

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25282183

研究課題名(和文) 歩行における関節間シナジーの発現機構と進化・成長に伴う変化

研究課題名(英文) Joint synergies during walking and its change with growth and evolution

研究代表者

西井 淳(Nishii, Jun)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：00242040

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,200,000円

研究成果の概要(和文)：関節間シナジーに着目する事で、二足歩行における制御戦略およびその成長や進化による変化を明らかにすることを目的として研究を実施し、以下の結果を得た。20歳前後の若年者では、両脚支持期等の特定の瞬間に足先位置を調整する関節間シナジーが強く働く。8歳の子どもの場合は関節間シナジーはまだ形成過程にある。70歳前後の高齢者には関節間シナジーの加齢による変化は認められない。ニホンザルの二足歩行中の関節間シナジーはヒトの場合と様々な点で異なり、進化の過程で股関節可動域が拡張したことがヒトの関節間シナジーの形成を促したことを示唆する。ヒトの関節間シナジーの形成には神経系のみならず骨格構造も寄与している可能性が高い。

研究成果の概要(英文)：We conducted research to clarify the control strategy in bipedal walking and its change with growth and evolution from the viewpoint of joint synergy and obtained the following results. Joint synergies which adjust the toe position were observed at some specific moments such as the double support phase in young subjects around the age of 20 years. In eight-year-old children, the formation of joint synergy is still in development, while differences in joint synergies between young subjects and elderly subjects around 70 years old were not recognized. The synergies observed in Japanese macaques differed from those in humans in various aspects, suggesting that expansion of the hip joint range during the evolutionary process was an essential factor for the formation of human joint synergy. The joint synergy of the passive walker suggested that not only the nervous system but also the skeletal structure contributes to the formation of joint synergy in humans.

研究分野：生体情報システム論

キーワード：関節間シナジー 二足歩行 ニホンザル 成長 加齢 UCM解析 身体性

1. 研究開始当初の背景

20 世紀前半に活躍したロシアの生理学者ベルンシュタインは、「熟練した鍛冶屋は正確に一定の位置を鋤で打つにも関わらず、その関節軌道にはばらつきがある」と報告した。この実験結果は、腕の関節軌道の試行毎のバラツキは各関節において独立に生じているのではなく、相殺し合うことでタスク達成に重要な鋤先位置のバラツキを抑えるような調整(関節間シナジー)が関節間に働いていることを示唆する。そこで、ベルンシュタインはこの結果に基づき、(1)生体の運動においては注意が払われている点とそうでない点があり、また、(2) 脳は初期姿勢や運動中の外乱に応じた適切な解を豊富な身体自由度を利用したシナジーによって臨機応変に引き出していると考えた。この鍛冶屋の例では、注意が払われている点が鋤先の打点位置とわかりやすいが、これに対して歩行運動では注意が払われている点はどこか、さらに身体自由度はどのように活用されているかは自明ではない。しかし、これらの点を明らかにできれば、ヒトが進化の過程で獲得した二足歩行における運動制御のコツを発見できる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、歩行中に下肢関節間に形成される関節間シナジーに着目する事で、二足歩行における制御戦略を探るとともに、成長や進化に伴う歩行制御様式の変化を明らかにする事である。より具体的には、以下を目的とする研究を実施した。(1) ヒトの歩行中の関節間シナジーがどのように形成されているか、また、その成長・加齢による変化がどのように生じているかを明らかにする。これにより、ヒトの歩行制御戦略を関節間シナジーの視点より考察する。(2) 二足歩行を行う二ホンザルの歩行中に形成される関節間シナジーには、ヒトとどのような共通点や相違点があるのかを明らかにする。これにより、二足歩行における制御戦略の普遍的特徴は何か、また、進化による変化はどのように生じたかを考察する。(3) 関節間シナジーは神経系による制御で形成されている可能性もあるが、ヒトが進化の過程で獲得された身体構造によって発現している可能性もある。そこで、センサやアクチュエータを持たず、その骨格構造のみで二足歩行を実現できる受動歩行機の歩行における関節間シナジーを解析し、その結果をヒトの場合と比較することで、ヒトの関節間シナジー形成における

骨格構造と神経系の役割を推定する。

3. 研究の方法

(1) ヒトの歩行中の関節間シナジーと成長・加齢による変化

若年者、子ども、高齢者の歩行計測実験および解析を以下のように実施した。若年者については 6 被験者(mean±SD: 21.2 ± 1.2 歳)のトレッドミル歩行(3.0, 4.5, 6.0 km/hr)および、8 被験者(21.1±1.7 歳)の自由歩行、子どもについては 6 被験者(8 歳)のトレッドミル歩行(3.0 km/hr)、高齢者については 6 被験者(72.2±5.3 歳)の自由歩行の運動計測実験を実施した。計測実験においては、被験者の大転子、膝、外果、および第五中足骨基部(以下では、股関節、膝関節、足関節および足先と記載)に反射マーカを貼付してモーションキャプチャシステムにより各軌道を計測した。取得した各被験者の関節軌道データに対して UCM (UnControlled Manifold) 解析を適用することで、股関節に対する足先位置のバラツキを抑える関節間シナジーの強さが、歩行の 1 周期中にどのように時間変動しているかを定量評価した。

本研究では、歩行中の各時期において関節間シナジーが足先や足関節の位置や速度のいずれをより安定化させるように働いているか、さらには、関節間シナジーが股・膝・足関節のいずれの間で強く働いているかについても検討したが、本報告書ではその結果の紹介は省略する。

(2) 二足歩行制御の進化による変化

芸ざるは訓練により滑らかな二足歩行を習得する(図 1)。本研究では、二ホンザル (*Macaca fuscata*) 2 頭(10 歳および 8 歳)の股・膝・足関節位置及び第五中足骨基部に反射マーカを貼付し、トレッドミル上での 2 足歩行(4.0 km/hr)の



図 1 二足歩行を行う芸ザル

運動計測実験を実施した。被験体とした 2 頭の二ホンザルはいずれも生後約 1 年から二足歩行の訓練を受けている芸ざるであり、トレッドミル上を少なくとも 5 km/hr の速度まで二足歩行できることを事前に確認している。ヒトの歩行と同様に関節間シナジーの評価には UCM 解析を用いた。

(3) 関節間シナジー形成における骨格構造と神経系の役割

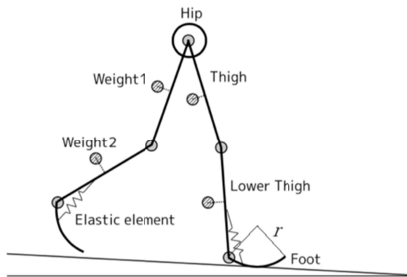


図2 受動歩行ロボットシミュレータ

股・膝・足関節を持つ3関節受動歩行ロボットの動力学シミュレータを構築し、各関節及び足先の軌道を取得した(図2)。受動歩行ロボットは Matsushita (2007)による2関節受動歩行ロボットを3関節に拡張したものであり、球形の腰部、直方体の大腿と下腿、直方体を円弧状に組み合わせた足部、蹴りだしを生成するバネ足首、大腿と下腿の重心位置を調節する2つの重りで構成されている。バネ足首のバネは生体の腱をモデル化したものである。シミュレーションには動力学計算エンジン Open Dynamics Engine を使用した。このような受動歩行ロボットにおいて遊脚中に足関節の固定を行わずに歩くと、重力の影響により足部が下垂して地面に接触し、転倒してしまう。ヒトの歩行では遊脚中期に足関節角度が底背屈約0度になった後、遊脚期終了までその角度が維持されることが報告されている。そこで、遊脚中に足関節角度が底背屈0度になるところで足関節を固定し、遊脚終了時に固定を解除するようにした。

このような受動歩行機の歩行中の関節軌道に対しても UCM 解析を行い、その結果をヒトの場合と比較することで、ヒトの歩行における関節間シナジーの各特徴が骨格構造と神経系のいずれに起因するかを考察した。

本研究では、さらに関節間シナジーを形成する神経メカニズムに関する検討も行ったが、本報告書ではその結果は省略する。

4. 研究成果

(1)ヒトの歩行中の関節間シナジーと成長・加齢による変化

若年者の歩行に関しては、歩行速度によらず以下の特徴が存在することが明らかになった。第一に、歩行周期全般にわたって、関

節軌道のばらつきが大きい時期には関節間シナジーが働くことで足先や股関節位置のばらつきが抑えられている。第二に、遊脚中期の MTC (Minimum Toe Clearance) の瞬間において、遊脚側には足先の高さを調整する関節間シナジーが強く働く。一方で、体幹を支える立脚側では関節角度の一步ごとのばらつきは小さく、さらに、股関節の高さを調整する関節間シナジーが働く。すなわち、MTC の瞬間には両脚に関節間シナジーが働くことで、前方に振り抜く足先の高さのばらつきは抑えられている。MTC は特に高齢者のつまずきの起きやすい時期であることが Mills et al. (2008)により報告されているが、本研究結果は関節間シナジーがこの時期のつまずき回避に寄与していることを示唆する。第三に、遊脚終期には一步ごとの脚姿勢のばらつきが抑えられ、そのとき立脚側では関節間シナジーによって股関節位置のばらつきが抑制されている。このような調整は、接地時に地面から受ける衝撃やその一步ごとのばらつきを抑えることで転倒リスクを抑制するためのものと考えられる。第四に、両脚支持期においては接地直後の脚ではいずれの関節角のばらつきも小さく、もう一方の遊脚前の脚では関節間シナジーによって股関節の高さのばらつきが抑制されている。すなわち、この時期においては両脚それぞれ異なる方法で体幹位置の調整を行うことで歩行の安定性を高めていることが示唆される。

以上のように歩行速度によらず特定のいくつかの時期に関節間シナジーが強く働いているということは、足先位置や股関節位置をどのようなタイミングでいかに調整すべきかという歩行実現のための一種のコツが存在することを示唆する。

8歳の子どもの歩行時に観察される関節間シナジーは、後期両脚支持期や MTC の瞬間にそれぞれ股関節位置や足先高さのばらつきを抑えるように形成されるなどの点で若年者と同様であった。しかし、歩行周期全体に渡る関節間シナジーの時間変化の大きさは若年者に比べて小さく、後期両脚支持期や MTC における関節間シナジーの強さも弱い。一方で、前期両脚支持期において足先高さのばらつきを抑制する関節間シナジーの強さは若年者では全員最小値をとるが、子どもの被験者の半数は極大値をとっていた。また、子どもの歩行中の関節軌道の一步ごとのばらつきは若年者に比べて大きかった。

高齢者の歩行においても、一步ごとの関節軌道のバラツキは若年者に比べて大きい。し

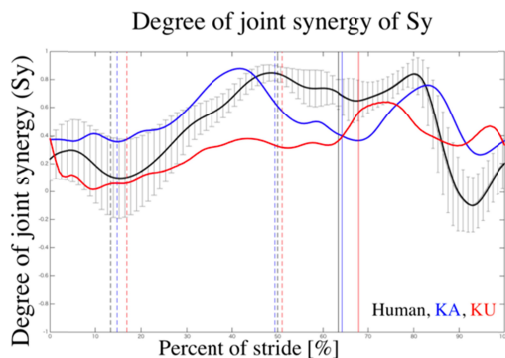


図3. ヒトとニホンザルの二足歩行において、股関節に対する足先の高さのばらつきを抑える関節間シナジーの大きさの時間推移。黒線はヒト(若年者6名, mean ± SD), 青線と赤線はニホンザル(KA, KU)を表す。横軸は1歩行周期中の時間を表し, 0%が接地の瞬間, 約15, 50, 65%の縦線が片脚支持期, 後期両脚指示器, 遊脚期の開始時刻をそれぞれ表す。

かし、足先位置のばらつきを抑える関節間シナジーの時間推移に関する加齢による変化は確認されなかった。

以上をまとめると、歩行中に股関節に対する足先位置のバラツキを抑える関節間シナジーは、成長・加齢により以下のように変化することになる。8歳においては、歩行中の関節間シナジーは形成過程にあり、成長とともに両脚支持期に体幹位置を安定化する関節間シナジーおよび、MTCの時期において躓きを防ぐ関節間シナジーが形成されていくとともに、関節軌道のバラツキも減少していく。さらに加齢がすすむと、関節軌道のバラツキは再び増加していくが、形成された関節間シナジーの変化は生じない。

(2) 二足歩行制御の進化による変化

ニホンザルの二足歩行においてもヒトの場合と同様に、遊脚中期に足先高さのばらつきを抑える関節間シナジーが観察された(図3)。しかし、関節間シナジーが働くタイミングについてはニホンザルとヒトで相違点も多い。ヒトの場合には遊脚中期にMTCの瞬間があり、この瞬間においては足先の高さを抑える関節間シナジーが強く働く。その後、一旦足先を振り上げた後引き戻して接地を行うが、この引き戻し時期には足先位置の調整を行う関節間シナジーは働いていない。一方、ニホンザルではMTCの瞬間や接地前の脚の引き戻しがなく、間欠的に関節間シナジーを用いて足先の高さを調整しながら単調に足を振り下ろして接地する。すなわち両者で

は接地前の脚制御戦略が異なる。

また、ニホンザルの後期両脚支持期に働く関節間シナジーはヒトの場合に比べて小さい。後期両脚支持期においてはヒトの股関節は過伸展するが、ニホンザルはヒトのように伸展することはできない。ただし、ニホンザル2頭のうち、股・膝関節をより伸展できた被検体(図3, KA)の関節間シナジーは、もう一方に比べて定性的にはヒトと似た時間推移を示した。すなわち、ヒトは進化のプロセスで股関節可動域を拡張することで後期両脚支持期での関節間シナジーの形成を行えるようになり、それにより安定した二足歩行が可能になったと考えられる。

(3) 関節間シナジー形成における身体の力学的構造の影響

受動歩行機の歩行においてもヒトの歩行と同様に、後期両脚支持期やMTCの瞬間に股関節に対する足先位置や足先高さのばらつきを抑える関節間シナジーが働くことを示す結果を得た。後期両脚支持期には受動歩行機に対する制御は一切行っていないので、ヒトの歩行のこの時期に働く関節間シナジーの形成には身体の物理構造が影響がしている可能性が高い。一方で、遊脚中は関節角を固定する制御を受動歩行機に対して行っていたため、ヒトの歩行の同時期に観察される関節間シナジーは中枢神経系の制御による足関節角度の変動抑制と身体の物理構造により生じる関節運動の両者により形成されていると考えられる。以上の結果は、ヒトの身体構造の中にも関節間シナジーを生成する機能が内在しており、その機能を十分に発揮できるように中枢神経系による運動制御を加えていることを示唆している。

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8件)

橋爪 善光, 垣内田 翔子, 西井 淳, “歩行中の下肢関節間シナジーにおける足関節の寄与”, 計測自動制御学会論文集, 52(6), 310-316 (2016) doi: 10.9746/sicetr.52.310 査読有
D. Owaki, S.-Y. Horikiri, J. Nishii, A. Ishiguro, “TEGOTAE-based control of bipedal walking”, Proceedings of 5th International Conference, Living Machines 2016 (Lecture Notes in Computer Science), 9793, 472-479 (2016)

doi: 10.1007/978-3-319-42417-0_49 査読有

Y. Taniyai, J. Nishii, "Optimality of Upper-Arm Reaching Trajectories Based on the Expected Value of the Metabolic Energy Cost", *Neural Computation*, 27(8), 1721-1737 (2015) doi: 10.1162/NECO_a_00757 査読有

垣内田 翔子, 橋爪 善光, 西井 淳, "関節間シナジーに着目した歩行のコツの発見", *電子情報通信学会論文誌*, J98-D(7), 1108-1117 (2015) doi: 10.14923/transinfj.2014JDP7135 査読有

垣内田 翔子, 橋爪 善光, 荻原 直道, 西井 淳, "脚関節間シナジーの視点による二ホンザルとヒトの二足歩行制御戦略の比較", *電子情報通信学会論文誌*, J98-D(8), 1171-1179 (2015) doi: 10.14923/transinfj.2014JDP7136 査読有

鎌田 浩志, 武田 湖太郎, 橋爪 善光, 倉山 太一, 末長 宏康, 近藤 国嗣, 西井 淳, 大須 理英子, 大高 洋平, "歩行解析のための新しい足底接地センサ(STANS)の開発", *総合リハビリテーション*, 42(1), 67-71 (2014) doi: 10.11477/mf.1552110376 査読有

T. Hioki, Y. Miyazaki, J. Nishii, "Hierarchical control by a higher center and the rhythm generator contributes to realize adaptive locomotion", *Adaptive Behavior*, 21(2), 86-95 (2013) doi: 10.1177/1059712312471402 査読有

H. Suenaga, Y. Hashizume, J. Nishii, "An analysis of leg joint synergy during backward walking", *Proceedings of the 35th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, 7476-7479 (2013), doi: 10.1109/EMBC.2013.6611287 査読有

[学会発表](計 28 件)

渡邊 伊織, 西井 淳, "体性感覚情報に基づく到達運動制御の軌道生成能力の考察", *電子情報通信学会総合大会情報・システムソサイエティ特別企画学生ポスターセッション* (2018).

日置 智子, 西井 淳, "歩行中に働く関節間シナジーに対する各脚関節の寄与", *電子情報通信学会 NC 研究会* (2018).

後藤 真里, 西井 淳, "感覚情報によって励起される歩行運動中の姿勢制御の解明", *電子情報通信学会総合大会情報・システムソサイエティ特別企画学生ポスターセッション* (2018).

Y. Hashizume, S. Kaichida, K. Takeda, J. Nishii, "Leg joint synergies during walking in older adults", *Progress in Motor Control XI*, (2017).

S. Kaichida, Y. Hashizume, J. Nishii, "A common strategy of running and walking from the viewpoint of joint synergy", *Progress in Motor Control XI* (2017).

日置 智子, 西井 淳, "The difference in the estimation of joint synergy during walking by UCM and covariation analyses", 第 27 回 神経回路学会全国大会 (2017).

J. Nishii, S. Uchida, "A neural network model for synergetic control and the dependency of its generalization capability on modality", *The 11th joint DVS Conference on Motor Control & Learning, Biomechanics* (2016).

J. Nishii, S. Uchida, "A neural network model that realizes synergetic control", *International Symposium on the Neuromechanics of Human Movement*, (2016).

堀切 舜哉, 大脇 大, 西井 淳, 石黒 章夫, "「手応え関数」に基づく適応的二足歩行制御", 第 28 回自律分散システム・シンポジウム (2016).

S. Kaichida, Y. Hashizume, N. Ogihara, J. Nishii, "Control strategy of biped walking of humans that acquired through evolution: from the view point of variance control", *Second International Workshop on Skill Science*, (2015).

J. Nishii, T. Hamamura, "A simple neural control model that stabilizes the uncontrolled manifold", *Progress in Motor Control X* (2015).

D. Owaki, S. Horikiri, J. Nishii, A. Ishiguro, "Experimental Verification of Bipedal Walking Control Exploiting Plantar Sensory Feedback", *The 7th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines* (2015).

D. Owaki, S. Horikiri, J. Nishii, A. Ishiguro, "Load-dependent Interlimb Coordination for Bipedal Walking", *ICRA2015 CPG Workshop* (2015).

Y. Taniyai, J. Nishii, "Open-loop control based on the minimum energy cost model suppresses the positional variance around the end of reaching movement", *Progress in Motor Control X* (2015).

橋爪 善光, 垣内田 翔子, 武田 湖太郎, 西井 淳, "歩行における下肢関節間シナジーの加齢による変化", 第 7 回 Motor Control 研究会 (2015).

西井 淳, "歩行における脚関節間シナジーとその生成機構", *時間学研究セミナー「心をめぐる冒険」* (2015).

- 藤川 翔平, 西井 淳, “構成音の時間発展パターンに着目した楽曲の構造解析”, 電子情報通信学会総合大会情報・システムソサイエティ特別企画学生ポスターセッション (2015).
- 堀切 舜哉, 大脇 大, 西井 淳, 石黒 章夫, “足底感覚情報を活用した二足歩行制御則の実験的検証”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス (2015).
- 堀切 舜哉, 大脇 大, 西井 淳, 石黒 章夫, “足底感覚情報を用いた二足歩行制御則の環境適応性に関する検証”, 第 16 回 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (2015).
- J. Nishii, T. Hamamura, “A low dimensional feedback control model that exploits abundant degrees of freedom”, International Conference on Artificial Life and Robotics (2014).
- ⑳ 西井 淳, “歩行における脚関節間シナジーとその生成機構”, Japan Society of Motor Control and Neuro-rehabilitation 2014 (2014).
- ㉑ 谷合 由章, 浪花 智英, 西井 淳, “上肢到達運動における手先軌道のばらつきに着目した消費エネルギー期待値最小規範の検討”, 電子情報通信学会 NC 研究会 (2014).
- ㉒ 堀切 舜哉, 大脇 大, 西井 淳, 石黒 章夫, “足底感覚から生み出される「足応え」を活用した適応的二足歩行制御”, 第 20 回創発システム・シンポジウム講演会 (2014).
- ㉓ 豊田 誠治, 垣内田 翔子, 西井 淳, “二足歩行の脚関節間シナジーにおける身体性の寄与”, 電子情報通信学会 NC 研究会 (2014).
- ㉔ S. Kaichida, Y. Hashizume, Y. Iida, S. Torii, J. Nishii, “Development of Leg Joint Synergy During Walking with Growth”, Progress in Motor Control IX, (2013).
- ㉕ R. Murakami, T. Kurayama, Y. Goto, Y. Tani, Y. Tadokoro, C. Kondo, K. Sasaya, D. Matsuzawa, E. Shimizu, J. Nishii, K. Kondo, Y. Otaka, “Muscle activation patterns in very slow walking are different from those of a natural gait”, Neuroscience 2013 (2013).
- ㉖ 橋爪 善光, 武田 湖太郎, 垣内田 翔子, 宮本 梓, 大高 洋平, 中道 清広, 渡邊 泰伸, 片岡 嗣和, 河野 仁, 齋藤 正史, 西井 淳, 町田 正文, “下肢の関節間シナジーに着目した高齢者歩行の解析”, 第 40 回日本臨床バイオメカニクス学会 (2013).
- ㉗ 福田 裕樹, 大脇 大, 西井 淳, 石黒 章夫, “筋肉群の協働的励起に基づく立位姿勢制御”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (2013).

〔産業財産権〕

取得状況 (計 1 件)

名称: 歩行信号生成装置および歩行信号生成システム

発明者: 大高 洋平, 大須 理英子, 西井 淳, 末長 宏康, 橋爪 善光

権利者: 株式会社国際電気通信基礎技術研究所, 国立大学法人山口大学

種類: 特許

番号: 特許第 5728689 号

取得年月日: 2015 年 4 月 17 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西井 淳 (NISHII, Jun)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号: 00242040

(2) 研究分担者

橋爪 善光 (HASHIZUME, Yoshimitsu)

九州情報大学・経営情報学部・講師

研究者番号: 90638537

垣内田 翔子 (KAICHIDA, Shoko)

鹿児島工業高等専門学校・電気電子工学科・助教

研究者番号: 20779847

(3) 連携研究者

荻原 直道 (OGIHARA, Naomichi)

慶応大学・理工学部・教授

研究者番号: 70324605

飯田悠佳子 (IIDA, Yukako)

駿河台大学・現代文化学部・講師

研究者番号: 30548277