

平成21年6月1日現在

研究種目： 基盤研究（A）
 研究期間： 2005 ～ 2008
 課題番号： 17206046
 研究課題名（和文） 二足歩行の力学体系 —解析・構築・展開—
 研究課題名（英文） Dynamics of Two-Legged Walking
 —Analysis, Structure and Advanced
 研究代表者
 大須賀 公一（OSUKA KOICHI）
 神戸大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：50191937

研究成果の概要：本研究では、受動的動歩行を中心に、二足歩行が本質的に持っている力学的歩行原理の解明を試みた。具体的には、受動的動歩行の歩行現象を力学的モデルで表現することで歩行の安定解析を理論的に検討し、さらにシミュレーションにより様々な歩行実験を実施した。それによって、歩行という動作には身体性が本来力学系として有している歩行能力が大変重要であることがわかってきた。最も大きな成果は歩行現象を非線形離散力学系として表現したとき、歩行安定性に重要な役割を果たすポアンカレ写像の中に安定化のフィードバック構造が含まれていることがわかってきた。さらに、成長する歩行ロボットが身体の成長に応じて歩容形態を適応的に変化させる能力も持っていることがわかってきた。以上のことから、身体性の力学が重要であることがみえてきた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	9,300,000	2,790,000	12,090,000
2006年度	9,000,000	2,700,000	11,700,000
2007年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
2008年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
年度			
総計	35,600,000	10,680,000	46,280,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：受動的動歩行, ダイナミクス, Implicit Feedback Structure

1. 研究開始当初の背景

二足歩行の研究は様々になされており、多くの二足歩行ロボットが開発されている。ところがそのほとんどが、ある意味で一つの極端な手法である ZMP 規範に基づく制御手法がとられており、もう一方の端点である受動的動歩行についての研究は圧倒的に少ない。生物の二足歩行の原理を含めて、歩行の原理を

理解するためには、研究が少ない受動的動歩行に関する研究をより深く行う必要がある。歩行に関する両極端の研究を完全に理解することで、その中間的な歩行を適応的に実施していると考えられる生物の歩行原理が理解できると考えている。図1にその様子を概念的に示す。図の左側が多くの歩行ロボットに関する研究で全身フルコントロール方式を表し、右側がアクチュエータを使わずに緩

やかな坂道を歩き下る受動的動歩行に関する研究を表している。

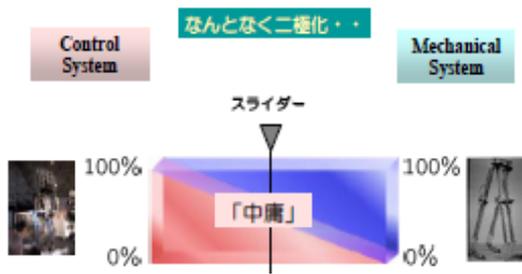


図1 歩行における二つの極端

2. 研究の目的

本研究の目標は、人類が長年の進化によって習得した「二足歩行」を力学的観点から理解することである。そして結果としてその知見を工学的に応用することを視野に入れる。すなわち、二足歩行の原理を、力学的法則に支配される物理空間における歩行主体の力学的運動として詳細に解析し、二足歩行の力学体系を構築することを目指す。さらに、その結果得られた歩行原理から創出される制御則を埋め込んだシステムを工学的に具現化することでその妥当性を示しつつ、実際のロボティックシステムや次世代義足などへの展開を考える。

3. 研究の方法

本研究では図2に示すように、理論構築→シミュレーション→実証実験→理論構築（修正）→シミュレーション（修正）→・・・というループを構成しながら最終目標である「二足歩行の力学大系」（歩行力学）を築き上げる。

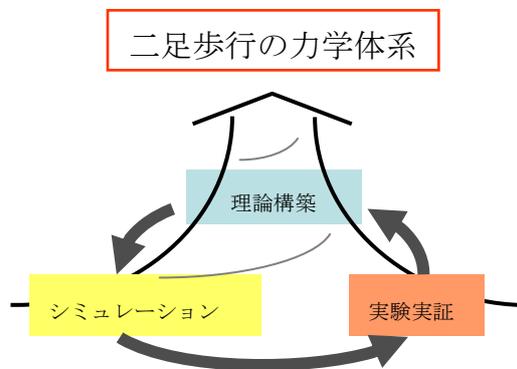


図2 本研究の遂行イメージ

そのために本研究では研究の柱として「A. 歩行理論基礎」、「B. 歩行シミュレーション」、「C. 歩行実験」をたてる。そして最終的には「D: 歩行力学大系」を構築する。研究代表者、研究分担者とこれらのテーマとの関係は大枠では次の通りである。

- A. 歩行理論基礎：大須賀,土屋,杉本
歩行現象を非線形力学的観点から捉え、離散力学系として表現することを基本とする。そのモデルを元に歩行現象の安定性を理論的に考察する。具体的にはポアンカレ写像の不動点の安定性解析問題へと帰着させる手法を開発する
- B. 歩行シミュレーション：土屋,細田
詳細な非線形シミュレータを構築し、理論検討で得られた知見を確認したり、予想問題を実施することで理解の補助とする。
- C. 歩行実験：細田,大須賀
理論やシミュレーションで得られた知見の有効性を実際のロボットで確認するために歩行ロボットの製作し実験を行う。その際、できるだけ受動的動歩行ロボットに近くなるように、空気圧アクチュエータを用いたロボットを製作する。
- D. 歩行力学大系：大須賀,細田,土屋,青井
A~C を統合化することで、歩行現象の中に隠れている力学的歩行原理を抽出し、二足歩行に関する力学体系を構築することを試みる。

4. 研究成果

生物の適応機能は、脳・身体・環境の巧みな連携によって実現されていることはよく知られている。このうち脳の働きが重要であることは明らかである。ただ、脳が単独で知能を構築している（進化してきた）とは考えがたい。その発達・進化の過程において、脳の器である身体および環境の存在が不可欠な意味を持っていることは想像に難くない。言い換えると、脳（あるいは生物、さらには複数個体による社会）の知能的機能は身体（あるいは有している能力）の上に構築されていると考えるのが自然であろう。そこでは身体自体がもつ力学的特性を脳は巧みに利用していると考えられる。

本研究では、受動的動歩行機械を題材に、身体がすでに力学系として埋め込んでいるいくつかの適応的機能（のように見える）について考察した結果を紹介する。

4.1 階層性

図3はマクリーンが提唱した脳の三層構造である。この図のように、脳が形式的に3層構造になっている（とは言ものの明確に境界がはっきりしているわけではないだろう）という提案に加えて、これまでの様々な研究から脳機能には以下のような特徴があるといわれている。

身体性：生物は力学的（物理的な動特性や化学的な反応特性）「身体」を有する。

層構造：脳は階層構造を有しており、上層脳は下層脳の存在を受けて存在している。最下層脳は身体の運動系と強い関係がある。

委譲性：上層脳は下層脳で処理できるものはできるだけ下層脳に任せようとする傾向がある。

以上の考察から、生物は「何らかの階層的構造をもったものである」と考えられる。Fig.2参照。

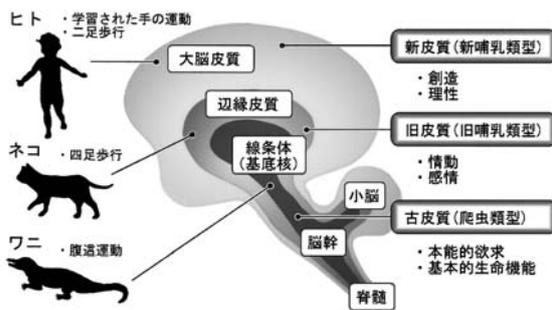


図3 脳の構造

ここで、図4において、中間層における階層性は考えやすいが、最も重要なのはその上下端である。すなわち、階層構造を下に下がっていった先は何にあたるのか、ということ、逆に上に登って行った時に何に当たるのかを適切に抑えなくてはならない。

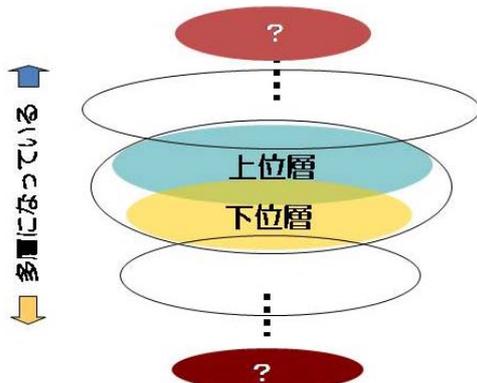


図4 知能の階層性

まず、最下層についてであるが、図4の多層構造を下に降りてゆくと「身体」にたどり着く。すなわち、身体が持っている力学的特性を開始点として考えなくてはならないことがわかる。これについては受動的動歩行という研究分野があり、そこで身体が持っている受動的適応機能が少しずつ明らかにされてきている。ここで注意すべきことは、先に考えたように、上層部が下層部をみたとき、下層部には何らかの安定な適応能力が備わっているように見ているという点である。これは最下層においても同様であるはずで、実際、単なる脳の器としての身体という意味以上に能力があることがしられてきた。すなわち、最下層は「力学」を起点とするという考えである。

次に、最上層であるが、これは脳の中のさらに最上位層の議論になる。最上層については、生き物が持っている様々な適応能力を引き出すためには逆に構造的ではなく、非構造的になっているのではないかと類推される。このあたりの研究は脳科学などでも多く研究されており、カオスなどと関連をつけて現在進行中である。

4.2 受動的動歩行が持つ能力について

前節の考察を裏付ける状況証拠として、1930年代に行われた「除脳ネコ」の実験がある(図5)。このネコは脳が除去されており、トレッドミルの上に置かれている。その状態でトレッドミルをゆっくり動かすと、このネコはウォークで歩行を開始する。そして、トレッドミルの速度を徐々に上げてゆくとトロットになる。さらに速度を上げてゆくとギャロップに遷移する。

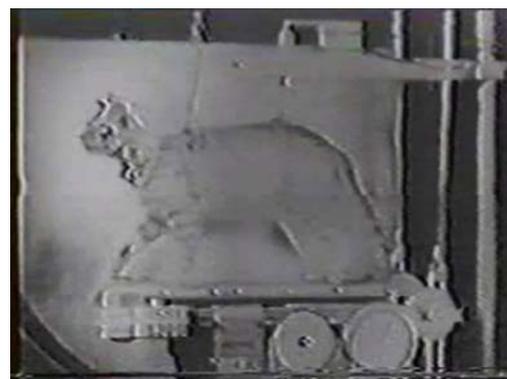


図5 除能ネコ

脳が除去されているネコがなぜ外的要因の変化に応じて歩行パターンを変化させるのかは未だに完全には解明されていない。一つの説として、残留神経系にCPG(central pattern generator)が埋め込まれており、外的要

図によってその発生パターンが変化する、というものがある。

しかしながら近年、筆者らは4脚受動的動歩行(図6)において傾斜角の変化に応じて歩行パターンが変化することを確認しつつある。

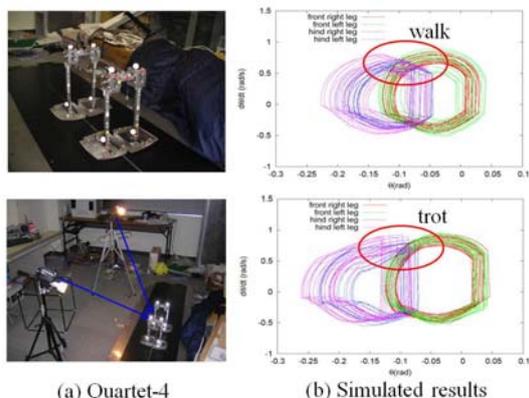


図6 4脚受動的動歩行

図6の(a)は4脚受動的動歩行機械である。また(b)は4脚受動的動歩行機械が傾斜角が緩い傾斜面から歩き始めて徐々に傾斜角を大きくしていったときの脚の位相線図を表している(シミュレーション)。本図は、4脚受動的動歩行機械が傾斜角度に応じて歩行パターンを遷移する能力を持っていることを示唆している。

本結果は、「除脳ネコの歩行パターンの遷移は、必ずしもCPGなどの神経系が必要不可欠であるとは限らない、すなわち、身体自体にその能力が内在している」ことを示唆していると言えよう。

4.3 まとめ

本研究では、生物の知能は階層的になっており、その最下層は身体であることに注目し、身体自体にその基本的な適応能力が内在されていることを4脚受動的動歩行の存在を示すことで考察した。

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) M.Iribe, K.Osuka : A Designing Method of the Passive Dynamic Walking Robot via Analogy with the Phase Locked Loop Circuits, Bioinspiration and Robotics - Walking and Climbing Robots-, Eds.: M. K.Habib", pp.79-94, 2007, Refereed
- 2) M.Iribe, K.Osuka : Design of the Passive

Dynamic Walking Robot by Applying its Dynamic Properties, Journal of Robotics and Mechatronics, 19, 4, pp.402-408, 2007, Refereed

- 3) 衣笠, 大須賀, 三輪 : 膝の伸縮と胴体の姿勢制御による2足歩行と周波数応答解析, 日本ロボット学会誌, 25, 3, pp.116-123, 2007, 査読有
- 4) 杉本, 大須賀, 杉江 : 連続型遅延フィードバック制御に基づく脚ロボットの準受動的歩行安定化制御, 日本ロボット学会誌, 23, 4, pp.53-60, 2005, 査読有

[学会発表] (計 6 件)

- 1) K.Osuka : On Passive Adaptive Mechanism in Passive Dynamic Walking Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems 2007, PP.2683-2686, October 17-20, 2007, Seoul, Korea
- 2) K.Osuka, M.Iribe, Y.Sugimoto : Adaptive Function Embedded in Passive Dynamic Walking" "Proceedings of the International WORKSHOP on MOBILIGENCE, April 3-5, 2007, University of Padua, Italy
- 3) K.Osuka, M.Iribe, Y.Sugimoto : On Passive Adaptive Mechanism in Passive Dynamic Walking, Proceedings of the International Conference on Morphological Computation, session27-2, March 26-28, 2007, Venice, Italy
- 4) M.Iribe, K.Osuka : A designing method of the passive dynamic walking robot via analogy with the Phase Locked Loop circuits Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2006), C D, December 17-20, 2006, Kunming, China
- 5) M.Iribe, K.Osuka : Analysis and stabilization of the passive walking robot via analogy with the Phase Locked Loop circuits Proceedings of the IEEE-RAS/RSJ International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2006), C D, December 4-6, 2006, Genova, Italy
- 6) M.Iribe, K.Osuka : Analogy between Passive walking robot and Phase Locked Loop circuit, Proceedings of the SICE-ICASE International Joint Conference 2006 (SICE-ICCAS 2006), C D, October 18-21, 2006, Busan, Korea

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
大須賀 公一 (OSUKA KOICHI)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号 : 5 0 1 9 1 9 3 7
- (2) 研究分担者

細田 耕 (HOSODA KO)
大阪大学・工学研究科・准教授
研究者番号：10252610
土屋 和雄 (TSUCHIYA KAZUO)
京都大学・名誉教授
研究者番号：70227429
杉本 靖博 (SUGIMOTO YASUHIRO)
神戸大学・大学院工学研究科・
非常勤講師
研究者番号：70402972
青井 伸也 (AOI SHINYA)
京都大学・工学研究科・助教
研究者番号：60432366