系の数理モデルとして、比例-微分-積分制御からなる姿勢制御モデルを構成し、健常被験者と脊髄小脳変性症患者の同定を行うことで、小脳疾患が姿勢制御系のどのような機能に影響を与えるかを調べた。

## (3) 予測可能な外乱に対する姿勢動作

直立中の予測及び内部モデルの学習をより直接的に調べるために、直立しているラットに対して合図を与えた後に外乱を与えることで、姿勢における予測制御系の働きを調べる。図1Aのラットが乗る台をモータによって傾斜が変化する台に変更し、ラットの前方にLEDランプを配置して合図が与えられるようにした。実験では、ラットが直立を開始したことを確認した後でランプが消灯し、約1.1秒後に床が0.25秒間で8度後方に傾斜する。動作はハイスピードカメラによって撮影し、LEDランプ消灯から傾斜の約0.3秒後までの重心動作を算出する(動作の算出にはDeepLabCutを用いる)。実験には6匹のIntactラットを用い、それぞれのラットで42~80回の運動計測を行うことで、試行に伴う運動の変化(学習)を調べた。

このような予測と学習が関与するラットの姿勢制御のメカニズムを考えるために、図1Aの制御モデルを、内部モデルの学習と予測によって入力を作る前述のモデル予測制御に置き換えた図2の数理モデルを構成し、ラットの動作データとの比較を行った。ここで、内部モデルはラットの身体の運動方程式をそのまま用い、最適化には垂直からの重心変動量を小さくする評価関数を用いた。また、比較を行うラットの動作は、十分な試行を行った後の動作を用いた。

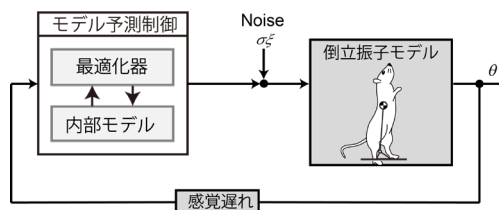


図2 モデル予測制御による予測的姿勢制御動作の数理モデル

## 4. 研究成果

### (1) 下オリーブ核障害ラットの姿勢実験

I0ラットの直立動作を計測し、Intactラットと比較したところ、計測した動作は、Intactラットでは比較的定常的な直立姿勢を保っていたのに対し、I0ラットでは、直立中に前後の大きな振動を伴うとともに、急に姿勢を崩して直立状態が保てなくなる様子が見られた。モーションキャプチャによって計測した動作から重心の動きを算出し、矢状面上の重心位置の確率密度関数(重心分布)、及びパワースペクトラムを調べたところ、重心分布にはIntactラット、I0ラット間で有意な差が見られなかったのに対して、重心位置のパワースペクトルには図3のような違いが見られた。図3はIntactラット及びI0ラットの各試行のパワースペクトラムの値(点線)、及びその平均(実線)であり、垂直線はパワースペクトラムのピーク位置を表す。図からIntactラット、I0ラットとも

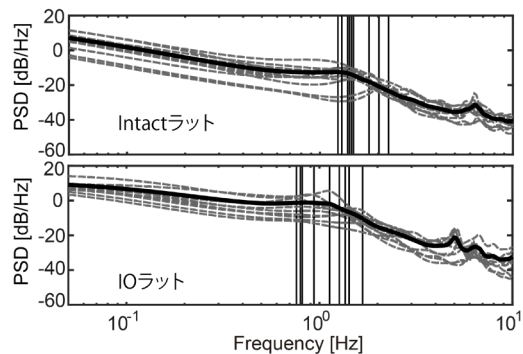


図3 無傷ラット(Intactラット)及び下オリーブ核障害ラット(I0ラット)の重心パワースペクトラム。

に、最も低いピーク周波数が 1Hz 付近にあり、I0 ラットでは、Intact ラットに比べて有意にピーク周波数が低下し ( $P=0.02$ )、パワーが上昇している ( $P=0.001$ ) ことが分かった。

次に、ラットのパワースペクトラムと、数理モデルのパワースペクトラムを比較することで、数理モデルの制御パラメータの定量評価を行った。Intact ラットの動作を基に同定した制御パラメータと、I0 ラットの動作を基に同定した制御パラメータを比較した結果、Intact ラットに対して I0 ラットでは非線形比例制御ゲインの有意な低下が見られた。

このような非線形制御機能がどのように構築され、なぜ I0 ラットではこの機能が低下したのかを考える。制御系の評価に用いた非線形比例制御は、身体が垂直状態付近では制御ゲイン（つまり傾きに対する感受性）が弱く、傾きが大きくなるにつれて制御ゲインが強く働く、制御入力を効率的に用いる感覚フィードバック制御である。このような制御系は、自身の状態が一定期間予測でき、予測された区間での動作状態を最適化するような機構があれば、実現できる（このような制御系はモデル予測制御と呼ばれる）。ヒトや動物は、直立中に将来の安定性の低下を予測して動作に先行した姿勢安定化を行うと指摘され、また小脳疾患患者ではこのような予測的動作が低下する。将来の動作状態の予測には自身の内部モデルが必要となる。下オリーブ核はこの内部モデルの構築に貢献している。すなわち、同定された非線形制御ゲインの低下は、下オリーブ核の障害によって内部モデルが障害され、予測制御機能が低下したことを反映している可能性が考えられる。

## (2) 小脳疾患患者の姿勢計測

脊髄小脳変性症患者及び健常者に対して、ゆっくりと傾斜する床の上で直立をしてもらい、運動を計測したところ、健常被験者では、傾斜後に 60 秒程度をかけてゆっくりと姿勢が垂直に戻っていくのに対し、小脳疾患患者では垂直に戻る性質が見られなかった。比例-微分-積分制御からなる姿勢制御モデルを用いて重心動作を評価したところ、傾斜後に 60 秒程度をかけて垂直に戻る健常者の応答は、積分制御がある場合のみよく再現された。すなわち、このような姿勢制御機能は積分制御によって構成され、小脳疾患患者では、この積分制御機能の不全により、姿勢が垂直に戻らなかった可能性が考えられる。

我々は、この積分制御機能がどのような原理で構成されたのかについて検討を行った。姿勢制御を構成する比例制御、微分制御が現在の姿勢の状態を元に、姿勢を保つように制御入力を生成するのに行うのに対し、積分制御機能は、一定期間内の状態を元に制御入力を生成する。これにより感覚系で検出されない微小な傾斜変化に対して、元の状態に保つように姿勢が制御される。一定期間の状態を得る可能性の一つに予測制御がある。姿勢制御においては、前述のように予測された将来までの状態を元に制御入力が生成されていることが考えられる。さらにモデル予測制御が積分機能を生じることが知られている。したがって、本研究で見られた積分制御機能の低下が、小脳疾患に伴う予測制御機能の低下によって生じた可能性が考えられる。

## (3) 予測可能な外乱に対する姿勢動作

後肢 2 足で直立をしているラットに対し、合図を与えた後に外乱を与えることで、予測可能な条件下での姿勢応答を調べた。同条件下での実験を繰り返し行うことで、学習に伴う姿勢の変化を調べた。図 4 は 1 匹のラット 50 試行 (Trial) における重心の前後方向位置を表す。実験の初期には傾斜によって大きな重心変動があったのに対し、試行を経ることで重心位置の変動が小さくなっていく様子がわかる。このように、ラットが傾斜外乱に対して学習を行うことで、徐々に適応する様子が見られた。

ラットの動作と数値シミュレーションによって得られた図 2 のモデルの動作を比較して、最も動作が近くなる制御パラメータを算出した。その結果、モデル予測制御における予測時間が、ラットの実験系における待機時間 (1.1 秒) とほぼ等しい値になっていた。このことから、傾斜の経験によって学習をしたラットの制御系がモデル予測制御で説明できる可能性が示唆された。

## (4) 研究成果のまとめ

直立姿勢制御における小脳学習系の働きを調べるため、「小脳における身体内部モデルの学習が、直立姿勢制御の構造に含まれ、常に使われている」という仮説を立て、①下オリーブ核障害ラット・小脳患者の制御系と②姿勢学習課題におけるラットの制御系を調べた。その結果、①ラット及び小脳疾患患者の制御系において、共に内部モデルに基づく予測制御系の存在と、障害に伴う予測制御系の機能低下が示唆され、仮説の検証がなされた。さらに②学習後の予測制御系が、モデル予測制御に基づく姿勢制御系によって説明できることを示した。従来の姿勢制御系の研究では、予測系の存在は示唆されていたもの、その制御構造は不明であった。特に姿勢における学習・予測を説明する制御モデルは、本研究を通して初めて構築された。構築された姿勢の予測制御系の構造とそのモデルは、小脳における予期的姿勢制御の働きや、運動学習メカニズムの研究に応用ができ、今後の姿勢制御の予測・学習研究において、重要な役割を持つと考えられる。

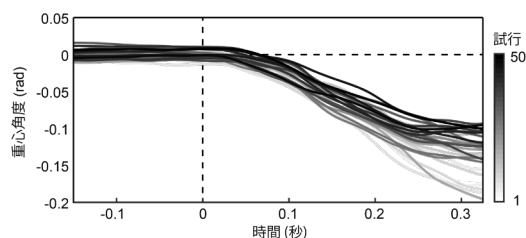


図 4 傾斜前後の重心動作。各線は各試行におけるラットの重心の時系列を表す。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>船戸徹郎, 鴻巣暁, 柳原大  | 4. 巻<br>47          |
| 2. 論文標題<br>ラットの直立姿勢制御の構成原理  | 5. 発行年<br>2021年     |
| 3. 雑誌名<br>Medical Science Digest  | 6. 最初と最後の頁<br>52-55 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし  | 査読の有無<br>無          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |
| 1. 著者名<br>Tamura Daiki, Aoi Shinya, Funato Tetsuro, Fujiki Soichiro, Senda Kei, Tsuchiya Kazuo  | 4. 巻<br>14          |
| 2. 論文標題<br>Contribution of Phase Resetting to Adaptive Rhythm Control in Human Walking Based on the Phase Response Curves of a Neuromusculoskeletal Model | 5. 発行年<br>2020年     |
| 3. 雑誌名<br>Frontiers in Neuroscience   | 6. 最初と最後の頁<br>17    |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3389/fnins.2020.00017  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |
| 1. 著者名<br>Toeda Misaki, Aoi Shinya, Fujiki Soichiro, Funato Tetsuro, Tsuchiya Kazuo, Yanagihara Dai   | 4. 巻<br>13          |
| 2. 論文標題<br>Gait Generation and Its Energy Efficiency Based on Rat Neuromusculoskeletal Model  | 5. 発行年<br>2020年     |
| 3. 雑誌名<br>Frontiers in Neuroscience   | 6. 最初と最後の頁<br>1337  |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3389/fnins.2019.01337  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |
| 1. 著者名<br>Oshima Hiroko, Aoi Shinya, Funato Tetsuro, Tsujiuchi Nobutaka, Tsuchiya Kazuo   | 4. 巻<br>13          |
| 2. 論文標題<br>Variant and Invariant Spatiotemporal Structures in Kinematic Coordination to Regulate Speed During Walking and Running                         | 5. 発行年<br>2019年     |
| 3. 雑誌名<br>Frontiers in Computational Neuroscience   | 6. 最初と最後の頁<br>63    |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3389/fncom.2019.00063  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |



|  |                   |
|--|-------------------|
| 1. 著者名<br>Aoi Shinya, Ohashi Tomohiro, Bamba Ryoko, Fujiki Soichiro, Tamura Daiki, Funato Tetsuro, Senda Kei, Ivanenko Yury, Tsuchiya Kazuo                      | 4. 巻<br>9         |
| 2. 論文標題<br>Neuromusculoskeletal model that walks and runs across a speed range with a few motor control parameter changes based on the muscle synergy hypothesis | 5. 発行年<br>2019年   |
| 3. 雑誌名<br>Scientific Reports   | 6. 最初と最後の頁<br>369 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41598-018-37460-3   | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する      |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Fujiki Soichiro, Aoi Shinya, Funato Tetsuro, Sato Yota, Tsuchiya Kazuo, Yanagihara Dai                                      | 4. 巻<br>8           |
| 2. 論文標題<br>Adaptive hindlimb split-belt treadmill walking in rats by controlling basic muscle activation patterns via phase resetting | 5. 発行年<br>2018年     |
| 3. 雑誌名<br>Scientific Reports  | 6. 最初と最後の頁<br>17341 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41598-018-35714-8  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Ryutaro Sakai, Tetsuro Funato, Soichiro Fujiki, Akira Konosu, Shinya Aoi, Dai Yanagihara         | 4. 巻<br>-             |
| 2. 論文標題<br>Construction of Experimental Environment for Muscle Synergy Analysis of Bipedal Walking in Rats | 5. 発行年<br>2018年       |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of the IEEE International symposium on micro-nano mechatronics and human science     | 6. 最初と最後の頁<br>316-317 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Daiki Tamura, Shinya Aoi, Tetsuro Funato, Soichiro Fujiki, Kei Senda, Kazuo Tsuchiya                                 | 4. 巻<br>-             |
| 2. 論文標題<br>Investigation of Phase Resetting Effect on Phase Response Curve in Human Walking using a Neuromusculoskeletal Model | 5. 発行年<br>2018年       |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of the IEEE International symposium on micro-nano mechatronics and human science                         | 6. 最初と最後の頁<br>318-320 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>伊藤 耕介, 船戸 徹郎              |
| 2. 発表標題<br>モデル予測制御を用いたシンプル二足歩行モデルの構築 |
| 3. 学会等名<br>第33回自律分散システムシンポジウム        |
| 4. 発表年<br>2021年                      |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>藤田 章寛, 鴻巣 暁, 船戸 徹郎, 松木 勇磨, 小松 拓実, 柳原 大 |
| 2. 発表標題<br>ラットの予測制御系のシステムモデル                      |
| 3. 学会等名<br>計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会2020           |
| 4. 発表年<br>2020年                                   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>内田 直輝, Roland Philipp, 大屋 知徹, 原 友紀, 船戸 徹郎, 関 和彦 |
| 2. 発表標題<br>筋シナジー解析による身体変化に対する神経適応機能の解明                     |
| 3. 学会等名<br>計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会2020                    |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|                                     |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>船戸 徹郎                    |
| 2. 発表標題<br>下オリーブ核障害ラットの直立姿勢制御系の定量評価 |
| 3. 学会等名<br>歩行姿勢研究シンポジウム             |
| 4. 発表年<br>2020年                     |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Tetsuro Funato  |
| 2. 発表標題<br>Approaching neural control structure through experiment and modeling of animal movement |
| 3. 学会等名<br>第6回理論応用力学シンポジウム   |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Naoki Uchida, Roland Philipp, Tomonichi Oya, Tetsuro Funato, Kazuhiko Seki.                      |
| 2. 発表標題<br>Muscle synergy analysis of forearm muscles in macaque monkey after cross-tendon transfer surgery |
| 3. 学会等名<br>Neural Control of Movement Conference (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>藤田章寛, 鴻巣暁, 船戸徹郎, 柳原大       |
| 2. 発表標題<br>予測可能な傾斜外乱に対するラットの姿勢動作学習の解析 |
| 3. 学会等名<br>第32回自律分散システムシンポジウム         |
| 4. 発表年<br>2020年                       |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>三ツ木 知愛, 船戸 徹郎, 小松 拓実, 酒井 隆太郎, 鴻巣 暁, 柳原 大 |
| 2. 発表標題<br>歩行の予期的動作の解明のためのラットのVR実験環境の構築             |
| 3. 学会等名<br>第32回自律分散システムシンポジウム                       |
| 4. 発表年<br>2020年                                     |



|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>堀内 雄暉, 船戸 徹郎, 板東 杏太, 東口 大樹, 花川 隆, 柳原 大, 青井 伸也, 土屋 和雄 |
| 2. 発表標題<br>微小な傾斜外乱に対する脊髄小脳変性症患者の姿勢応答                            |
| 3. 学会等名<br>計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会2019                           |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>船戸徹郎                      |
| 2. 発表標題<br>脳卒中回復評価法の大規模データ解析と展望      |
| 3. 学会等名<br>新学術領域 身体性システム 第3回公開シンポジウム |
| 4. 発表年<br>2019年                      |

|                              |
|------------------------------|
| 1. 発表者名<br>船戸徹郎              |
| 2. 発表標題<br>姿勢制御の力学と小脳障害の影響評価 |
| 3. 学会等名<br>第1回小脳リハビリテーション研究会 |
| 4. 発表年<br>2019年              |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Ryutaro Sakai, Tetsuro Funato, Soichiro Fujiki, Akira Konosu, Shinya Aoi, Dai Yanagihara        |
| 2. 発表標題<br>Construction of Experimental Environment for Muscle Synergy Analysis of Bipedal Walking in Rats |
| 3. 学会等名<br>IEEE International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (国際学会)                 |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Daiki Tamura, Shinya Aoi, Tetsuro Funato, Soichiro Fujiki, Kei Senda, Kazuo Tsuchiya                                |
| 2. 発表標題<br>Investigation of Phase Resetting Effect on Phase Response Curve in Human Walking using a Neuromusculoskeletal Model |
| 3. 学会等名<br>IEEE International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (国際学会)                                     |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hiroko Oshima, Shinya Aoi, Katsumi Nakajima, Yasuo Higurashi, Tetsuro Funato, Nobutaka Tsujiuchi, Akihito Ito, Kazuo Tsuchiya      |
| 2. 発表標題<br>Muscle activity coordination of upper limbs, trunk, and lower limbs during bipedal and quadrupedal walking in the Japanese macaque |
| 3. 学会等名<br>2nd International Symposium on Embodied-Brain Systems Science (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Misaki Toeda, Shinya Aoi, Soichiro Fujiki, Tetsuro Funato, Kazuo Tsuchiya, Dai Yanagihara                                |
| 2. 発表標題<br>Investigating energy efficiency of gait in rat based on the muscle synergy hypotheses using a neuromusculoskeletal model |
| 3. 学会等名<br>2nd International Symposium on Embodied-Brain Systems Science (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Ryutaro Sakai, Tetsuro Funato, Akira Konosu, Soichiro Fujiki, Shinya Aoi, Dai Yanagihara |
| 2. 発表標題<br>Muscle Synergy Analysis of Bipedal Walking in Rats                                       |
| 3. 学会等名<br>2nd International Symposium on Embodied-Brain Systems Science (国際学会)                     |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Tetsuro Funato and Arito Yozu  |
| 2. 発表標題<br>Muscle synergy analysis of upper limb movements for evaluating motor recovery after stroke |
| 3. 学会等名<br>Workshop in IEEE-EMBC (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>東松 龍英, 青井 伸也, 藤木 聡一郎, 船戸 徹郎, 泉田 啓, 土屋 和雄 |
| 2. 発表標題<br>多脚ロボットのピッチフォーク分岐を利用した旋回機動性の実験的考察         |
| 3. 学会等名<br>第31回自律分散システム・シンポジウム                      |
| 4. 発表年<br>2019年                                     |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>酒井 隆太郎, 船戸 徹郎, 鴻巣 暁, 藤木 聡一郎, 青井 伸也, 柳原 大 |
| 2. 発表標題<br>小脳梗塞に伴う歩行失調機序の解明のためのラットのシナジー解析           |
| 3. 学会等名<br>第31回自律分散システム・シンポジウム                      |
| 4. 発表年<br>2019年                                     |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

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

6. 研究組織（つづき）

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                         | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                     | 備考 |
|-------|---|---|----|
| 研究分担者 | 青井 伸也<br><br>(Aoi Shinya)<br><br>(60432366)       | 京都大学・工学研究科・准教授<br><br><br><br>(14301)     |    |
| 研究分担者 | 藤木 聡一郎<br><br>(Fujiki Soichiro)<br><br>(90770173) | 獨協医科大学・医学部・講師<br><br><br><br>(32203)      |    |
| 研究分担者 | 四津 有人<br><br>(Yozu Arito)<br><br>(30647368)       | 東京大学・大学院工学系研究科・准教授<br><br><br><br>(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 |
|---------|---------|
|         |         |