

平成 22 年 5 月 19 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19760173
 研究課題名 (和文) ニホンザルの神経筋骨格モデルに基づく適応的歩行運動実現メカニズムの解明
 研究課題名 (英文) Elucidating the mechanisms to generate adaptive locomotion based on a neuromusculoskeletal model of the Japanese monkey
 研究代表者
 青井 伸也 (AOI SHINYA)
 京都大学・工学研究科・助教
 研究者番号：60432366

研究成果の概要 (和文)：本研究課題では、ニホンザルの詳細な解剖学データから 3 次元筋骨格モデルを作成し、計測した歩行キネマティクスに基づいてニホンザルの歩行運動をコンピュータ上で動力学的に再現することを可能とした。更に、適応的な歩行生成に寄与する神経制御系の役割を調べるために脊髄のリズムパターン生成器の新たな数理モデルを構築し、位相リセットという概念が、神経制御系における機能として適応的な歩行生成に大きく寄与するという示唆を得ることができた。

研究成果の概要 (英文)：A three-dimensional musculoskeletal model of the Japanese monkey was developed based on anatomical data and the locomotor behaviors were constructed by computer simulations based on measured kinematics data. In addition, a new mathematical model for the spinal pattern generator was developed to investigate the sensory mechanisms in locomotion control, demonstrating that phase resetting plays an important role to create adaptive locomotor behaviors.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	700,000	0	700,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,100,000	420,000	2,520,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：知能機械学・機械システム

キーワード：バイオメカニクス

1. 研究開始当初の背景

動物は、その冗長で複雑な筋骨格系を巧みに動かし、多様な環境に対して適応的な歩行運動を実現する。こうした動物の優れた歩行生成知能の解明に向けて多くの研究が行われているが、従来、これは生体の神経回路網

の優れた制御機構に帰着されて考察されてきた。そのため、神経回路網の形態や活動を直接計測し、その計測データに基づいたデータ解析からアプローチする神経生理学的研究が盛んに行われてきた。しかしながら、歩行運動は神経系と筋骨格系、そして環境との

力学的相互作用によって形成される秩序だった運動であり、十分な力学的考察なしに、神経活動記録のみから歩行運動の支配原理を理解するには限度がある。

それに対して、実際に歩行中の身体キネマティクス、床反力、筋電図、酸素消費量等のデータを計測し、身体筋骨格系における形態・構造学的性質や、内部の運動生理・生体力学的特性を推定する研究も行われている。しかしながら、これらの結果はあくまで推定に過ぎず、このアプローチからは、これらの結果に基づいて実際に力学を通して歩行を実現させた時に、生体のようにエネルギー効率が良く、適応的な歩行が実現されるかを検証することはできない。

そこで近年、生体の数理モデルに基づいて数値シミュレーションを用いた研究が始まりつつある。このアプローチでは、神経生理学・形態学・生体力学等の知見に基づいて、実際に神経系と筋骨格系、そして環境との力学的相互作用からいかにして歩行が生成されるかを検証することができる。しかしながら現在のところ、まだまだ動物のように安定でロバストな歩行が実現されてはおらず、ほとんどが複雑なパラメータチューニングによって、たまたま歩行が実現される条件が見つけれられている程度である。そのため、例えば何かあるパラメータを用いて、その歩行生成における機能的役割を調べるパラメータスタディを行えるほどのロバストな歩行が実現されてはいない。数値シミュレーションを用いる利点は、他のアプローチでは困難な力学的観点から仮想的な条件に対して徹底的な考察が行える点にあり、この考察に十分耐え得る数値シミュレーターを構築することが求められている。

2. 研究の目的

本研究課題では、ニホンザルの歩行運動を対象にして、筋骨格構造の詳細な数理モデル、歩行中の身体キネマティクスや運動生理学的知見に基づく筋活動の数理モデル、そして神経生理学的知見に基づく歩行神経制御系の数理モデルを構築し、それぞれの力学系の機能的な統合により発現する歩行運動を、動力学シミュレーションを通して再現することで、適応的な歩行運動生成原理を解明することを目的とした。

また、ニホンザルを研究対象とする理由は、

1. ニホンザルが歩行神経生理学の実験動物として用いられているため生理学的実験とシミュレーション実験との対比が可能となること、
2. ニホンザルの4足歩行から2足歩行への遷移が、2足歩行の起源を探る上で人類学的に興味深い研究対象となっていること、
3. ヒトと系統的に近い霊長類の解析によって得られる知見は、ヒトにも直接応用

可能であると期待されること、による。

3. 研究の方法

動物の筋骨格の形態は、その運動・移動様式と密接な対応関係にあり、その複雑な筋骨格系を協調的にかつ巧みに動かすことによって適応的な運動を実現している。この動物の動きには、筋骨格系の構造が規定する運動学的・生体力学的拘束が強く反映されており、動物の複雑な運動を理解するためには、この拘束を正確に再現することが重要となる。

そこで本研究課題では、ニホンザルから実際に測定した解剖学データから詳細な筋骨格構造の幾何学的数理モデルを構築した。そして、歩行中のモーションキャプチャーデータからその筋骨格モデルに基づいて歩行運動の身体キネマティクスを再現することで形態学・運動学的に詳細な歩行を生成した。

更に、運動生理学的知見から、筋の発生する力学特性は筋の筋長-張力、収縮速度-張力関係等から規定され、脊髄や上位系からの入力、伸張反射等の反射機構から筋の活性度が決定されることが明らかとなっており、神経生理学的知見から、脊髄に存在するリズムパターン生成器(CPG)が動物の歩行に大きく寄与していることが明らかとなっている。そこで本研究課題では、これらの知見に基づいて、CPGを含んだ脊髄系の運動制御系と筋の力学モデルを構築し、動力学シミュレーションを行った。

4. 研究成果

ニホンザルの骨格系の構造が規定する運動学的・生体力学的拘束を正確に再現するために、新鮮屍体のX線CTスキャナから取得した全身3次元体表面形状と骨格形状に関する詳細なデータと、筋の付着位置や走行、生理学的断面積などの解剖から得られた筋に対する詳細なデータを基にして構成した筋骨格系の数理モデル(図1、論文②)に基づいて、ニホンザルの3次元動力学シミュレーターを構築した。そして、ニホンザルの歩行運動中の運動計測データに基づいて歩行シミュレーションを行い、コンピュータ上でニホンザルの歩行運動を再現することを可能とした(図2)。

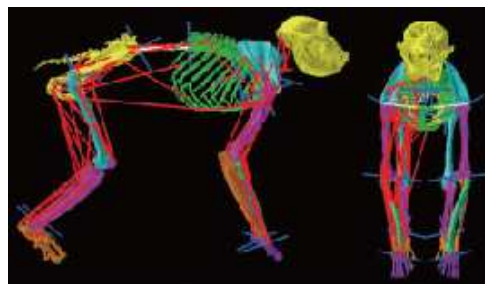


図1. ニホンザルの3次元筋骨格モデル

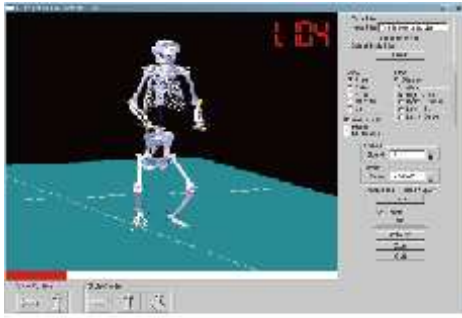


図2. 動力学シミュレータと歩行の様子

構築したニホンザルの筋骨格モデルに基づく動力学シミュレータにおいて、神経制御系のモデルを構築して神経筋骨格系の統合的なシミュレーションを行うことを目的として、まずはヒトを対象として神経制御系のモデルを構築し、神経筋骨格系の統合的なシミュレーションを行った。特に、非線形振動子を用いてCPGをモデル化することで、神経制御系のモデルを構築した。シミュレーション結果と、床反力や筋電図パターンといった歩行運動の力学的寄与を示す計測データと比較検証することで、運動学・動力学的に妥当な歩行運動が生成されることを確認し、更には、神経生理学的研究からも明らかとされている接地感覚情報に基づく位相リセットによる運動指令の調整が、環境の変化や外乱などに対する適応的な歩行運動の生成に大きく寄与することを確認した(論文③, ④)。

しかしながら、これまでのシミュレーションでは歩行中に取得した運動計測データに基づいて歩行を再現していたため、全ての関節の運動をあらかじめ既定し、関節におけるフィードバック制御に基づいて歩行運動を構成していた。この方法では、あらかじめ関節の運動が規定されているため、獲得される適応性は非常に制限されてしまう。更には、関節におけるフィードバック制御のために、脳神経系の情報処理における神経伝達の遅れによって運動が容易に不安定化してしまうという問題があった。神経筋骨格モデルに基づいて適応的な運動生成メカニズムを明らかにする上で、これらの問題点を克服することは従来から重要な課題であった。そこで、神経生理学研究から示唆されているCPGの2階層の構造をモデル化して、フィードフォワード制御に基づく運動指令のモデルを作成し、神経伝達遅れも考慮した体性感覚情報に基づく姿勢制御と、接地感覚情報に基づく位相リセットを統合することで新たな数理モデルを構築し、あらかじめ規定した関節運動に依存しない歩行運動を実現することができた。その結果を、歩行中の関節運動や、床反力、筋電図パターンなどと比較した結果、運動学的にも動力学的にも妥当な歩行運動が実現できていることが確認でき、更には、

この数理モデルに基づいて、外乱や環境変化に対する適応的な運動生成メカニズムを調べることで、特に接地感覚に基づく位相リセットが大きく寄与することがここでも示唆された(図3, 論文①)。これらの研究成果は、今後ニホンザルの神経筋骨格モデルに基づく動力学シミュレーション研究を推進する上でも重要な知見となるはずである。

・位相リセットを用いないことによる転倒



・位相リセットを用いた適応的歩行



図3. 突然の環境変化(斜面)に対する適応的な歩行生成の例

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 S. Aoi, N. Ogiwara, T. Funato, Y. Sugimoto, K. Tsuchiya, "Evaluating Functional Roles of Phase Resetting in Generation of Adaptive Human Bipedal Walking with a Physiologically Based Model of the Spinal Pattern Generator", *Biological Cybernetics*, 査読有, Vol. 102, No. 5, pp. 373-387, 2010.
- ② N. Ogiwara, H. Makishima, S. Aoi, Y. Sugimoto, K. Tsuchiya, M. Nakatsukasa, "Development of an Anatomically Based Whole-body Musculoskeletal Model of the Japanese Macaque (*Macaca fuscata*)", *American Journal of Physical Anthropology*, 査読有, Vol. 139, No. 3, pp. 323-338, 2009.
- ③ 青井伸也, 荻原直道, "神経筋骨格モデルに基づくヒトの歩行シミュレーション", 計測と制御, 査読有, Vol. 48, No. 9, pp. 687-692, 2009.
- ④ S. Aoi, N. Ogiwara, Y. Sugimoto, K. Tsuchiya, "Simulating Adaptive Human Bipedal Locomotion Based on Phase Resetting Using Foot-Contact Information", *Advanced Robotics*, 査読有, Vol. 22, No. 15, pp. 1697-1713, 2008.

[学会発表] (計7件)

- ① ○青井伸也, 荻原直道, 船戸徹郎, 杉本靖博, 土屋和雄, "ヒトの神経筋骨格モデルに基づく適応的歩行生成における位相リセットの役割の考察", 第22回自

律分散システム・シンポジウム, 2010年1月31日, 名古屋大学野依記念学術交流館.

- ② ○S. Aoi, N. Ogihara, T. Funato, Y. Sugimoto, and K. Tsuchiya, "Generation of Adaptive Human Bipedal Locomotion Based on a Neuromusculoskeletal Model", The 3rd International Symposium on Mobiligence, 2009年11月20日, Awaji Yumebutai International Conference Center.
- ③ ○青井伸也, 荻原直道, 土屋和雄, "ニホンザルの筋骨格モデルに基づく歩行分析と歩行遷移ロボットの紹介", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009・ランチタイムセミナー, 2009年5月25日, 福岡国際会議場.
- ④ ○S. Aoi, N. Ogihara, Y. Sugimoto, K. Tsuchiya, "Computer Simulation of Adaptive Human Bipedal Locomotion Based on Phase Resetting Using Foot Contact Information", 4th Int. Symp. on Adaptive Motion of Animals and Machines, 2008年6月3日, Cleveland, Ohio, USA
- ⑤ ○青井伸也, 土屋和雄, 荻原直道, 杉本靖博, "ヒトの2次元神経筋骨格モデルに基づく歩行生成", 第20回 自律分散システム・シンポジウム, 2008年1月25日, 信州上諏訪温泉 浜の湯.
- ⑥ ○青井伸也, 土屋和雄, 荻原直道, 杉本靖博, "ヒトの神経筋骨格モデルに基づく歩行生成 -FB 制御機構の考察-", 第8回 SICE SI 部門講演会, 2007年12月21日, 広島国際大学 国際教育センター.
- ⑦ 土屋和雄, ○青井伸也, 荻原直道, "神経-筋骨格モデルに基づく動物の歩行解析", (社)日本機械学会 創立 110 周年記念 2007年度年次大会, 2007年9月10日, 関西大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青井 伸也 (AOI SHINYA)
京都大学・工学研究科・助教
研究者番号: 60432366

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し