

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2018～2020

課題番号：17KK0109

研究課題名（和文）Motion Hacking: 昆虫の歩行を司る脚間協調機序を紐解く介入法の開拓

研究課題名（英文）Motion Hacking: Pioneering a Novel Deliberate Intervention Methodology toward Elucidating Hexapedal Interlimb Coordination on Resilient Walking

研究代表者

大脇 大 (Owaki, Dai)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40551908

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,700,000円

渡航期間： 8ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究では、ナナフシの神経生理学的、動物行動学的研究、ならびにその知見を用いたモデル化、ロボットへの適用に関して高い業績を上げている研究機関であるBielefeld大学（独）において、申請者が提唱している「運動へのシステム工学的介入による生物の適応メカニズムの解明」というアプローチを発展させた。具体的には、昆虫自身の感覚運動機能を残存させた状態で、筋への電気刺激により、脚の運動をハッキングする方法論(Motion Hacking法)を確立し、介入者の意図どおりに脚の運動を変化させたときの昆虫自身の神経系による脚間協調過程を観察し、脚間協調メカニズムの解明を試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

外部からの筋電気刺激によって、昆虫の歩行中の脚運動に介入することを可能とするMotion Hacking法を確立することに成功した。具体的には、筋刺激時間-生成トルク間の線形関係に基づく生成トルクモデルを構築したことにより、脚運動の制御可能性を示した。この知見は、歩行運動中の脚運動への介入実験とそのデータ収集に有効活用でき、今後の歩行メカニズム解明に有用である。社会的意義としては、本研究により示唆された昆虫の脚間協調制御メカニズムをロボットに実装することにより、昆虫に比肩する適応能力を有し、脚の切断などの故障に対してレジリエントな歩行ロボットシステムの構築につながる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed an approach proposed by the applicant, "Elucidation of the adaptive mechanisms of animals through systems engineering intervention in locomotion," at Bielefeld University (Germany), which has been highly successful in neurophysiological and animal behavioral research on stick insects, modeling using the findings, and application to robots. Specifically, we established a methodology, called "Motion Hacking", to hack leg movements by electrical stimulation of muscles while retaining the insect's own sensorimotor functions, and observed the inter-leg coordination process by the insect's own nervous system when the leg movements were changed as intended by the intervener. Through the novel methodology, we attempted to elucidate the inter-leg coordination mechanism during locomotion.

研究分野：Robotics-inspired Biology, ロボティクス, 制御工学

キーワード：Motion Hacking 筋電気刺激 昆虫 脚間協調

## 1. 研究開始当初の背景

昆虫の脚間協調メカニズムの解明において、感覚フィードバックの寄与は極めて重要である。この効果に着目して基課題（基盤研究(B)）をさらに掘り下げていくことは、脚間協調メカニズムの精緻化に大きな手がかりを与える可能性が高い。実際に、脚切断時に発現する脚間の筋電位パターンの変容において、自脚のみではなく隣接脚の感覚情報が影響している、という興味深い結果を確認した [1]。このメカニズムを解明するためには、昆虫自身の神経系および感覚運動機能を残存させた状態で運動へ介入する技術が不可欠である。

そこで本研究では、ナナフシの神経生理学的、動物行動学的研究、ならびにその知見を用いたモデル化、ロボットへの適用に関して高い業績を上げている研究機関である Bielefeld 大学（独）において、申請者が提唱している「運動へのシステム工学的介入による生物の適応メカニズムの解明」というアプローチを発展させる。具体的には、昆虫自身の感覚運動機能を残存させた状態で、筋への電気刺激により脚の運動をハッキングする方法論（Motion Hacking 法）を確立し、介入者の意図どおりに脚の運動を変化させたときの昆虫自身の神経系による脚間協調過程を観察することで、その背後に隠れた「ロジック」を明らかにする。

## 2. 研究の目的

本研究では、昆虫自身の感覚運動機能を残存させた状態で、筋への電気刺激により脚の運動をハッキングする方法論（Motion Hacking 法）を確立することを目的とする。介入者の意図どおりに脚の運動を変化させたときの昆虫自身の神経系による脚間協調過程を観察することで、その背後に隠れた「ロジック」を明らかにすることを旨とする。

## 3. 研究の方法

Motion Hacking 法確立のため、申請者が主として筋への電気刺激装置の開発を担当する。海外共同研究者の有する対象昆虫（ナナフシ）の行動神経学的知見に基づき、同刺激装置を用いた筋への刺激法（電極の位置、太さなど）を検討し、試行錯誤を通して筋の選択的制御法を確立する

### (1) 筋刺激実験

本研究では、モデル生物として、ナナフシ (*Carausius morosus*)、成虫雌 20 個体 (Dürr's Lab.@Bielefeld Univ. のコロニー) を用いた。電気刺激による制御対象の筋としては、ナナフシの歩行において主要な筋となる、Protractor (遊脚を前方に振る筋)、Retractor (支持脚を後方に蹴る筋)、および Levator (遊脚を上方に挙げる筋) を採用した。脚の各筋への電気刺激のため、自作の筋刺激装置を開発した。Raspberry Pi 3 B+に外部回路（フォトカプラなどを含む）を実装することで、外部とは電氣的に isolate された 4 チャンネルの PWM (Pulse Width Modulation) 信号を生成可能な刺激装置を設計した。筋への電気刺激 PWM 信号の周波数 (1~120Hz)、Duty 比 (0~100%)、出力電圧 (0~18V) を任意に変更可能とすることで、これらのパラメータが生成される脚運動に与える影響を検証した。

図 1 左に示すように、ナナフシを固定した状態で、3 筋のうちの 1 つの筋を刺激した際に対応する関節が生成するトルクを計測した。トルクの計測には Force transducer (ひずみセンサを内蔵、同大学ワークショップオーダーメイド) を用い、脚の固定点で発生する力を計測することで関節で発生するトルクを計算した。電気刺激装置が発生する PWM 信号を出力するバースト時間  $T_{stim}$  [s] と発生する関節トルク  $\tau$  [uNm] の関係を調べた。各個体のそれぞれの筋に対して、1 試行 (1 種類のパラメータの組み合わせ) 中に 50 回以上の電気刺激を行った。

### (2) 歩行介入実験

生物のリズム生成、周期的な運動生成を司るメカニズムを明らかにする目的で、外乱に対する位相応答曲線 (Phase Response Curve, PRC) を用いた解析が行われてきた [2]。しかしながら、これまでの位相応答に着目した研究では、人工的な実験環境 (1 本の脚しか動かすことができない拘束など) や精度の低い機械的な外乱付加による解析がほとんどであった。そこで本研究では、著者らが開発した筋への電気刺激により脚の運動をハッキングする Motion Hacking 法を、昆虫の歩行中の位相応答解析に適用する。外部から脚の運動自身を制御し、それによる脚運動の変化に対する位相応答解析を行うことで、外乱に対する昆虫の適応的な脚間および脚内協調メカニズムの抽出を試みる。

本実験では、モデル生物として、ナナフシ (*Carausius morosus*)、成虫雌 20 個体 (Dürr's Lab.@Bielefeld Univ. のコロニー) を用いた。電気刺激による制御対象の筋としては、ナナ

フシの歩行において主要な筋となる, **Protractor** (遊脚を前方に振る筋), **Retractor** (支持脚を後方に蹴る筋) を採用した. (1) の成果から, PWM 信号のバースト時間 (~500ms) と生成される関節トルクに線形性を見出し, ナナフシの歩行中(1 周期約 1s)での制御可能性が示されている. 歩行中の位相応答曲線を抽出するための実験環境として, シリコンオイルを塗布した平面 (**slippery ground**) 上にナナフシの各脚が接地する高さ胸部のみを固定し, 自発的に歩行させた. 上部から USB カメラ (120fps) で動画を撮影し, 脚運動の解析データを記録した (図 1 右). **Raspberry Pi** から刺激タイミングと同期したデジタル出力信号を用いて LED を点灯させ, 筋への刺激タイミングの識別信号とした.

記録した動画から脚の運動を定量化するための手段として, オープンソースツールボックスである **DeepLabCut** [3, 4] (深層学習を用いたマーカレス姿勢推定アルゴリズム) を使用した. 動画から, 歩行中のナナフシの頭部, 各体節, 各脚の関節位置を推定し, その幾何学的情報から, 固定された体軸と **Femur** セグメント間の角度を計算することで各脚の前後運動を数値化した (図 2 右). 脚が後方に運動している期間を支持脚期 (**Stance phase**), 脚が前方に運動している期間を遊脚期 (**Swing phase**) と近似し, 各脚の運動位相  $\phi_i$  と歩行周期  $T$  を算出した.

本実験では, ナナフシの歩行中に, 右中脚の **Protractor** と **Retractor** それぞれを電気刺激し, 外部から脚運動を変化させた際の位相応答曲線の抽出を試みた. 電気刺激した右中脚の運動位相を  $\phi_{RM}$  (この位相は, 環境との相互作用も含む右中脚の運動の位相であり, 神経細胞の発火など, 制御を司る位相のみでないことに注意) とし, 脚運動ダイナミクスは次式のように単純化する:

$$\dot{\phi}_{RM} = \omega + Z(\phi_{RM})I_i(t) \quad (1)$$

ここで,  $\omega$  は脚運動の固有周波数 (通常歩行時の歩行周波数),  $I_i(t)$  が筋刺激による脚運動への外乱 ( $i$  は刺激回数),  $Z(\phi_{RM})$  が  $I_i(t)$  に対する位相応答関数である. 位相応答関数  $Z(\phi_{RM})$  は, 次式で記述されるシンプルなインパルス法 (直接法 [5, 6]) により推定した:

$$Z(\phi_{RM}) = \frac{2\pi}{\mu} \Delta_i = \frac{2\pi T - \tau_i}{\mu \tau_i} \quad (2)$$

ここで,  $T$  は通常歩行時の右中脚の平均歩行周期 (0.8036±0.2526 s, 415 周期のデータで平均),  $\tau_i$  は  $i$  番目の筋刺激により変化した歩行周期,  $\mu$  は刺激強度に応じたスケールパラメータを示す.

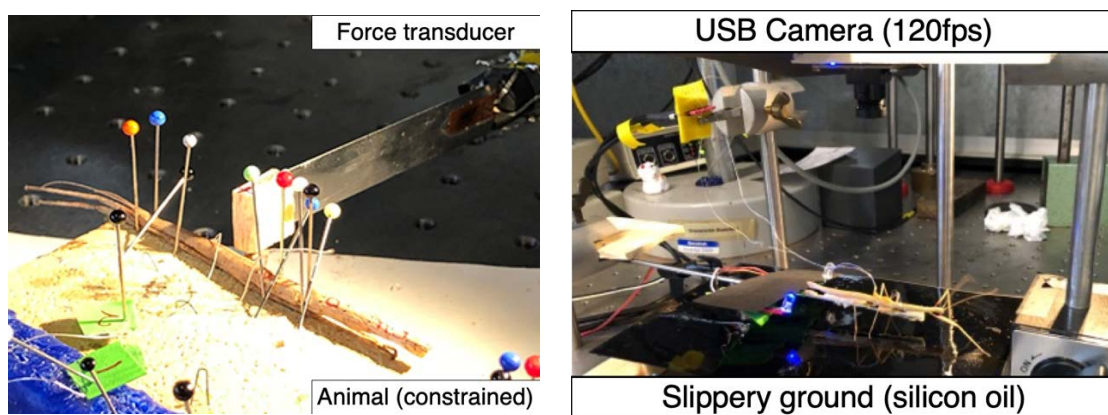


図 1 Experimental Settings

#### 4. 研究成果

##### (1) 筋刺激実験

図2左に、2V, 50Hz, 30%の Duty 比の PWM 信号により Protractor を刺激した際に発生したトルクのプロファイルを示す。興味深いことに、 $\sim 500\text{ms}$  の範囲において、刺激バースト時間  $T_{sti}$  と発生した関節トルク  $\tau$  に線形の関係が見てとれる。計測を行った 20 個体において、さまざまなパラメータ、3 つの各筋で、同様の実験を行い、ほぼすべての条件で同様の傾向が確認されている。詳細なデータは今後論文として公表する。

##### (2) 歩行介入実験

図2下は、1 個体の歩行中の Protractor (3 秒毎に 300 or 400ms 間刺激,  $n=79$  回刺激), Retractor (3 秒毎に 200 or 300ms 間刺激,  $n=111$  回刺激) それぞれに対する位相応答曲線を示す。ナナフシの歩行は自発的に発現するため、周期的に刺激を入力することで歩行周期中のランダムなタイミング (位相) で脚運動に対する外乱が生成される。図中の  $\phi_{RM}=0, 2\pi$  は, Swing phase から Stance phase への遷移タイミング (接地) を示す。赤の縦線は, Stance phase から Swing phase への遷移タイミング (離地) の平均を示している。同図の位相応答関数から Retractor への刺激においては強い位相依存性が確認できるが, Protractor への刺激に対しての位相依存性は弱いことがわかる。今後は, 多個体 ( $N=11$ ) での解析 (共通性や個別性), 右中脚への筋刺激が他の脚の位相応答関数に及ぼす効果 (脚間協調) の解析, などを行い, 研究成果として公表する。

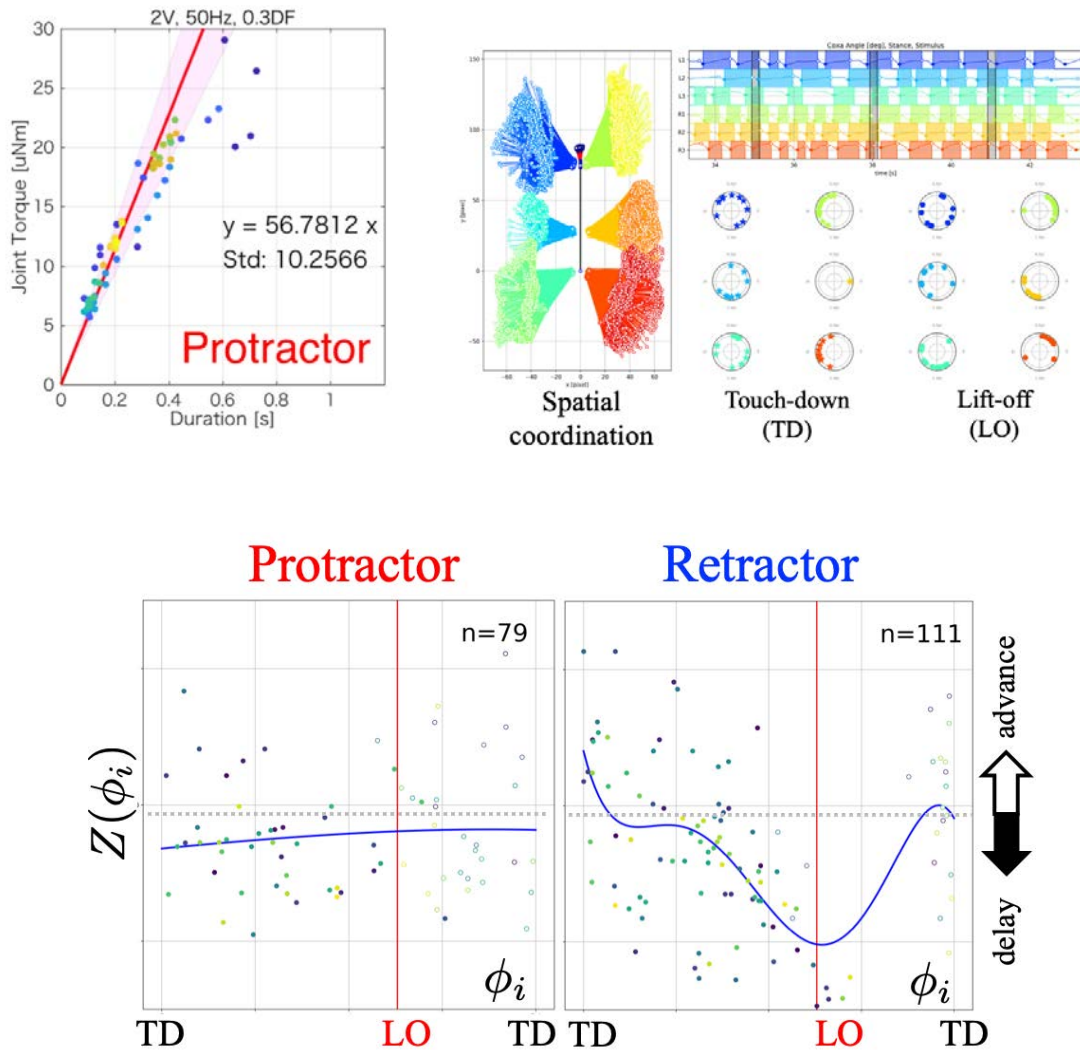


図2 Results

文献

- [1] Dai Owaki, Hitoshi Aonuma, Yasuhiro Sugimoto, Akio Ishiguro, Leg amputation modifies coordinated activation of the middle leg muscles in the cricket *Gryllus bimaculatus*, Scientific Reports, Vol. 11, 1327, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79319-6>, 2021.
- [2] N. W. Schultheiss, A. A. Prinz, R. J. Butera, Phase Response Curves in Neuroscience: Theory, Experiment, and Analysis, Springer 2012.
- [3] A. Mathis, P. Mamidanna, K. M. Cury, T. Abe, V. N. Murthy, M. W. Mathis, and M. Bethge, DeepLabCut: markerless pose estimation of user-defined body parts with deep learning, Nature Neuroscience, 21, 1281/1289, 2018.
- [4] T. Nath, A. Mathis, A. C. Chen, A. Patel, M. Bethge, and M. W. Mathis, Using DeepLabCut for 3D markerless pose estimation across species and behaviors, Nature Protocols, 14, 2152/2176, 2019.
- [5] T. Imai and T. Aoyagi, Improvement effect of measuring phase response curves by using multi-cycle data, NOLTA, IEICE. 7, 58/65, 2016.
- [6] T. Funato, Y. Yamamoto, S. Aoi, T. Imai, T. Aoyagi, N. Tomita, K. Tuchiya, Evaluation of the Phase-dependent Rhythm Control of Human Walking Using Phase Response Curves, PLOS Comput. Biol., 12, e1004950, 2016.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 大脇大	4. 巻 54
2. 論文標題 脚を切られてもあるき続ける昆虫とロボット	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 昆虫と自然	6. 最初と最後の頁 31-34
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 大脇大	4. 巻 37
2. 論文標題 動物の歩容遷移を再現する四脚ロボット	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 14-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7210/jrsj.37.126	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 R. Zamboni, D. Owaki, M. Hayashibe	4. 巻 8
2. 論文標題 Adaptive and Energy-efficient Optimal Control in CPGs through Tegotae-based Feedback	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Front. Robot. AI	6. 最初と最後の頁 632804
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/frobt.2021.632804	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 Owaki Dai, Horikiri Shun-ya, Nishii Jun, Ishiguro Akio	4. 巻 15
2. 論文標題 Tegotae-Based Control Produces Adaptive Inter- and Intra-limb Coordination in Bipedal Walking	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Neurorobotics	6. 最初と最後の頁 629595
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fnbot.2021.629595	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 Sun Tao, Xiong Xiaofeng, Dai Zhendong, Owaki Dai, Manoonpong Poramate	4. 巻 8
2. 論文標題 A Comparative Study of Adaptive Interlimb Coordination Mechanisms for Self-Organized Robot Locomotion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Robotics and AI	6. 最初と最後の頁 638684
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/frobt.2021.638684	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 Owaki Dai, Aonuma Hitoshi, Sugimoto Yasuhiro, Ishiguro Akio	4. 巻 11
2. 論文標題 Leg amputation modifies coordinated activation of the middle leg muscles in the cricket <i>Gryllus bimaculatus</i>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1327
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-79319-6	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 Yanagisawa Ryota, Shigaki Shunsuke, Yasui Kotaro, Owaki Dai, Sugimoto Yasuhiro, Ishiguro Akio, Shimizu Masahiro	4. 巻 21
2. 論文標題 Wearable Vibration Sensor for Measuring the Wing Flapping of Insects	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 593 ~ 593
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s21020593	査読の有無 有
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 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 D. Owaki, V. Durr, J. Schmitz
2. 発表標題 Motion Hacking -Toward Control of Insect Walking-
3. 学会等名 AMAM2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Owaki, V. Durr, J. Schmitz
2. 発表標題 Rhythm Control Analysis of Stick Insect Walking Using Phase Response Curves Extracted via Muscle Electrostimulation
3. 学会等名 Japanese Society of Comparative Physiology and Biochemistry 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Owaki, V. Durr, J. Schmitz
2. 発表標題 Motion Hackingによるナナフシの歩行の位相応答解析
3. 学会等名 第32回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 D. Owaki, V. Durr, J. Schmitz
2. 発表標題 Motion Hacking: Joint Torque Control Based on External Electro- stimulation of Leg Muscles in the Stick Insects
3. 学会等名 Japanese Society of Comparative Physiology and Biochemistry 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 D. Owaki, V. Durr, J. Schmitz
2. 発表標題 Motion Hacking -昆虫の歩行を制御する研究-
3. 学会等名 第31回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 D. Owaki, V. Durr, J. Schmitz
2. 発表標題 Motion Hacking: A Method for Interference with Neural Control of Walking, Based on External Muscle Stimulation in Stick Insects
3. 学会等名 The 13th Gottingen Meeting of the German Neuroscience Society (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Dai Owaki
2. 発表標題 Gait Recovery with Prosthetic Legs in the Cricket After Leg Amputation
3. 学会等名 Japanese Society of Comparative Physiology and Biochemistry 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Dai Owaki
2. 発表標題 Motion Hacking Understanding by Controlling Animals
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2020 in Kanazawa
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Dai Owaki website www.oscillex.org Research Topic in Frontiers <a href="https://www.frontiersin.org/research-topics/13483/biological-and-robotic-inter-limb-coordination">https://www.frontiersin.org/research-topics/13483/biological-and-robotic-inter-limb-coordination</a> 東北大学工学研究科ロボティクス専攻林部・大脳研究室 <a href="http://neuro.mech.tohoku.ac.jp/">http://neuro.mech.tohoku.ac.jp/</a>
---

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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	デュル フォルカー  (Durr Volker)	ビーレフェルト大学・Faculty of Biology・Professor	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	シュミット ヨセフ  (Schmitz Josef)	ビーレフェルト大学・Faculty of Biology・Associate Professor	

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			
Germany	Bielefeld University			
デンマーク	University of Southern Denmark			
イタリア	Politecnico di Milano			