

平成 21 年 5 月 18 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19500166

研究課題名(和文) 脚式移動制御手法の統合と運動知能の機構と制御両面からの統一的理解

研究課題名(英文) Integration of legged locomotion control methods and understanding of motion intelligence from the view points of both mechanics and control

研究代表者

木村 浩 (KIMURA HIROSHI)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授

研究者番号：40192562

研究成果の概要： 四脚歩行において姿勢制御とリズム運動制御と統合することが出来る汎用脚式移動制御器を設計し力学シミュレータに実装した。脚のピッチ面内リズム運動は、支持脚期から遊脚期への脚相遷移に脚負荷 (leg loading/unloading) を用いた脚制御器 (leg controller, LC) により生成される。脚負荷情報は対側脚間の負荷の移動、すなわち、ロール面内姿勢情報を含んでいるので、脚負荷情報に基づく脚相調節は、脚間の協調(歩容)を直接的な LC 間結合なしで発生させることが出来るだけでなく、歩容調節を通してロール面内姿勢制御を行うことが出来る。我々は、この制御器が横方向外乱に対して歩行安定化の能力をある程度持つこと、ロール運動の振幅を減らす外乱に対しては同側脚間に上行の脚相調節機能が必要であることを示した。結果として、「支持脚期から遊脚期への脚相遷移に脚負荷を用いた LC」と「同側脚 LC 間の上行脚相調節機構」という簡単な運動生成・制御機構により、従来の手法では実現が困難であった「前庭感覚に基づく踏み出し反射を用いない長周期低速度での不整地動歩行」が可能であることを示した。また、四脚走行の歩容生成においては前後脚ヒザ関節に取り付けられたバネの剛性比や重心の幾何中心からの偏差など機構の持つ特性が重要であることを数値解析、力学シミュレーション、四脚ロボット実験により示し、一周期に二回跳躍期があるフルバウンド走行が現れる条件を簡単な関節 PD 制御との関係で明らかにした。これらの研究により、四脚歩行・走行制御手法の統合と機構と制御両面からの運動知能の統一的理解が実現できた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：知覚情報処理・知能ロボティクス・知能機械学・機械システム

科研費の分科・細目：情報学 ・ 知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：(1) 知能ロボティクス (2) 知能機械

1. 研究開始当初の背景

(1) 生物において「筋骨格系」とそれを制御する「神経系」は密接な関係にあり、互いの優れた点を活用しながら並列に進化してきたことは容易に想像できる。このような筋骨格系と神経系の「並列進化」の結果として、生物はそれぞれの実環境において十分な運動能力を発揮している。特に、脚式移動について考えると、実環境において効率と適応に関して十分な踏破能力を実現している。このような生物の運動に関する能力を推論や視覚処理などの知能とは別にここでは「運動知能」と呼ぶ。生物学においては、例えばバイオメカニクスにおいて筋骨格系のモデル化やその特性を明らかにする研究が行われており、一方、神経生理学・神経行動学などにおいて運動発現・適応・学習などのメカニズムが詳細に調べられている。しかし、筋骨格系と神経系は密接な関係にありながら制御対象(筋骨格系)と制御主体(神経系)のように個別に扱われ、相互の関連についての詳細については不明な点が多い。

(2) このような運動知能の問題点に関して注目すべきは、生物の歩行・走行では、移動速度を上げるに従って、感覚(センサ)情報に頼った制御から機構の持つ動特性を活用した制御に移行し、運動計画や学習などを司る高次神経系から脊髄レベルの下位神経系を経て自己安定性を持つ筋骨格系へと主に制御を担う部所が遷移していくことである。結果として、生物は低速歩行から高速走行までの広い範囲において、エネルギー効率と適応性を両立させている。

(3) 一方ロボティクスにおいては、低速歩行では転倒しないための「姿勢制御」が、中速歩行では機構の順振子・倒立振子としての動特性を利用しながら相互引き込みによりリミットサイクルを構成する「リズム発生器」による制御が、高速走行では機構のパネ・質量系としての振動がもつ「自己安定性」とリミットサイクルへの引き込みを利用した制御が主であった。従来これら三つの脚式移動は別々に研究され、これらを統合し、かつ、移動速度に応じてシームレスにこれらの制御を移行させる研究はなされてこなかった。さらに、基本的に機構の動特性を直接利用してリミットサイクルを構成する高速走行・中速歩行での制御手法と、機構の詳細なモデルを用いた運動計画を必要とする低速歩行の制御手法は相容れないものとして対立してきた。

2. 研究の目的

(1) 我々はこれまで四脚ロボットを用いた中速歩行と高速走行について、エネルギー効率

と不整地での適応性を両立させる制御系の研究を個別に行ってきた。本研究では対象として機構設計の自由度が大きく制御が比較的簡単な四脚運動を考え、低速歩行を含めてこれらを統合することが出来る制御系の設計手法を明らかにする。

(2) 制御系には神経モデルを用いる。統合化された神経系は、上位から目標移動速度という指令を受けその活動レベルを変化させ、関節角度・接地・床反力などの体性感覚情報により筋骨格系のリズムに幅広く相互引き込みを起こす能力を持つ必要がある。特に低速歩行では、圧力中心感覚や前庭感覚を用いた姿勢反射・踏み出し反射が重要になる。筋骨格系では動特性、特に、定常運動での自己安定性や不整地適応時など過渡状態での応答性が重要であり、神経系は状況に応じて筋骨格系の剛性を調節することにより筋骨格系が移動速度や外部環境に応じて適切な動特性を持つようにする必要がある。

(3) さらに、このような移動速度に応じてシームレスに役割が変化する「機構+制御」系の挙動を調べることにより、機構と制御両面から運動知能の統一的な理解を試みる。

3. 研究の方法

(1) 低速・中速の四脚歩行については、脚式移動制御器を力学シミュレータに実装して、種々のパラメータを変えながら歩容生成のシミュレーションを行う。また、横方向に力が加わる場合の動歩行や不整地動歩行のシミュレーションを行い、外乱に対する安定化の機能を調べる。

(2) 高速四脚走行については、数値解析、力学シミュレーション、実機を用いて歩容生成と物理パラメータとの関係を調べる。

4. 研究成果

(1) 四脚歩行において姿勢制御とリズム運動制御と統合することが出来る汎用脚式移動制御器を設計し力学シミュレータに実装した。力学モデルのパラメータはネコの脚や胴体の寸法・質量などを参考にして決定した。

(2) 脚のピッチ面内リズム運動は、支持脚期から遊脚期への脚相遷移に脚負荷(leg loading/unloading)を用いた脚制御器(leg controller, LC)により生成される。脚負荷情報は対側脚間の負荷の移動、すなわち、ロール面内姿勢情報を含んでいるので、脚負荷情報に基づく脚相調節は、脚間の協調(歩容)を直接的なLC間結合なしで発生させることが出来るだけでなく、歩容調節を通してロール面内姿勢制御を行うことが出来る(図1)。

また、同一の手法で遊脚期間やデューティ比を変えることにより低速から中速の歩行を実現でき、かつ、四足動物に見られるような移動速度に応じた歩容の変化（低速で walk 歩容、中速で trot に近い歩容）が自律的に現れることを示した。

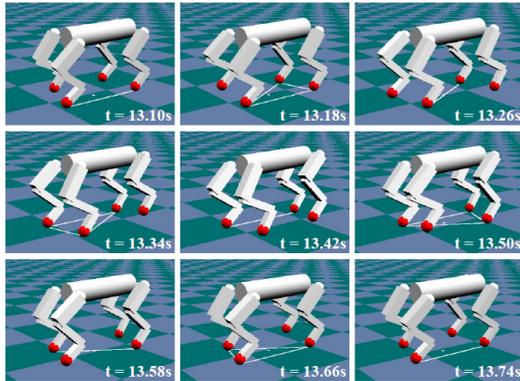


図1 歩容生成シミュレーション結果 (上)連続歩行スナップショット, (下) 四脚の支持脚相と遊脚相 (安定な walk 歩容が実現されていることが分かる.)

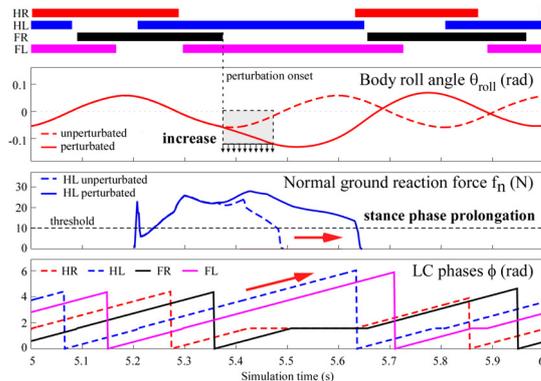


図2 横方向外乱に対する脚相調節と安定化 (右前脚 FR が遊脚になるとき左から右方向に 15N の外乱が加えられたが、脚負荷情報に基づく脚相調節により左後脚 HL と左前脚 FL の支持脚期間が延長され、安定な歩行が持続した.)

(3) 我々は、この制御器が横方向外乱に対して歩行安定化の能力をある程度持つこと (図2), ロール運動の振幅を減らす外乱に対しては同側脚間に上行の脚相調節機能が必要であることを示した。結果として、「支持脚期から遊脚期への脚相遷移に脚負荷を用いた LC」と「同側脚 LC 間の上行脚相調節機構」という簡単な運動生成・制御機構により、従来の手法では実現が困難であった「前庭感覚に基づく踏み出し反射を用いない長周期低速での不整地動歩行」が可能であることを示した (図3)。

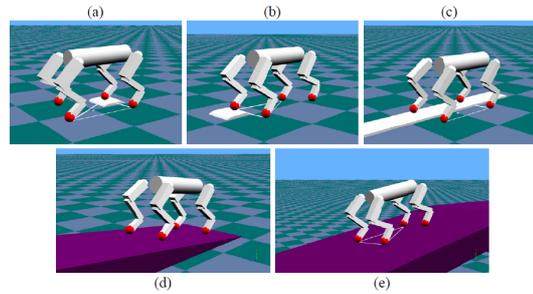


図3 不整地動歩行スナップショット

(4) すなわち、脚負荷情報を用いることにより、身体のダイナミクスと脚式移動の特徴を利用することが可能となり、歩容生成を含む脚のリズム運動制御と姿勢制御は統合された。

(5) また、四脚歩行の歩容生成においてはヒザ関節に取り付けられたバネ剛性の前後脚比や重心の幾何中心からの偏差など機構の持つ特性が重要であることを数値解析、力学シミュレーション、四脚ロボット実験 (図4) により示し、一周期に二回跳躍期があるフルバウンド歩行が現れる条件を簡単な関節 PD 制御との関係で明らかにした。さらに、リズム発生器とバネ・質量系の振動の相互引き込みを利用することにより、静止状態から走行状態への自励的な遷移や不整地自律適応が可能であることを示した。



図4 四脚歩行スナップショット

(6) これらの研究により、四脚歩行・走行制御手法の統合と機構と制御両面からの運動知能の統一的理解が実現できた。すなわち、従来別々に研究されてきた低速歩行での姿勢制御、中速歩行でのリズム制御、高速歩行でのバネ・質量系の自励振動生成を統合可能でかつ簡単な制御手法、および、機構設計指針を示すことができた。今後、現在製作中の四脚ロボットを用いて提案した手法の有効性を実証することにより、生物学とロボティクスの両方の四脚歩行・走行研究に大きなインパクトを与えることが可能であると考えている。

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6件)

(1) Y. Otoda, H. Kimura and K. Takase, Gait Adaptation Model in Human Split-Belt Treadmill Walking Using a Two-Dimensional

Biped Robot, *Advanced Robotics*, 23-5, 535-561, 2009, 査読有

(2) Z.G. Zhang and H. Kimura, Rush: a simple and autonomous quadruped running robot, *Journal of Systems and Control Engineering*, 223, 323-336, 2009, 査読有

(3) Y. Fukuoka and H. Kimura, Biomorphc Quadruped 'Tekken' Robot Using various Gaits: Walk, Trot, Free-Gait and Bound, *Applied Bionics and Biomechanics*, 6-1, 1-9, 2009, 査読有

(4) 福岡 泰宏, 木村 浩, 同一機構で歩行・走行する4脚ロボット, *日本機会学会論文集 C 編*, 75-750, 390-396, 2009, 査読有

(5) C. Maufroy, H. Kimura and K. Takase, Towards a general neural controller for quadrupedal locomotion, *NEURAL NETWORKS*, 21-4, 667-681, 2008, 査読有

(6) H. Kimura, Y. Fukuoka and A.H. Cohen, Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Natural Ground Based on Biological Concepts, *Int. Journal of Robotics Research*, 26-5, 475-490, 2007, 査読有

[学会発表] (計 12 件)

(1) C. Maufroy, H. Kimura and K. Takase, Stable Dynamic Walking of a Quadruped via Phase Modulations against Small Disturbances, *IEEE Robotics and Automation*, Kobe, 2009.05.16, 査読有

(2) Y. Otda, H. Kimura and K. Takase, Adaptive Walking of a 2D Biped Robot during Splitbelt Treadmill, *SICE Annual Conf.*, 2507-2512, Tokyo, 2008.08.21, 査読有

(3) T. Masuda, H. Kimura and K. Takase, Emergence of a Quadrupedal Bound Gait as Interaction among the Brain, *SICE Annual Conf.*, 2501-2506, Tokyo, 2008.08.21, 査読有

(4) C. Maufroy, H. Kimura and K. Takase, Towards a general neural controller for 3D quadrupedal locomotion, *SICE Annual Conf.*, 2495-2500, Tokyo, 2008.08.21, 査読有

(5) H. Kimura, Gait Adaptations of a 2D Biped Robot in Split-belt Treadmill Walking, *Locomotion Control Workshop*, Zurich, 2008.06.28, 査読無

(6) H. Kimura, Robotics as a Tool for Gait AND Posture Study, *4th Int. Symp. on Adaptive Motion of Animals and Machines*, Cleveland, 2008.06.04, 査読無

(7) C. Maufroy, H. Kimura and K. Takase, Biologically Inspired Neural Controller for Quadruped, *IEEE Robotics and Biomimetics*, 1212-1217, Sanya(China), 2007.12.17, 査読有

(8) T. Masuda and H. Kimura, Realization of Adaptive Running of a Quadruped Robot Using Delayed Feedback Control and Phase Resetting, *2nd Int. Symp. on Mobiligence*, 125-128, Awaji, 2007.07.20, 査読有

(9) Y. Otda and H. Kimura, Bipedal Walking Using Natural Dynamics and Delayed Stepping Reflex, *2nd Int. Symp. on Mobiligence*, 121-124, Awaji, 2007.07.20, 査読有

(10) C. Maufroy and H. Kimura, Towards a General Neural Controller for Quadrupedal Locomotion, *2nd Int. Symp. on Mobiligence*, 117-120, Awaji, 2007.07.20, 査読有

(11) H. Kimura, C. Maufroy and T. Masuda, Emergence of Quadrupedal Gaits as Interaction among the Brain, Body and Environment, *2nd Int. Symp. on Mobiligence*, 113-116, Awaji, 2007.07.20, 査読有

(12) Z.G. Zhang, T. Masuda, H. Kimura and K. Takase, Towards Realization of Adaptive Running of a Quadruped Robot Using Delayed Feedback Control, *IEEE Robotics and Automation*, 4325-4330, Roma, 2007.04.12, 査読有

[その他]

ホームページ

<http://robotics.mech.kit.ac.jp/research/Quadruped/general-quadrupedal-locomotion-controller-e.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 浩 (KIMURA HIROSHI)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授
研究者番号: 40192562

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者