

かいちだ しょうこ

氏名	垣内田 翔子
授与学位	博士 (理学)
学位記番号	理工博甲671号
学位授与年月日	平成27年5月29日
学位授与の要件	学位規則第4条1項
研究科, 専攻の名称	理工学研究科(博士後期課程) 自然科学基盤系専攻
学位論文題目	脚関節間シナジの視点で探るヒトとニホンザルの二足歩行制御戦略 (Basic strategy of bipedal walking of human and Japanese macaques from the view point of joint synergy)
論文審査委員	主査 山口大学 教授 西井 淳 山口大学 教授 山本 隆 山口大学 教授 坂井 伸之 山口大学 教授 末竹 規哲 山口大学 准教授 川村 正樹

【学位論文内容の要旨】

生理学者 Bernstein (1967) は、熟練した鍛冶屋は鋸を振り下ろす毎回の腕の関節軌道にはばらつきが存在するにも関わらず、狙った場所を正確に鋸で打つことを発見した。このことは、目標の位置を打つというタスクを実現させるために複数の関節を連携させていることを示すものである。つまり、タスク達成に重要なポイントには腕の関節は鋸の位置のばらつきを抑える関節間の連携（シナジー）が存在することを意味する。歩行中の脚関節軌道においても一歩ごとにある程度ばらつきが観察される。このばらつきより関節間の連携機序（関節間シナジー）を解析することで、ヒトが歩行を実現するために獲得してきた歩行制御のコツが何かを探れる可能性がある。また、自然人類学の分野では、ヒトが進化の過程で得た歩行制御戦略に関する手がかりを探るために、ヒトとニホンザルの二足歩行を比較する研究がなされてきた。しかし、その多くは関節軌道や床反力パターンの比較にとどまっている。そこで本研究では、猿回しの訓練を受けた長時間二足歩行を続けることができるニホンザル（芸ざる）とヒトの歩行中の関節間シナジーに着目することで両者の歩行戦略を探り、またその結果を比較することでヒトが進化の過程で獲得した二足歩行の制御戦略を探ることを目的とした。

本研究では、ヒト(男女6名)、ニホンザル(雄2体)がトレッドミル上で歩く様子を高速度カメラで撮影し、股・膝・踝関節軌道を取得した。関節間シナジーの解析には Scholz と Schöner が提案した UnControlled Manifold (UCM) 解析を用いた。UCM とは冗長な変数(関節角度等)がタスク達成という拘束下でつくる多様体を指す。股関節に対して足先がある特定の位置になるような関節間の組み合わせを UCM とした場合、例えば一歩毎の接地の瞬間における各関節角度がその UCM 上に分布していれば、接地の瞬間には足先の一歩毎の足先位置のばらつきを抑える関節間シナジーがあるといえる。本研究では、各被験者について取得した20から25歩の関節軌道を歩行周期で正規化し、歩行中の各瞬間における股関節に対する足先の(a)水平位置、(b)鉛直位置(高さ)、及び足先速度の(c)水平成分、及び(d)鉛直成分を調整する関節間シナジーを調べた。

その結果、ヒトとニホンザルの歩行においては以下のような共通点や相違点が示された。第一に、ヒトとニホンザルに共通して、片足支持期後半に股関節の高さを調整する関節間シナジーが働いていた。このことは、側の接地に備えて骨盤の高さが調整されていることを示唆する。第二に、遊脚期中期の足先を振り下ろす時期において、足先の高さを調整する関節間シナジーがヒト、ニホンザル共に働いていた。しかし、関節間シナジーが強く働くタイミングは両者で異なった。ヒトは足先を前に振り出した後、足部を引き戻しながらの接地を行う。この振り抜きの際に一度足先と床が最も近づく瞬間(Minimum Toe Clearance, MTC)が存在している。ヒトはこのMTCのタイミングに合わせて関節間シナジーが強く働いていた。一方ニホンザルでは、ヒトのようなMTCは存在しておらず、単調に足先を振り出して接地を行う。ニホンザルの場合、関節間シナジーが強く働くのは足部の振り下ろしの中でも足先位置がまだ高い位置であった。すなわち、MTCの瞬間に足先の高さを調整する関節間シナジーを強く働かせることは、ヒトが進化の過程で獲得した二足歩行のための制御戦略と考えられる。第三に、遊脚終期において、ヒトは足先を一度前方に振り上げた後、引き戻しながら接地を行なっている。また、接地に向けてヒトは足先の速度を調整する関節間シナジーが

働いていた。接地前の引き戻しは歩行の安定化に寄与することが報告されており、また接地時の足先の速度制御についても歩行の安定化に有効であることが Wisse ら(2006)によって報告されている。一方、ニホンザルは接地前にヒトのような足先の引き戻しは行わず、足先位置を関節間シナジーによって調整しながら接地していた。このことは、ヒトとニホンザルでは歩行安定化のための接地戦略が異なることを示唆する。第四に、期両脚支持期に働く関節間シナジーがヒトではニホンザルに比べて特に強く働いていた。後期両脚支持期は、接地によって受ける衝撃に抗して転倒を避け、歩行の安定性を高めるために体幹位置の調整を行う上で重要な時期である。ニホンザルの股関節は通常ヒトと異なり過伸展することができず、膝関節もヒトのように完全に伸展することはできない。しかし、ニホンザル2体のうち、二足歩行中の可動域が訓練によってより伸展位に広がった個体が、よりヒトに近い関節間シナジーの活用の特徴を示していた。このことから、関節角度の拡張は、関節間シナジーを活用した二足歩行制御を獲得していく上でヒトが進化の過程でとった戦略であると考えられる。

【論文審査結果の要旨】

歩行中の脚関節軌道は一步ごとに若干異なるが、各関節軌道のバラツキは必ずしも互いに無相関ではなく、歩行中の特定の瞬間には足先や腰の位置のバラツキを抑えるように関節間の相補的な調節(関節間シナジー)が働く。本論文では、ヒトとニホンザルの二足歩行において関節間シナジーがどのように働いているかを UCM (Uncontrolled Manifold) 解析によって調べることで、両者の二足歩行における制御戦略の共通点及び相違点を探った結果について報告している。本論文の文章構成は以下の通りになっている。

第一章では、歩行中の一步毎の関節軌道のばらつきの分布形状を解析することにより、歩行中の各瞬間において足先位置等のだのような量のばらつきを抑える関節間シナジーが生じているかを推定できること、その結果により歩行の制御戦略を探れる可能性があることを説明している。また、このような手法で歩行制御戦略の推定を行うことの意義を、関連する先行研究とも対比して説明している。

第二章では、関節間シナジーを定量評価する手法である UCM 解析について説明を行い、運動計測実験によって取得したヒトの歩行運動データに対して UCM 解析を行った結果について以下のように説明している。高齢者において躓きが生じやすいことが先行研究により指摘されている遊脚中期の MTC (Minimum Toe Clearance) の瞬間においては、足先の高さの一步ごとのばらつきを抑える関節間シナジーが強く働く。また、一旦前方に振り出された足部が引き戻されながら接地する着地期において、遊脚では各関節角のばらつきが低く抑えられている一方で、関節間シナジーの働きは弱い。このとき対側の支持脚においては股関節の高さのばらつきを抑える関節間シナジーが働いている。すなわち、この時期では両脚で協調的に接地姿勢の調整を行っている。さらに、体幹位置を調整する上で重要な両脚支持期においては股関節位置のばらつきを抑える関節間シナジーが強く働く。以上の結果は、転倒を防ぐ上で重要な時期において、関節間シナジーが脚姿勢の調節のために活用されていることを示している。

第三章では、後天的な訓練により二足歩行を獲得したニホンザルに注目し、その二足歩行における関節間シナジーを解析した結果について、ヒトの場合と対比して以下のように報告している。

ニホンザルではヒトとは異なり、両脚支持期に体幹位置の調節を行う関節間シナジーは弱い。また、ニホンザルの遊脚期にはヒトのように一旦足部が床に近づく MTC の瞬間や接地直前の足部の引き戻しはなく、足部は単調に地面に近づいていくが、その間、足先の高さのばらつきを抑える関節間シナジーが間欠的に働く。これらの結果は、両脚支持期や接地期においてヒトが採用している制御戦略が、安定な二足歩行実現のために進化の過程で獲得されたものであることを示唆する。また、解析を行ったニホンザルのうち、二足歩行中の股関節可動域がヒトに近い個体が示す関節間シナジーの特徴はややヒトに近いものであったことから、ヒトの進化において股関節可動域の拡張がヒト型の関節間シナジーの獲得に重要であった可能性があることを考察している。

最後に第四章では本論文のまとめを行うとともに、解析手法の妥当性の議論や関節間シナジーの生成機構に関する考察を行っている。

公聴会においては、足先の水平位置と高さにそれぞれ注目してシナジーを解析した理由は何か、歩行運動における関節間シナジーは加齢による変化はあるのか、関節間シナジーを生み出すメカニズムを探る方法はあるか、生物の移動手段として進化したのはなぜタイヤではなく足なのか等の質問があったが、いずれにも適切な回答が発表者からなされた。

本論文は、ヒトの歩行における脚運動制御が、各関節角について目標軌道を定めてそれを実現しようとする伝統的な工学的制御手法とは異なり、多くの関節自由度を連携させることで足先の高さ等の特定の変数を調節するような制御を間欠的に行っていることを示唆する結果を報告する点で新規性に優れたものである。また、比較人類学等の分野におけるニホンザルとヒトの歩行運動に関する先行研究では運動軌道の比較にとどまっていたのが、本研究は両者の制御様式に大きな違いがあることを初めて示した点でも斬新である。以上の研究成果は独創性、新規性に優れた内容であり、博士(理学)の学位に十分値するものと判定した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する回答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記の通りである。(関連論文 計2編、参考論文 計1編)

- (1) 垣内田翔子, 橋爪善光, 西井淳 論文題目:関節間シナジーに着目した歩行のコツの発見, 電子情報通信学会和文論文誌, Vol.J98-D, No. 7, 2015 (印刷中)
- (2) 垣内田翔子, 橋爪善光, 荻原直道, 西井淳: 関節間シナジーの視点によるニホンザルとヒトの二足歩行制御戦略の比較. 電子情報通信学会和文論文誌 (掲載号未決定, 印刷中)