

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月23日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22500526

研究課題名（和文） 関節間協調に着目した歩行のコツの発見

研究課題名（英文） Analysis of basic strategy of biped locomotion from the view point of joint synergy

研究代表者

西井 淳 (NISHII JUN)

山口大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：00242040

研究成果の概要（和文）：

生体は高い身体自由度を活用することで運動タスクを臨機応変に達成することができる。例えば、手先を目標位置に動かす際、肘関節の伸展が不十分であっても手首関節等運動で補うことで運動を達成できる。本研究では、成人、10才児、ニホンザル、受動歩行器の二足歩行においてこのような関節間協調（関節間シナジー）が如何に活用されているかを調べた。その結果、二足歩行における関節間シナジーの活用の仕方は進化と学習により変化していること、また、関節間シナジーの生成に身体の物理構造が寄与していることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：

Our nervous system accomplishes target tasks by exploiting high degrees of freedom of our body. For instance, we can reach our hand to a desired position, even if the extension of the elbow joint is insufficient, by compensating the angle error by the other joint movement. In this study we examined when and how such joint coordination, a. k. a., joint synergy, is exploited during walking by adults, 10-year old children, macaque monkeys, and a passive walker. The results revealed that the control strategy for bipedal locomotion has changed through evolution and learning, and the physical structure of our body contributes to the generation of the joint synergy.

交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2010年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 2011年度 | 900,000   | 270,000 | 1,170,000 |
| 2012年度 | 800,000   | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 2,800,000 | 840,000 | 3,640,000 |

研究分野：総合分野

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学、身体教育学

キーワード：関節間シナジー、UCM解析、二足歩行、ニホンザル、歩行制御

### 1. 研究開始当初の背景

生体は高い身体自由度を活用することで運動タスクを臨機応変に達成することができる。例えば、手先を目標位置に動かす際、肘関節の伸展が不十分であっても手首関節等運動で補うことで運動を達成できる。このような関節間の相補的な運動(関節間シナジー)はしばしば運動タスク実現に重要な瞬間に観察されることが報告されている。そこで、関節間シナジーが歩行中のどのようなタイミングにどのように活用されているかを解析することによって、歩行運動において制御されている変数は何か、さらに、学習および進化の過程で獲得した歩行のコツは何かを知る手がかりが得られると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、ヒトおよびニホンザルの歩行戦略を関節間シナジーに着目して考察し、その比較検討により、ヒトが柔軟な歩行を実現するために進化の過程で獲得してきた歩行戦略、すなわち2足歩行のコツを探ることである。また、関節間シナジーが神経系の制御によるものなのか、それとも身体形状の物理構造によるものかについても考察し、これによってヒトの歩行制御メカニズムの推定を行う。

### 3. 研究の方法

本研究では、成人4名、8-9才の子ども5名、芸ザルとして二足歩行の訓練を受けたニホンザル2頭がトレッドミル上で二足歩行する際の股、膝、踝関節、および足先(第五中足骨基部)の運動軌道をモーションキャプチャシステムでそれぞれ撮影した。取得した関節軌道は、歩行の一周期に対して規格化し、一步毎の関節軌道のばらつきがどのように分布しているかをUCM(Uncontrolled manifold)解析によって調べることで、股関節に対する足先位置のばらつきを抑える関節間シナジーがどのような瞬間に強く働いているかを調べた。また、二リンクの脚を持つ受動歩行機の歩行シミュレーション実験によって、骨格系の物理構造のみでどのような関節間シナジーが生成されるかを調べ、ヒトの解析結果と比較することで、ヒトの関節シナジーの生成メカニズムを探った。

### 4. 研究成果

成人の歩行では、遊脚中期において足先が最も床と近付く瞬間に足先の高さを調節する関節間シナジーが、立脚相終期の両脚支持期においては股関節位置を調節する関節間シ

ナジーが強く働くことがわかった。前者は老人が躓きを起こしやすい瞬間であることが知られていることから、躓きを防ぐ上で重要な関節間シナジーと考えられる。後者は体幹位置の制御に重要な時期である両脚支持期に働くことから、体幹姿勢を調整して歩行の安定化を図る上で重要な関節間シナジーと考えられる。また、遊脚終期の接地直前には関節間シナジーはあまり働かないが、一步毎の脚姿勢のばらつきは抑えられており、同時期に後方にある支持脚には関節間シナジーが働いて股関節の高さを調整していることが分かった。すなわち接地時には、両脚が協調的に働くことで接地する足先位置を調節し、これにより、地面から受ける衝撃の変動を抑えて転倒を避けていると考えられる。

子どもの歩行においては、足先位置のばらつきを抑える関節間シナジーが歩行周期のほぼ全体にわたって観察されるものの、関節間シナジーの強さの時間変化が成人に比べて少ない被験者が多かった。特に、両脚支持期に股関節位置を調整する関節間シナジーが弱い点や、接地直前にも足先位置の調整に関節間シナジーを用いているなどの点で成人と異なる被験者が約半数いた。成人型歩行は8才頃までにほぼ完成するとの報告もあるが、8才はまだ成人型歩行への過渡期であり、歩行周期全体にわたり弱い関節間シナジーが観察される幼児型から、成長とともに関節間シナジーの働く時期と働かない時期が分離した成人型に移行していくことを本研究結果は示唆している。ただし、この点について確証を得るには今後より広い年齢層の子どもを対象とした調査が必要であり、現在も継続的に調査を行っている。

ニホンザルの二足歩行も、上記の子どもの場合と同様に両脚支持期に股関節位置を調整するシナジーが弱い、接地直前にも足先位置の調整に関節間シナジーを活用しているなどの点で成人と異なる場合があった。以上の結果は、学習や成長もしくは進化の過程で二足歩行の制御戦略が変化していることを示すものである。特に、ヒトの成人においては両脚支持期の関節間シナジーの形成および着地時の脚姿勢のばらつきの抑制が顕著であり、これが進化と成長によりヒトが獲得した二足歩行のコツと考えられる。

さらに、受動歩行ロボットの歩行運動を解析したところ、誘脚中期に足先の高さを調節する関節間シナジーと、両脚支持期に股関節の水平位置を調節する関節間シナジーが観察された。同時期にヒトでも同様の関節間シナジーが存在することから、この時期の関

節間シナジーの形成には骨格系の物理構造が寄与している可能性が高い。一方で、ヒトでは観察されても受動歩行機では観察されない関節間シナジーも存在した。この結果は、ヒトの歩行運動における関節間シナジーの発現には、進化の過程で獲得した身体の物理構造も大きく関与しており、さらに歩行の安定性を増すために神経系が運動の修飾を行っていることを示唆している。この点についてさらに詳細に調べるため、今後は三リンク脚を持つ受動歩行機の歩行解析及び、ヒトの歩行中の筋電解析による関節間シナジー生成メカニズムの推定をすすめていく予定である。また、神経系が関節間シナジーを活用して運動制御を行うための神経回路モデルの構築も行っており、これにより歩行制御モデルも構築して行く予定である。

#### 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 4 件)

- ① T. Hioki, Y. Miyazaki, J. Nishii. Hierarchical control by a higher center and the rhythm generator contributes to realize adaptive locomotion. *Adaptive Behavior*, 査読有り, Vol. 21, No. 2, pp. 86-95, 2013, doi:10.1177/1059712312471402
- ② J. Nishii, Y. Hashizume, S. Kaichida, H. Suenaga, Y. Tanaka. Constraint and exploitation of redundant degrees of freedom during walking. *Robotics and Autonomous Systems*, 査読有り, Vol. 60, pp. 679-684, 2012, doi: 10.1016/j.robot.2011.12.006
- ③ S. Toyota, S. Kaichida, Y. Hashizume, and J. Nishii. “Leg joint synergy emerged from the body dynamics during walking”, *Proc. of Int. Conf. on IEEE*

*Systems, Man and Cybernetics*, 査読有り, pp. 484-489, 2012, doi: 10.1109/IC- SMC.2012.6377771

- ④ S. Kaichida, Y. Hashizume, N. Ogihara, J. Nishii. “An analysis of leg joint synergy during bipedal walking in Japanese macaques”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Engineering in Medicine and Biology Society*, 査読有り, pp. 8183-8186, 2011. doi: 10.1109/IEMBS.2011.6092018

[学会発表] (計 23 件)

- ① S. Kaichida, Y. Hashizume, N. Ogihara, J. Nishii, Development of leg joint synergy during walking with growth. *Progress in Motor Control IX*, 2013/7/14-16, Montreal (Canada)
- ② 西井淳. UCM解析で探る歩行のコツ. 電子情報通信学会身体性情報学研究会, 2012/11/18, 山口大学 (山口市).
- ③ S. Toyota, S. Kaichida, Y. Hashizume, J. Nishii. Leg joint synergy emerged from the body dynamics during walking. *Int. Conf. on IEEE Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, 2012/10/14-18, Seoul (Korea)
- ④ 豊田誠治, 垣内田翔子, 橋爪善光, 西井淳. 身体の力学的特性による歩行時の脚関節間シナジー. ニューロコンピューティング研究会, 2012/7/30- 31, 立命館大学 (草津市).
- ⑤ 豊田誠治, 西井淳. 身体特性が生み出す歩行時の脚関節間協調. 電子情報通

- 信学会総合大会, 2012/3/21-24, 岡山大学 (岡山市).
- ⑥ S. Kaichida, Y. Hashizume, N. Ogihara, J. Nishii. An analysis of leg joint synergy during bipedal walking in Japanese macaques, IEEE Int. Conf. on Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS), 2011/8/29-9/3, Boston (USA).
- ⑦ S. Kaichida, Y. Hashizume, N. Ogihara, J. Nishii. A comparative study of bipedal locomotion of humans and Japanese macaques from the viewpoint of leg joint synergy. Progress in Motor Control VIII, 2011/7/21- 23, Cincinnati (USA).
- ⑧ 垣内田翔子, 橋爪善光, 荻原直道, 西井淳. ヒトとニホンザルの二足歩行における脚関節間協調の比較. 第5回生理研 Motor Control研究会, 2011/6/16-18, 自然科学研究機構岡崎コンファレンスセンター (岡崎市).
- ⑨ 守田志穂, 垣内田翔子, 橋爪善光, 小林海, 飯田悠佳子, 鳥居俊, 西井淳. 子どもの歩行における 関節間協調の解析. 日本発育発達学会第9回大会, 2011/3/12-13, 早稲田大学 (東京).
- ⑩ 垣内田翔子, 橋爪善光, 荻原直道, 西井淳. ニホンザルの歩行における脚関節間シナジーの解析. ニューロコンピューティング研究会, 2011/3/7-9, 玉川大学 (東京).
- ⑪ 西井淳. Biomechanicsの立場から ~歩行における身体自由度の拘束と活用~, Japan Society for Motor Control and Neuro-Rehabilitation, 2010/8/26-27, 山口大学 (山口市).
- ⑫ 垣内田翔子, 橋爪善光, 西井淳. 脚関節間協調に注目した歩行運動の解析. 第4回生理研Motor Control研究会, 2010/5/27-29, 自然科学研究機構岡崎コンファレンスセンター (岡崎市).

[産業財産権]  
○出願状況 (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: 武田湖太郎, 大高洋平, 大須理英子, 西井淳, 末長宏康, 橋爪善光  
権利者: 同上  
種類: 特許  
番号: 特願 2011-110314  
出願年月日: 2011年5月17日  
国内外の別: 国内

[その他]  
ホームページ等  
<http://bc1.sci.yamaguchi-u.ac.jp/~jun/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西井淳 (NISHII JUN)  
山口大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号: 00242040

### (2) 研究分担者

( )  
研究者番号:

### (3) 連携研究者

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