

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H03331

研究課題名（和文）解剖学的神経筋骨格モデルに基づく二足歩行生成の深層強化学習とその人類学応用

研究課題名（英文）Deep reinforcement learning for generation of bipedal locomotion based on anatomical neuromusculoskeletal models and its anthropological applications.

研究代表者

荻原 直道 (Ogihara, Naomichi)

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・教授

研究者番号：70324605

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、精密3次元神経筋骨格モデルと深層強化学習を活用して、ヒトの実3次元歩行運動を再現できる二足歩行運動の動力学的シミュレーションを構築した。具体的には、97の感覚情報から22の運動指令を出力する深層ニューラルネットワークを構築し、運動制御の深層強化学習を試みた。その結果、実歩行データと必ずしも類似しないなど問題が残されているが、二足歩行生成を実現することが可能となった。また解剖学的に精密なヒト足部の3次元有限要素モデルを構築し、ヒト二足歩行中の運動力学データをもとに立脚期の中の下腿運動を強制変位として与え、歩行中の足部骨格動態やそれによって生じる力作用を計算機内に再現することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的・社会的意義は、ヒトの歩行生成メカニズムにかかわる様々な仮説を検証するプラットフォームの基礎を構築した点にある。具体的には、二足歩行の進化の道筋に構成論的に迫るための、「仮想進化シミュレーション」、高齢者における転倒リスクの増大メカニズムを検討する「仮想歩行障害シミュレーション」など歩行シミュレーションの実用化への道筋をつけた。

研究成果の概要（英文）：In this study, we constructed a dynamic simulation of bipedal locomotion capable of reproducing human actual 3D walking movements by utilizing a human 3D neuromusculoskeletal model and deep reinforcement learning. The musculoskeletal model employed in this research consisted of a deep neural network that outputs 22 muscle activations from 97 sensory inputs. We attempted deep reinforcement learning for bipedal locomotion based on the Deep Deterministic Policy Gradient method. As a result, although issues remain, it became possible to generate bipedal locomotion. Additionally, we successfully constructed an anatomically precise 3D finite element model of the human foot. By utilizing kinematic data during human bipedal locomotion, we reproduced skeletal dynamics of the foot during walking within a computational environment.

研究分野：人類学

キーワード：歩行シミュレーション 深層強化学習 歩行生成 順動力学 足部モデル

## 1. 研究開始当初の背景

歩行運動は、上位中枢がその一挙一動を細かく制御するのではなく、脊髄に存在するリズム生成神経回路網が生成する各筋への交代性の運動指令により自律的に生み出されることが神経生理学的研究より明らかとなっている。ただしこのリズム生成機構のみで外部環境の変化や外乱に対して適応性の高い強靱な歩行が実現されるわけではない。脊髄反射系など様々な感覚器からのフィードバック情報や、上位神経系からの入力に基づいて、各筋への運動指令が適切に調整されることによって、はじめて適応性の高い二足歩行の生成が可能となっている。この、歩行中に知覚される膨大な感覚情報がどのように統合され、状況に応じて運動指令を適切に調整しているのかを読み解くことが、ヒトの直立二足歩行の進化を理解する上で不可欠であると考えられる。しかし、ヒトの歩行に関わる生体情報をすべて直接的に計測することは様々な制約から実質的には不可能である。

一方、それを補完する試みとして、近年、歩行運動の神経制御機構の数理モデルとヒトの身体筋骨格系の力学モデルを構築し、両者と環境との動的相互作用からその直立二足歩行運動を計算機内に再現することを通して、歩行の支配原理を理解しようとするシミュレーション研究が数多く試みられている。神経筋骨格系全体をモデル化してその振る舞いを計算機内に再現する試みは、それ自身が歩行情報処理を読み解き、歩行生成メカニズムに関わる様々な仮説を検証するプラットフォームを構築することに他ならない。しかし、従来のシミュレーションモデルは、ヒトの直立二足歩行の進化、力学、制御を議論ための十分な精度、妥当性を未だ有しておらず、そのポテンシャルとは裏腹に、現在のところ医学、生物学、人類学における方法論としてほとんど重要視されていないのが実情である。

特に問題と考えられるのは、歩行シミュレーションにおける足部筋骨格構造の極端な単純化である。歩行運動は、床面から足裏に作用する反力を筋力によって適切に制御して身体を移動させる巧妙な力学現象である。したがって、環境との力学的相互作用を司る足部のモデル化誤差は歩行の力学計算に、ひいてはそこから解読しようとする歩行神経系の情報処理原理に最も大きな影響を与えることになる。にもかかわらず、多数の骨と筋・靭帯など粘弾性体により複雑に構成された足部骨格構造は、通常一つの剛体三角形としてモデル化され、その機構に内在する歩行機能は、現在までほとんど考慮されてこなかった。

もう一つの問題点は、ある評価関数に基づいて適切な歩行を実現できるように、神経回路モデルの多数のパラメータを効率的に学習させることができなかったことが挙げられる。歩行運動の本質は、脊髄のリズム生成神経回路網が生成する運動指令の、脊髄反射回路による調整・修飾にあり、実際にヒトの二足歩行においても歩行中のヒラメ筋の筋活動の約半分が反射回路に起因していることが示されている。こうした歩行中の反射回路の仕組みをシミュレーションにより構成論的に調べることは、歩行の情報処理を読み解く上で、また歩行シミュレーションの医学・生物学応用のために極めて重要であるが、それを実現する歩行生成神経回路モデルとその効果的な学習則の構築が、大きく立ち後れていた。しかし、近年注目を集めているディープラーニング(深層強化学習)を適用すれば、比較的複雑な歩行モデルを構築しても、効率的に歩行運動を学習させることができると期待される。

## 2. 研究の目的

本研究では、足部構造を正しくモデル化したヒトの身体筋骨格モデルを構築し、深層強化学習を活用して神経生成神経回路モデルのパラメータを学習させることでヒトの実 3 次元歩行運動を相応の精度で再現できる二足歩行運動の動力学的シミュレーションを構築することを目的とした。計算機内に再現する歩行の神経筋骨格系全体の振る舞いを解析することを通して、ヒトの二足歩行運動の神経情報処理と、ヒトの身体構造に内在する歩行生成知能を構成論的に読み解くことを目指した。

## 3. 研究の方法

### (1) 解剖学的に精密な足部筋骨格モデルの構築

本研究では、ヒト足部の解剖学的に精密な有限要素モデルを構築し、接地時の挙動を解析することを通して、ヒト足部構造が地面との力学的相互作用や足部変形に与える影響を明らかにすることを試みた。まず、成人男性 1 名の足部 CT 断層画像に基づいてヒト足部の解剖学的に精密な有限要素モデルを構築した。具体的には CT 断層画像から閾値処理に基づいて足部皮膚表面と足部を構成する骨を抽出した。各サーフェスで囲まれた空間をテトラ要素で、その周囲をシェル要素でメッシュした。骨は線形弾性材料でモデル化し、関節軟骨部は接触を考慮した線形弾性材料としてモデル化した。軟組織と皮膚は超弾性 Ogden 材料で、靭帯と足底腱膜は張力のみ生成するバネ要素としてモデル化した。各物性値は文献に基づいて決定した。また、足部と床面の接触は剛壁によりモデル化した。有限要素解析には RADIOSS (Altair Engineering, USA) を使い、陽解法による有限要素シミュレーションをおこなった。

構築した足部有限要素モデルの妥当性を評価するため、屍体足標本に静荷重を与えた際の足

根骨運動を、2 方向 X 線透視システムを用いて 3 次的に計測し、それを同じ荷重条件における足部有限要素モデルの挙動と比較することを試みた。本計測は、慶應義塾大学医学部解剖学教室の管理・指導の下に、医学部クリニカルアナトミーラボにて行われており、慶應義塾大学の倫理審査を通過したものである。具体的には屍体足脛骨におもりを載せることで垂直荷重を与えたときの X 線透視画像を撮影し、モデルマッチング手法を用いることで、静荷重条件下における屍体足部骨格運動を 3 次元再構築した。そして、距骨下関節、踵立方関節、距舟関節の 3 次元角度変化を算出し、これら 3 関節の 3 次元角度変化を屍体実験の実計測データと足部有限要素モデルに基づくシミュレーションの間で比較した。

構築した足部有限要素モデルを用いて、静止立位時の足部と床面の力学的相互作用を再現した。またヒト二足歩行のモーションキャプチャデータに基づいて脛骨に強制変位、さらにアキレス腱に張力を作用させ、立脚期における足部と床面との力学的相互作用の結果起こる足部骨格挙動を、動的陽解法有限要素法によって再現することを試みた。

## (2) 深層強化学習に基づく二足歩行運動の生成

本研究では、3 次元筋骨格モデルと深層ニューラルネットワークからなる神経筋骨格モデルに基づいて、二足歩行の生成を実現することを試みた。筋骨格モデルには、Stanford 大学で開発された 7 節片側 11 筋からなる解剖学的に精密な 3 次元筋骨格モデルを用いた[1]。各筋には筋の長さ-力関係、速度-力関係など筋の力学特性が考慮され、神経系からの運動指令 (0~1 の連続量) に基づいて各筋は筋張力を生成する。

神経系モデルは、歩行運動の生成に密接に関与していると考えられる末梢系の感覚器である、筋紡錘、ゴルジ腱器官、関節受容器、足底触覚受容器、および前庭器官を考慮し、下肢筋すべての  $\alpha$  運動ニューロンへ結合している多層ニューラルネットワークとしてモデル化した。具体的には、前庭器官で感知される体幹節の角度・並進速度、角速度、関節受容器で感知される各関節の角度・角速度、足底触覚受容器で感知される左右の床反力、筋紡錘で感知される各筋の筋長・筋収縮速度、ゴルジ腱器官で感知される筋張力の計 97 感覚情報を入力とし、計 22 筋への運動指令を出力とする多層ニューラルネットワークとしてモデル化した (図 1)。

本研究では、本神経回路モデルに 3 次元筋骨格モデルの二足歩行を学習させるために、深層強化学習を適用した。強化学習とは、機械学習の枠組みの一つであり、意思決定を行うシステムであるエージェント (agent) が、与えられた環境 (environment) と相互作用する中で報酬を最大化するような行動パターンを試行錯誤的に学習する枠組みである。その中でも特に身体運動制御のように状態 (感覚情報) と行動 (運動指令) が多次元の連続量で表される場合に有効な、方策勾配法に基づく actor-critic 型の深層強化学習、具体的には Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) アルゴリズム[2]の一種である Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient (TD3)アルゴリズム[3]を用いて二足歩行の生成を試みた。

上述の感覚情報から運動指令を決定するニューラルネットワークが actor 器に対応する。一方、actor 器の振る舞いを評価する critic 器は、感覚情報 (状態) と運動指令 (行動) を連結させた情報を入力とし、ある状態におけるある行動の価値の推定値 (スカラー量) を出力するニューラルネットワークである。本研究では、適切な二足歩行が行えるほど高くなる報酬に基づいて、agent に二足歩行を学習させることを試みた。報酬関数は、歩行距離、運動指令の二乗和、体幹角度の垂直性、左右対称性などを組み合わせて定義し、学習過程においてその各項の重みを段階的变化させるようにした。

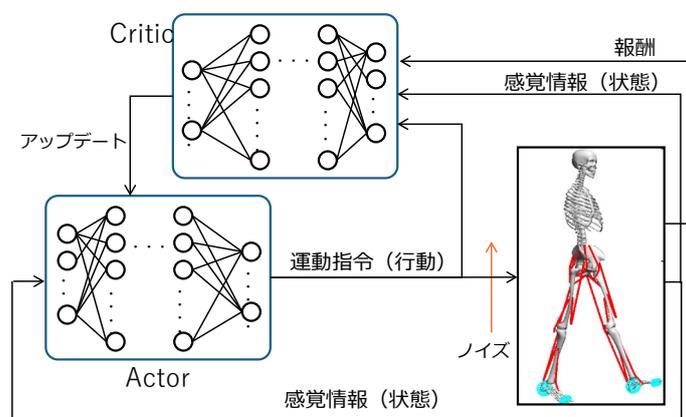


図 1 3次元筋骨格モデルと神経回路モデル

## 4. 研究成果

### (1) 解剖学的に精密な足部筋骨格モデルの構築

図 2 に構築したヒト足部有限要素モデルを示す[4]。鉛直方向荷重における足部有限要素モデルの挙動を屍体足の挙動と比較すると、足根骨関節の運動は主に内外反および内外転角度に表れるが、これら関節角度変化の向きと大きさは両者でほぼ一致し、構築した足部有限要素モデル

は実足部の挙動をある程度再現できていることを確認した。

静止立位時の足部と床面の力学的相互作用を再現し、チンパンジーのそれと比較した結果、ヒト足部は縦アーチによって足圧中心がより前方に位置することが明らかになった。また、ヒト足部は、立脚期後期において推進力を効果的に生成するために、相対的に大きな弾性エネルギーを蓄えられることが明らかとなった。

動的陽解法有限要素法に基づいて、立脚期の足部挙動を再現した結果、生成された足部運動と床反力は、実二足歩行時のそれとほぼ一致し、本モデルによりヒト二足歩行中の3次元足部動態を再現することが可能となった(図2B)。解剖学的に詳細な足部有限要素モデルによる二足歩行シミュレーションは、足部形態と二足歩行機能の関係を明らかにする上で有効な手法である。二足歩行時に足部に生じる力学的挙動を再現し、ヒト特有の足部構造が生み出す地面との力学的相互作用や足部変形動態を詳細に解析することを通して、ヒト足部構造に内在する動的歩行機能を明らかにする基盤を構築できた。

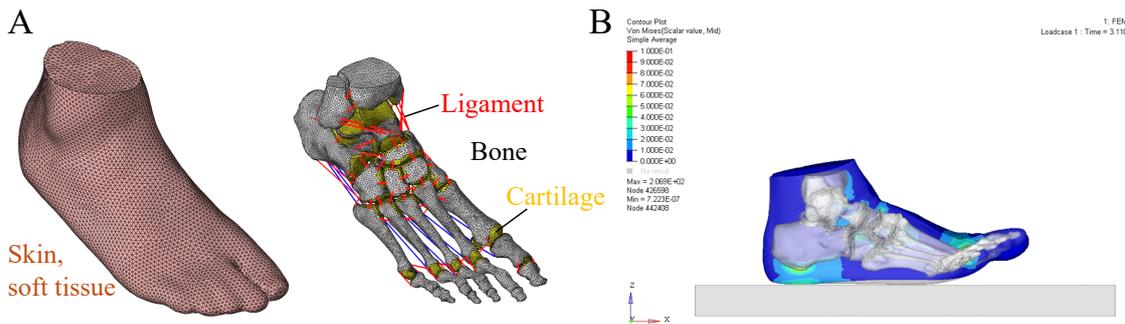


図2 足部3次元有限要素モデル(A)と動的陽解法に基づく二足歩行シミュレーション(B)

## (2) 深層強化学習に基づく二足歩行運動の生成

本研究では、最初に静止立位の生成を試みた。図3Aにその学習過程を示す。初期状態では、重力により身体は崩れ落ちるが、筋をランダムに活動させ、ある状態における行動の価値をサンプリングすることで価値が最大となる方策を学習し、最終的には安定な静止立位を実現することが可能となった。

これを基礎として二足歩行の生成を試みた。初期状態では、重力により身体は崩れ落ちるが、徐々に歩幅は小さいが二足歩行を生成することが可能となり、さらにその後体幹角度や下肢関節角度および歩幅の実歩行との一致度を評価することで、二足歩行の生成を実現することが可能となった(図3B)。深層ニューラルネットワークと深層強化学習を活用することで、解剖学的に精密な神経筋骨格モデルを用いた二足歩行生成を実現した。ただし、実歩行データと必ずしも一致しないなど問題が残されており、今後さらに報酬を見直すなどして、学習を継続させる必要がある。

本研究により、妥当性の高い実用的な歩行シミュレーションモデルの構築が可能となれば、歩行生成メカニズムに関わる様々な仮説を検証するプラットフォームとなる。例えば、本枠組みを用いて、股関節可動域を改変する、など筋骨格形態を仮想改変したときに、歩行機能がどのように変化するかを予測することを通して、二足歩行の進化の道筋に構成論的に迫るための、いわば「仮想進化シミュレーション」とでも呼ぶべきプラットフォームを構築できる。また、例えば前脛骨筋の活動を低下させる、などの加齢による運動機能の低下をモデルに再現して歩行をシミュレートし、転倒予防のための具体案を提案する「仮想歩行障害シミュレーション」の構築も可能となる。本研究の試みが、将来的には外科的手術の効果予測や歩行疾患メカニズムの解明など、医療分野における実用化へ向けた大きな一歩となると考えられる。

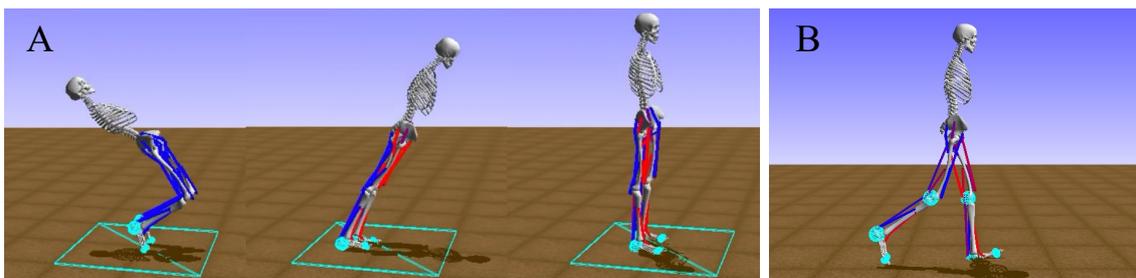


図3 深層強化学習に基づく静止立位(A)と二足歩行運動(B)の生成

#### 参考文献

- [1] Song S, Kidziński Ł, Peng XB, Ong C, Hicks J, Levine S, Atkeson CG, Delp SL. Deep reinforcement learning for modeling human locomotion control in neuromechanical simulation. *J Neuroeng Rehabil.* 18(1):126, 2021.
- [2] Lillicrap, T., Hunt, J., Pritzel, A., Heess, N., Erez, T., Tassa, Y., Silver, D., and Wierstra, D. Continuous control with deep reinforcement learning. *arXiv:1509.02971*, 2015.
- [3] Fujimoto, S, van Hoof, H, and Meger, D. Addressing Function Approximation Error in Actor-Critic Methods. *Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning, PMLR 80:1587-1596*, 2018.
- [4] Ito K, Nakamura T, Suzuki R, Negishi T, Oishi M, Nagura T, Jinzaki M, Ogihara N. Comparative Functional Morphology of Human and Chimpanzee Feet Based on Three-Dimensional Finite Element Analysis. *Front Bioeng Biotechnol.* 9:760486, 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 9件）

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>Negishi Takuo, Ito Kohta, Hosoda Koh, Nagura Takeo, Ota Tomohiko, Imanishi Nobuaki, Jinzaki Masahiro, Oishi Motoharu, Ogihara Naomichi           | 4. 巻<br>8            |
| 2. 論文標題<br>Comparative radiographic analysis of three-dimensional innate mobility of the foot bones under axial loading of humans and African great apes   | 5. 発行年<br>2021年      |
| 3. 雑誌名<br>Royal Society Open Science   | 6. 最初と最後の頁<br>211344 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1098/rsos.211344   | 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>Negishi Takuo, Nozaki Shuhei, Ito Kohta, Seki Hiroyuki, Hosoda Koh, Nagura Takeo, Imanishi Nobuaki, Jinzaki Masahiro, Ogihara Naomichi           | 4. 巻<br>10           |
| 2. 論文標題<br>Three-Dimensional Innate Mobility of the Human Foot on Coronally-Wedged Surfaces Using a Biplane X-Ray Fluoroscopy                              | 5. 発行年<br>2022年      |
| 3. 雑誌名<br>Frontiers in Bioengineering and Biotechnology  | 6. 最初と最後の頁<br>800572 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.3389/fbioe.2022.800572   | 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>Ito Kohta, Nakamura Tomoya, Suzuki Ryo, Negishi Takuo, Oishi Motoharu, Nagura Takeo, Jinzaki Masahiro, Ogihara Naomichi                          | 4. 巻<br>9            |
| 2. 論文標題<br>Comparative Functional Morphology of Human and Chimpanzee Feet Based on Three-Dimensional Finite Element Analysis                               | 5. 発行年<br>2022年      |
| 3. 雑誌名<br>Frontiers in Bioengineering and Biotechnology  | 6. 最初と最後の頁<br>760486 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.3389/fbioe.2021.760486   | 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>Nozaki Shuhei, Kinugasa Ryuta, Yaeshima Katsutoshi, Hashimoto Takeshi, Jinzaki Masahiro, Ogihara Naomichi  | 4. 巻<br>12           |
| 2. 論文標題<br>Quantification of the in vivo stiffness and natural length of the human plantar aponeurosis during quiet standing using ultrasound elastography | 5. 発行年<br>2022年      |
| 3. 雑誌名<br>Scientific Reports   | 6. 最初と最後の頁<br>15707  |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1038/s41598-022-20211-w  | 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>Negishi Takuo, Ogihara Naomichi  | 4. 巻<br>13         |
| 2. 論文標題<br>Functional significance of vertical free moment for generation of human bipedal walking | 5. 発行年<br>2023年    |
| 3. 雑誌名<br>Scientific Reports   | 6. 最初と最後の頁<br>6894 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41598-023-34153-4   | 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>Negishi Takuo, Ogihara Naomichi                                 | 4. 巻<br>13         |
| 2. 論文標題<br>Regulation of whole-body angular momentum during human walking | 5. 発行年<br>2023年    |
| 3. 雑誌名<br>Scientific Reports  | 6. 最初と最後の頁<br>8000 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41598-023-34910-5                    | 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>Matsumoto Yuka, Ogihara Naomichi  | 4. 巻<br>in press       |
| 2. 論文標題<br>Direct visualization and measurement of the plantar aponeurosis behavior in foot arch deformation via the windlass mechanism | 5. 発行年<br>2024年        |
| 3. 雑誌名<br>Clinical Anatomy  | 6. 最初と最後の頁<br>in press |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1002/ca.24171  | 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>Matsumoto Yuka, Ogihara Naomichi, Hanawa Hiroki, Kokubun Takanori, Kanemura Naohiko  | 4. 巻<br>10           |
| 2. 論文標題<br>Novel Multi-Segment Foot Model Incorporating Plantar Aponeurosis for Detailed Kinematic and Kinetic Analyses of the Foot With Application to Gait Studies | 5. 発行年<br>2022年      |
| 3. 雑誌名<br>Frontiers in Bioengineering and Biotechnology  | 6. 最初と最後の頁<br>894731 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3389/fbioe.2022.894731  | 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>荻原 直道   | 4. 巻<br>57                |
| 2. 論文標題<br>Close-up 重力を意識する-人体機能・構造への影響 ヒトの身体構造と直立二足歩行の重力適応 | 5. 発行年<br>2023年           |
| 3. 雑誌名<br>理学療法ジャーナル   | 6. 最初と最後の頁<br>1088 ~ 1095 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.11477/mf.1551203186          | 査読の有無<br>無                |
| 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>-                 |

[学会発表] 計16件(うち招待講演 5件/うち国際学会 5件)

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>根岸拓生、野崎修平、伊藤幸太、関広幸、細田耕、名倉武雄、今西宣晶、陣崎雅弘、荻原直道 |
| 2. 発表標題<br>内外側傾斜面がヒト足部の3次元骨格挙動に与える影響                  |
| 3. 学会等名<br>第75回日本人類学会大会                               |
| 4. 発表年<br>2021年                                       |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>野崎修平、天野英輝、大石元治、荻原直道              |
| 2. 発表標題<br>幾何学的形態測定学を用いた大型類人猿における踵骨の3次元形態解析 |
| 3. 学会等名<br>第75回日本人類学会大会                     |
| 4. 発表年<br>2021年                             |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>土居明莉、山崎皓之、叶賀卓、村井昭彦、荻原直道     |
| 2. 発表標題<br>深層強化学習によるヒト3次元筋骨格モデルの静止立位制御 |
| 3. 学会等名<br>第75回日本人類学会大会                |
| 4. 発表年<br>2021年                        |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>伊藤幸太、中村友哉、鈴木諒、根岸拓生、名倉武雄、陣崎雅弘、荻原直道 |
| 2. 発表標題<br>3次元有限要素モデルを用いた二足歩行中のヒト足部の生体力学的解析  |
| 3. 学会等名<br>第75回日本人類学会大会                      |
| 4. 発表年<br>2021年                              |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Ogihara, N.  |
| 2. 発表標題<br>Experimental and computational studies of bipedal locomotion in the Japanese macaque towards understanding the evolution of human bipedal locomotion |
| 3. 学会等名<br>33rd International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (招待講演) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Ogihara, N.  |
| 2. 発表標題<br>Biomechanics, Motor Control, and Evolution of Human Bipedal Locomotion   |
| 3. 学会等名<br>Commemorative Symposium for the 37th International Prize for Biology "Human Origins and the Future of the Earth" (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Matsumoto, Y., Kanemura, N., Ogihara, N.  |
| 2. 発表標題<br>Differences in the kinematics and kinetics of the plantar aponeurosis between walking and running |
| 3. 学会等名<br>8th Congress of International Foot and Ankle Biomechanics Society (i-FAB) (国際学会)                  |
| 4. 発表年<br>2023年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Matsumoto, Y., Kanemura, N., Ogihara, N.   |
| 2. 発表標題<br>Evaluation of the estimated length of the plantar aponeurosis using a multi-segment foot model |
| 3. 学会等名<br>29th Congress of International Society of Biomechanics (国際学会)                                  |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Ito, K., Nagura, Y., Jinzaki, M., Ogihara, N.                                     |
| 2. 発表標題<br>Dynamic finite element simulation of 3D foot during stance phase of human walking |
| 3. 学会等名<br>12th Asian-Pacific Conference on Biomechanics (国際学会)                              |
| 4. 発表年<br>2023年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>荻原直道                        |
| 2. 発表標題<br>デジタル人類学が解き明かすヒトの進化          |
| 3. 学会等名<br>日本モンキーセンター・モンキーキャンパス (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2022年                        |

|                                |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名<br>荻原直道                |
| 2. 発表標題<br>ヒトの直立二足歩行の力学・制御・進化  |
| 3. 学会等名<br>第19回姿勢と歩行研究会 (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2023年                |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>荻原直道   |
| 2. 発表標題<br>ヒト足部筋骨格構造の機械工学と整形外科                            |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会年次大会 公開ワークショップ「整形外科と機械工学の連携推進にむけて」(招待講演) |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>松本 優佳、金村尚彦、荻原直道                       |
| 2. 発表標題<br>マルチセグメントフットモデルに基づく運動中の足底腱膜伸縮量の推定とその評価 |
| 3. 学会等名<br>第77回日本人類学会大会                          |
| 4. 発表年<br>2023年                                  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>荻原直道、根岸拓生                                      |
| 2. 発表標題<br>二足歩行中に作用するVertical Free Momentが下肢関節の回旋運動に与える影響 |
| 3. 学会等名<br>第49回日本臨床バイオメカニクス学会                             |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>根岸拓生、荻原直道                                    |
| 2. 発表標題<br>二足歩行中の足裏に床面から作用するvertical free moment の機能的意義 |
| 3. 学会等名<br>第76回日本人類学会大会・第38回日本霊長類学会大会連合大会               |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>根岸拓生、荻原直道                                |
| 2. 発表標題<br>足裏に作用するvertical free momentがヒト二足歩行に与える影響 |
| 3. 学会等名<br>第40回日本ロボット学会学術講演会                        |
| 4. 発表年<br>2022年                                     |

〔図書〕 計2件

|   |                 |
|---|-----------------|
| 1. 著者名<br>荻原直道                                | 4. 発行年<br>2021年 |
| 2. 出版社<br>朝倉書店                                | 5. 総ページ数<br>320 |
| 3. 書名<br>歩く：進化でわかる人間行動の事典（小田亮、橋彌和秀、大坪庸介、平石界編） |                 |

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>荻原直道   | 4. 発行年<br>2021年 |
| 2. 出版社<br>東京大学出版会  | 5. 総ページ数<br>296 |
| 3. 書名<br>ヒトはなぜ直立二足歩行を獲得したのか 身体構造と運動機能の進化：人間の本質にせまる科学（井原泰雄、梅崎昌裕、米田穰編） |                 |

〔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 |
|-------|---|--|----|
| 研究分担者 | 伊藤 幸太<br><br>(Ito Kota)<br><br>(20816540) | 大阪大学・人間科学研究科・助教<br><br><br><br>(14401) |    |

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 | 叶賀 卓<br><br>(Kanoga Suguru)<br><br>(40803903)  | 国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員<br><br><br><br>(82626)   |    |
| 研究分担者 | 村井 昭彦<br><br>(Murai Akihiko)<br><br>(90637274) | 国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員<br><br><br><br>(82626) |    |

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 |
|---------|---------|
|         |         |