

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 15 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23247041

研究課題名(和文) ヒト足部筋骨格形態に内在する歩行安定化機構と直立二足歩行の進化

研究課題名(英文) Stabilization mechanism embedded in the foot musculoskeletal structure and the evolution of human bipedalism

研究代表者

荻原 直道(Ogihara, Naomichi)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：70324605

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,800,000円、(間接経費) 10,140,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ヒト足部がどのように床面と幾何学的・生体力学的に相互作用し、安定な二足歩行を持続する上で好ましい身体への力作用を作り出しているのかを詳細に明らかにすることを通して、ヒトの直立二足歩行の起源と進化に迫ることを目的とした。具体的には、二足歩行中に足裏に作用するせん断力分布を計測するシステムを構築しその詳細を明らかにした。また、解剖学的に精密な足部筋骨格モデルを開発し、足部構造の変形特性と足裏反力分布の関係を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, we try to clarify how the human foot mechanically interacts with the ground in a favorable manner to realize stable bipedal walking, and how the inherent structure of the foot musculoskeletal system possibly facilitates such mechanical interaction with the ground, for gaining some insights towards understanding the origin and evolution of human bipedal walking. Specifically, we have constructed a system to measure plantar shear force distribution during human walking and revealed details of shear force distribution in human walking. We also developed an anatomically-based foot musculoskeletal model to analyze how morphological characteristics of human foot affect the mechanical interaction between the foot and ground.

研究分野：生物学

科研費の分科・細目：人類学・自然人類学

キーワード：足圧分布 足部動態 二足歩行 進化 足部モデル 歩行分析

## 1. 研究開始当初の背景

常習的直立二足歩行の獲得は、ヒトと他の類人猿を分ける最も基本的な特徴であり、人類進化における最も重要なメルクマールの一つである。したがって直立二足歩行の起源と進化過程を明らかにすることは、自然人類学における最も根源的な命題であり、今日まで多くの比較解剖学・機能形態学的研究が行われてきた。しかし、身体筋骨格系の膨大な自由度を協調的に制御し、本来不安定な直立二足歩行を獲得することは、生体力学および運動制御の観点からは非常に困難なことであると考えられる。なぜヒトは、未知の路面状況に瞬時に適応し、転倒することなく安定した二足歩行を継続することができるのであろうか。

歩行運動は、脚が地面から受ける反力を適切に作用させることによって、身体重心を転ばないように前へ移動させる力学現象である。したがって、地面と直接的に接触し、環境と力のやり取りを行う足部形態・構造に内在する機能が、二足歩行の強靱性を高める上で大きく寄与していると予想される。実際にヒトの足部は、生物学的に最も近縁なチンパンジーのそれと比較すると、足母指が他の四指と対向せず平行に並んでおり、また足を構成する骨がアーチ状に組み合わさっているなど、二足歩行に適応的と考えられる解剖学的特徴を数多く有していることが知られている。しかし、多数の骨・靭帯・筋から複雑に構成されるヒトの足部が、床面と具体的にどのように幾何学的に、また生体力学的に相互作用し、二足歩行を持続する上で好ましい足部の機能的変形と力作用を作り出すのかは、実際のところ全く明らかになっていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、ヒトの二足歩行時の足部筋骨格系の床面との力学的相互作用を、生体・屍体を用いて生体力学的に計測・解析することを通して、足部形態に内在すると予想される直立二足歩行機能の形態的基盤を実証的に明らかにすることを目的とする。具体的には、未だほとんど明らかになっていないヒトの二足歩行中の足部の3次元動態を、生体計測と屍体実験の両アプローチを駆使して明らかにし、ヒトの歩行の強靱性の源泉を足部の形態に内在する機能的変形機構に着目して抽出することを試みる。そしてその結果に基づいて足部機能形態を再検証し、直立二足歩行の進化メカニズムに迫ることを目指す。

本研究により得られる知見は、ヒトの直立二足歩行の進化メカニズムの理解に貢献するばかりでなく、足部の傷害発生メカニズムの解明とその治療を目的とする整形外科学、足部への衝撃を緩和するシューズの開発といったスポーツ科学、さらには環境との適切な力学的相互作用を機構的に実現する頑強な歩行機械の開発といったロボット工学分野などへの応用が期待できる。また、本研究

によって足部機構のモデル化が実現されれば、歩行シミュレーションの妥当性が大きく向上し、進化シミュレーションや外科的手術の効果予測などへの応用も期待できる。

## 3. 研究の方法

(1) 二足歩行中に足裏に作用する剪断力分布  
ヒトの二足歩行中に足裏に作用する3方向の分布荷重と、足部の機能的変形のメカニズムを実験的に明らかにするために、足裏分布剪断力測定センサシステムを製作した。これは、ひずみゲージ式の3軸ロードセル(3 cm×3 cm)を格子状に22個並べたものである。製作したロードセルの定格は、鉛直方向に200 N、水平方向に50 Nである。これにより二足歩行時に足裏に作用する鉛直・剪断方向の床反力の分布を計測することを可能とした。ただし、ロードセル22個では足裏全体をカバーすることができない。そこで本研究では、ロードセルシステムの上に440 mm×480 mmのフィルム式圧力分布測定システム(タクタイルセンサー)(Big-Mat, Tekscan, USA)を、ゴムシートを挟んで設置し、被験者に歩行運動を行わせた。タクタイルセンサーは足裏全体をカバーすることができるため、歩行運動を多試行行わせれば、タクタイルセンサーの情報に基づいてロードセルの計測データを時空間的に合成(位置合わせ)し、足裏全体に作用するせん断力分布を再構成することができる。

図1に示すように木製歩行路の間にロードセルシステムとタクタイルセンサーを設置し、成人男性5名に自然な歩行速度でその上を歩いてもらった。各被験者について約20試行の歩行データを取得し、それを各被験者について時空間的に位置合わせをし、足裏に作用するせん断力分布を求めた。

## (2) 二足歩行中の足部変形の3次元計測

二足歩行中の足部の機能的変形を非侵襲的に詳細に計測し、不整地歩行時の3次元足部動態を分析した。具体的には、ヒトの足部は距骨踵骨部、中足骨部、指部の3節の剛体に近似できると仮定し、計13点の特徴点座標を用いて各節の座標を定義することで歩行中の足部動態を記述することにした。本研究では2名の成人男性の歩行運動を、リアルタイム光学式モーションキャプチャシステムMAC3D System (Motion Analysis, USA)を用いて計測した。上述の片側13点のマーカーを用いて3節座標系の相対運動を記述し、オイラー角を用いて脛骨に対する距骨踵骨部、距骨踵骨部に対する中足骨部の相対角度を求めた。本研究では、まず平地歩行を被験者に行わせた。歩行速度は、各被験者が快適と感じる速度とした。その後、不整地歩行を行わせた。具体的には、厚さ15mmの木片を組み合わせて、図2のような段差(および傾斜)を計10パターン製作し、その上を被験者が踏み抜けたときの足部の運動を計測し

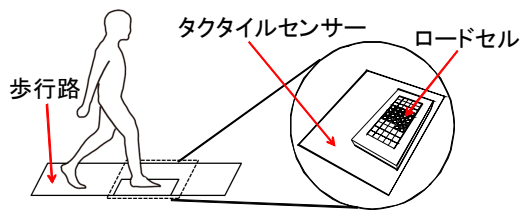


図1 足裏に作用する剪断力分布の計測システム

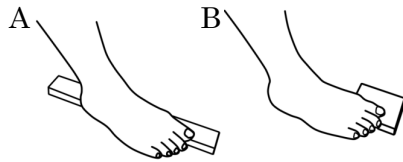


図2 不整地歩行。ここでは10パターンの中の2パターンを表示している。A) 内側全体で段差を踏む(内全凸)、B) 内側前方で段差を踏む(内前凸)。

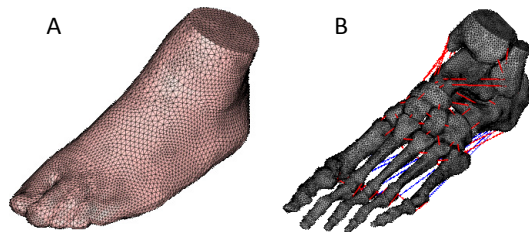


図3 ヒト足部有限要素モデル  
A.軟組織 B.骨、靭帯(赤)、足底腱膜(青)

た。このとき、被験者には段差や傾斜を足のどの部位で踏んでもらうかをあらかじめ指示した。各被験者、各歩行条件について8試行のデータを計測し、足部動態の解析を行った。

### (3) 屍体実験

本研究では、新鮮屍体標本を用いて足部の床面との力学的相互作用を再現し、足の変形と足部に作用する力の関係を求めることを試みた。具体的には、ヒト足部に圧縮荷重を作用させ、そのときの荷重-変位曲線と足部の運動を計測した。下腿中央で切断したヒト足部新鮮冷凍屍体の、アキレス腱や前脛骨筋、後脛骨筋、長腓骨筋を剖出し、近位端の軟組織を取り除いた。これを圧縮試験機 Autograph IG-IS(島津製作所)に固定具を介して取り付け、足部に対して鉛直方向に変位を与え、荷重を付加した。試験機には6軸荷重計が取り付けられており、これにより足部の運動とそのときに作用する荷重の関係を求めることが可能となる。距骨・踵骨・舟状骨など足部を構成する主要な骨にはピンを挿入し、そのピンの位置を、3次元座標計測器を用いて3次元計測した。

### (4) 足部有限要素シミュレーション

ヒトとチンパンジー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の変形に与える影響を解析することを試みた(図3)。まず、解剖学的に精密なヒト足部モデルを構築するため、健康な成人男性の足部 CT 断層画像(0.316×0.316×0.25[mm])を入手した。この画像を閾値処理することで足部皮膚表面と骨を抽出した。それぞれ3次元レンダリングを行った上で、骨部については脛骨、腓骨、及び種子骨を含む23の骨を個々に分離した。その後、メッシュ形状を修正した上で、HyperMesh(Altair Engineering, USA)を用いて四面体要素による3次元有限要素メッシングを行った。骨と骨とをつなぐ靭帯は、解剖学的配置に基づいて計92本の1次元バネ要素としてモデル化した。靭帯は伸張されたときに受動的張力を生成するが、短縮したときには力を生成しない。この特性をバネ要素で表現した。また、踵骨の下面から5指の基節骨底まで扇状に広がる足底腱膜も10本の1次元バネ要素として同様にモデル化した。骨の材料特性は等方性線形弾性材料として、軟組織については超弾性体材料としてモデル化した。足部下方には床面を想定した剛壁をモデル化した。足底表面と剛壁の摩擦係数は0.6とした。脛骨及び腓骨は水平方向の運動を拘束し、鉛直方向にのみ運動を可能とした。一方、チンパンジーについても成体メスの足部断層画像を入手し、同様の手法でモデルを作成した。

構築した足部モデルを用いて、静止立位時の接地状態を再現した。ヒトとチンパンジーの足部構造の違いが、地面との力学的相互作用や足部の変形に与える影響を比較することで、その構造が持つ機能的意味を考察した。ソルバには RADIOSS(Altair Engineering, USA)を用い、陽解法有限要素法による解析を行った。

### (5) 節間協調の平面則

ヒトの二足歩行中の大腿・下腿・足部節の仰角、すなわち各節の鉛直軸に対してなす角の時間変化を3次元空間にプロットすると、1つの平面上に軌道が乗り、特にヒトの二足歩行では3仰角の全変動の99%以上がその平面により説明できることが知られている。このことはヒトの二足歩行において下肢の3節は互いに独立に運動しているわけではなく、互いに協調的に運動していることを示している。こうしたヒト二足歩行における節間協調運動の平面則は、制御を必要とする下肢3節の運動自由度を3から2へ減少させることから、歩行運動の制御を単純化している結果であると考えられている。

二足歩行の進化にヒトの足部構造が密接に関係しているとする、二足歩行の獲得を促進することに寄与すると考えられる平面則の発現にも、足部構造が密接に関係していると予想される。このためヒトとニホンザルの大腿・下腿・足部節の仰角変化を求め、節

間協調運動の平面則を比較した。

#### 4. 研究成果

(1) 二足歩行中に足裏に作用する剪断力分布  
せん断力分布の計測結果を図4に示す。図中の青点は力の作用位置を示し、そこを基点として伸びる赤い線分が、そこに作用する力ベクトルを示している。なお、この力ベクトルは足が床面に作用させる力の向きを示している。

立脚期10%、つまり踵接地時においては基本的には床面に対して前方に力が作用するが、踵部内側は内側方向に、踵部外側は外側方向に床面に力を作用していることがわかる。立脚期前半(30%)では中足骨の骨頭部から外側方向に床面に力が作用し始め、立脚期中期(50%)ではほぼ足裏全体から外側方向に床面に作用している(すなわち、足に対しては内側に力が作用する)。このとき、中足骨底部に対応する部分から、床面に対して後方に力が作用した。つまり、中足骨底部から推進力が作用し始めることが明らかとなった。しかし中足骨頭部からは、床面に対して前方に力が作用した。これは身体重心が足の真上に来た時に足のアーチ構造が潰れ、中足骨頭部は床面に対して後方に、踵部分は床面に対して前方にせん断力が作用していることを示している。中足骨頭部と足指骨の関節部分は軟組織でできており、この軟組織の柔軟な変形が立脚中期での衝撃吸収と歩行の安定に寄与していることが示唆された。立脚期後期(70、90%)にかけては、中足骨底部から骨頭部に力の作用点が移動しつつ推進力が作用し、足部は離地する。このとき内側縁は外側方向に、外側縁は内側方向に力が作用していることがわかる。これは横方向のアーチ構造が潰れることで、前足部分の中心に向けて力が作用しているためであると考えられる。

#### (2) 二足歩行中の足部変形の3次元計測

被験者1名の平地・不整地歩行時における足関節・中足関節の平均角度変化を示す(図5)。関節角度は静止立位時をゼロとした。平地歩行において、足関節は立脚期に背屈し、蹴り出し時に急激に底屈し、同様の運動が中足関節でも観察された。また足関節は立脚期中期に内転・回外、一方中足関節は外転・回外する傾向があることが示唆された。これは足部アーチ構造の接地に伴う変形に起因すると考えられる。

不整地歩行時の足関節・中足関節の平均角度変化を平地歩行時のそれと比較すると、内側全体で段差を踏む場合は、足関節が立脚期初期において相対的に底屈、中足関節が背屈していることがわかる。これは段差により通常の踵接地が行えておらず、その結果中足部に大きく力が作用しているためと考えられる。また、足関節は段差の影響で相対的に大きく回内した。そのとき足関節は立脚期にお

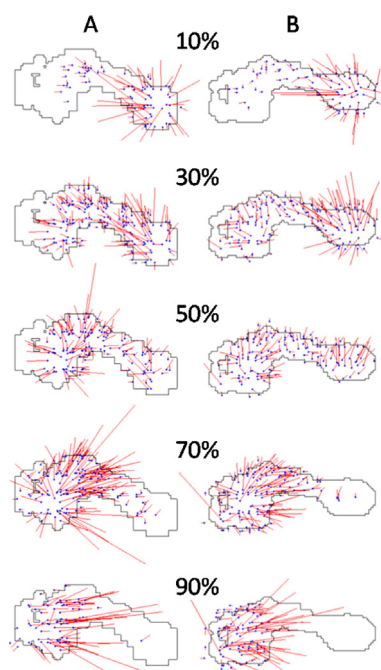


図4 二足歩行中に足裏に作用するせん断力分布

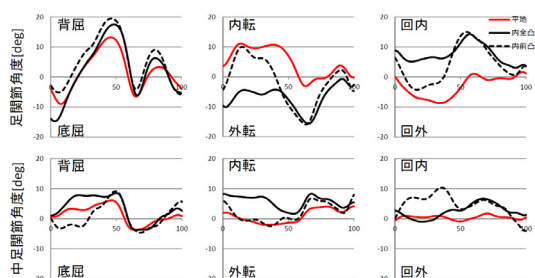


図5 平地・不整地歩行時の足関節・中足関節の平均角度変化の比較。赤線が平地、黒実線が不整地A(内全凸)、黒点線が不整地B(内前凸)の関節角度。

いて外転、中足関節は内転しており、路面に合わせて足部がくの字状に変形する傾向が見られた。

一方、足部内側前方で段差を踏む場合は、立脚期前半においては段差の影響を受けないため、平地歩行の関節角度変化とほぼ一致し、段差の影響を受ける立脚期後半においては、内側全体で段差を踏む場合とほぼ一致した。しかし中足関節が、段差に合わせて相対的に大きく回内している傾向が見られた。このように路面形状に適応して足部構造が機能的に変形することが、安定で持続的な直立二足歩行を生成するのに大きく寄与していると考えられた。

#### (3) 屍体実験

荷重・変位曲線から、足部のスティフネスを算出した結果、下腿が外側傾斜しているときにスティフネスは相対的に減少し、内側傾斜しているときに増大することがわかった。これは踵骨が内側傾斜の際に相対的に内反することで、立方骨との相対運動がロックされ、足部全体が固いテコとして機能することと



関係すると考えられる（チンパンジーでは踵骨の立方骨関節面は単純な凹面になっており、回転運動を許容する）。また、足部を鉛直に床面に押しつけると、足部は基本的には外転しようとするため、床反力は内側に、鉛直軸まわりのモーメントは内転方向に出力されることがわかった。足部は接地時にこのような方向に力、モーメントを生成する機能を内在しており、二足歩行の生成に寄与していることが示唆された。

#### (4) 足部有限要素シミュレーション

構築した足部モデルの力学的挙動の妥当性を評価するために、ヒト静止立位時の足底圧分布の計測結果との比較を行った。足底圧分布は、計測結果とほぼ一致した。よって、構築したモデルは静止立位状態を再現していると考えられる。

足部構造の一部を仮想的に改変したモデルを構築し、改変した構造が地面との力学的相互作用や足部の変形に与える影響を比較することで、その構造が持つ機能的意味を探ることができる。本研究では後足部を内反・外反させる距骨下関節を固定、つまり距骨と踵骨の相対運動を拘束したモデルを構築し、この関節の相対運動が足部挙動に与える影響を評価した。その結果、距骨下関節を有していると、相対的に踵部の足圧・応力が相対的に小さくなり、中足骨頭部で大きくなることが明らかとなった。すなわち距骨下関節は、立位時の圧力中心を相対的に前方に移動させる機能を有していることが明らかとなり、立位姿勢の維持に寄与している可能性が示唆された。

また、ヒトとチンパンジーの足部モデルの静止立位時の力学的挙動を解析した（図6）。その結果、おなじ静止立位の荷重条件では、チンパンジーの足部の方がより扁平になり、また踵骨底面に応力が集中し、ヒトのように前足部に荷重が分散されないことが明らかとなった。ヒトの足部が持つ縦アーチなどの構造的特徴が、足部の変形特性、ひいては荷重伝達特性に大きな影響を与えていることがシミュレーションより示唆された。

#### (5) 節間協調の平面則

ヒトの二足歩行では3仰角の全変動の99%が平面により説明できているが、ニホンザルの二足歩行の場合、その割合が97-98%と有意に小さくなり、ニホンザルにおける歩行の平面則は相対的に弱いものとなっていることが明らかとなった（図7）。ヒトの二足歩行では、踵から接地し、その後足裏全体が接地する。そしてその足底接地の状態が立脚期後期にかけて続く。一方蹴り出しの際には、足部が硬いテコとして作用するため、踵と中足部と一緒に地面から上昇する。それに対してニホンザルでは、踵接地は構造的にできないため足裏足根部で接地するが、その足部はアーチ構造のない柔軟な足部であり、接地直後

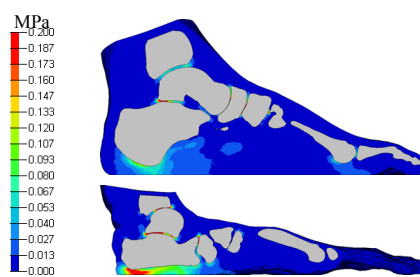


図6 ヒトとチンパンジーのミーゼス応力分布

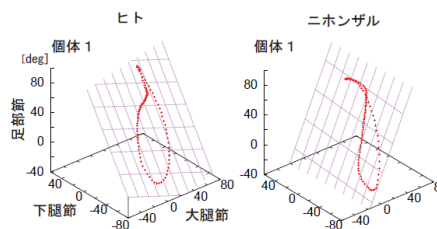


図7 ニホンザルとヒトの節間協調の平面則

から midtarsal break により中足部が中折れする。そのため足部節の仰角は接地と共に減少を開始する。すなわち、足部動態の違いによりニホンザルでは平面則が相対的に弱くことが明らかとなった。二足歩行運動に適応的に形づくられてきたヒトの足部構造が、強い平面拘束を作り出していることが示唆された。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 4 件）

1. 荻原直道：ニホンザルの二足歩行分析とシミュレーションから探る直立二足歩行の起源と進化、バイオメカニズム学会誌、Vol.38, (2014, in press) 査読有
2. Ogihara, N., Kikuchi, T., Ishiguro, Y., Makishima, H., Nakatsukasa, M.: Planar covariation of limb elevation angles during bipedal walking in the Japanese macaque, Journal of the Royal Society Interface, Vol. 9, pp. 2181-2190, (2012)査読有
3. Oishi, M., Ogihara, N., Endo, H., Une, Y., Ichihara, N., Asari, M., Amasaki, H.: Muscle dimensions of the foot in the orangutan and the chimpanzee, Journal of Anatomy, Vol. 221, pp. 311-317, (2012)査読有
4. 荻原直道：機械工学から直立二足歩行の起源と進化を探る、日本機械学会誌、Vol.115, No.1126, pp.659-663, (2012) 査読無

〔学会発表〕（計 18 件）

1. 荻原直道：ニホンザル筋骨格構造のモデル化と二足歩行シミュレーション、神奈川大学人文学会・第4回生体機能セミナー、横浜市神奈川区、(Mar 18, 2014)
2. 荻原直道：環境との力学的相互作用をつ

- かさどる足部筋骨格構造の機能解析、慶應義塾大学先端研究センター医工薬コモンズ・第4回インキュベーションラウンジ、横浜市港北区、(Dec 11, 2013)
3. Nakamura, T., Ogihara, N., Nagura, T., Nakamura, T., Jinzaki, M.: Finite element analysis of the mechanical interactions between the human foot and the ground. The 15th International Conference on Biomedical Engineering (ICBME 2013), Singapore (Dec. 4, 2013)
  4. 荻原直道: ニホンザルの二足歩行から探るヒトの二足歩行の力学と進化、計測自動制御学会 中部支部 第4回制御理論ワーキングセミナー、名古屋市千種区、(Nov 21, 2013)
  5. 荻原直道: ニホンザルから探るヒトの二足歩行の力学と進化、東京大学大学院情報理工学系研究科「先端知能機械情報学セミナー」、東京都文京区、(Nov 7, 2013)
  6. 荻原直道、板垣まみ、斎藤剛: ヒトの二足歩行中に足裏に作用するせん断力分布の計測、第67回日本人類学会、茨城県つくば市、(Nov 3, 2013)
  7. 荻原直道、濱野理貴: ニホンザル二足歩行中の関節モーメント、第67回日本人類学会、茨城県つくば市、(Nov 3, 2013)
  8. 大石元治、荻原直道、清水大輔、菊池泰弘、尼崎肇: 大型類人猿における下腿部と足部の筋について、第67回日本人類学会、茨城県つくば市、(Nov 3, 2013)
  9. 荻原直道、井出直彦、濱野理貴: 筋骨格シミュレーションに基づくニホンザル二足歩行の生体力学的解析、計測自動制御学会ライフエンジニアリング部門シンポジウム、横浜市港北区、(Sep 12, 2013)
  10. 荻原直道: ニホンザルの筋骨格シミュレーションからヒトの進化を探る、Beyond Robotics、東京都文京区、(Sep 3, 2013)
  11. 荻原直道: 神経筋骨格モデルに基づくニホンザル二足歩行運動の生体力学的解析、防衛医科大学校・第186回バイオを論じる会、所沢市、(Feb 28, 2013)
  12. 荻原直道: ニホンザル二足歩行運動の順・逆動力学シミュレーション、RSJ・ヒューマンセントリックロボティクス研究専門委員会第6回研究会、福岡市、(Feb 12, 2013)
  13. 荻原直道: サルの歩行から探るヒトの二足歩行の力学と制御、日本ロボット学会第75回ロボット工学セミナー「歩行の生理学/力学/制御理論と歩行支援ロボティクス」、東京都文京区、(Dec 7, 2012)
  14. 大石元治、荻原直道、遠藤秀紀、宇根有美、市原伸恒、浅利昌男、尼崎肇: オランウータンとチンパンジーの足部における筋形態について、第28回日本霊長類学会大会、日進市、(July 7, 2012)
  15. 荻原直道: ニホンザル二足歩行運動の順動力学・逆動力学シミュレーション、京都大学霊長類研究所共同利用研究会・日本人類学会キネシオロジー分科会シンポジウム「サルが二足で歩くととき」、大山市、(Mar 18, 2012)
  16. Ogihara, N.: Computer modeling, analysis, and simulation of bipedal walking in the Japanese macaque, The 4th Global COE International Symposium on Physiome and Systems Biology for Integrated Life Sciences and Predictive Medicine, Osaka, Japan, (Nov. 23, 2011)
  17. Ogihara, N., Kikuchi, T., Ishiguro, Y., Makishima, H., Nakatsukasa, M.: Planar law of intersegmental coordination during bipedal walking in Japanese macaques and humans, 5th International Symposium on Adaptive Motion in Animals and Machines, Awaji, Japan, (12 Oct, 2011)
  18. Kikuchi, T., Ishiguro, Y., Ogihara, N.: Inter-segmental coordination of limb segments during bipedal walking in the bipedally-trained Japanese macaque, 23rd Congress of International Society of Biomechanics, Brussels, Belgium, (5 July, 2011)
- [図書] (計 1 件)
1. 荻原直道: ヒトの足部筋骨格構造の進化と直立二足歩行の制御、大築立志、鈴木三央、柳原 大 (編): 歩行と走行の脳・神経科学—その基礎から臨床まで—、市村出版、東京、pp.15-29, (2013)
6. 研究組織
- (1)研究代表者
    - 荻原 直道 (OGIHARA, Naomichi)
    - 慶應義塾大学・理工学部・准教授
    - 研究者番号: 70324605
  - (2)研究分担者
    - 中村 俊康 (NAKAMURA, Toshiyasu)
    - 慶應義塾大学・医学部・講師
    - 研究者番号: 70265859
    - 名倉 武雄 (NAGURA, Takeo)
    - 慶應義塾大学・医学部・准教授
    - 研究者番号: 90306746
    - 細田 耕 (HOSODA, Koh)
    - 大阪大学・大学院情報科学研究科・教授
    - 研究者番号: 10252610