

平成 21 年 4 月 13 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18760167

研究課題名（和文） 受動的歩行の運動解析およびその応用

研究課題名（英文） Motion analysis and application of Passive Dynamic Walking

研究代表者

杉本 靖博(SUGIMOTO YASUHIRO)

神戸大学・工学研究科・非常勤講師

研究者番号：70402972

研究成果の概要：受動的歩行の本質や動作原理を探り、受動的歩行という現象を力学的観点から理解することを目指し、本研究では特に、受動的歩行に見られる興味深い現象の一つである歩行周期の分岐現象に特に着目して解析を行ない、二周期歩行においても、一歩行周期と同様な安定化構造があることを示した。また二脚だけではなく四脚以上の受動的歩行ロボットが実現可能やそれが非常に興味深い現象を示すこと明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,100,000	0	1,100,000
2007 年度	1,100,000	0	1,100,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	240,000	3,240,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械力学・制御

キーワード：受動的歩行，安定解析，ロボット工学

1. 研究開始当初の背景

(1) 受動的歩行について

ホンダの二足歩行ロボットの発表を契機として、様々な歩行ロボットの研究がなされてきているが、近年そうした歩行ロボットの研究において T. McGeer により提案された Passive Dynamic Walking (受動的歩行) が着目されている。この運動の特徴として、平坦な路面を歩くだけの運動ならば制御をしなくてもロボットのダイナミクスだけで実現可能なことを示している点や、また振り子

のように前方に倒れこむ動作を繰り返し行なうことで巧みに重力場を利用し高いエネルギー効率を得ている点が挙げられる。これらのことから受動的歩行の解析と応用を研究することで、ロボットの高効率かつ滑らかな歩行の実現が期待されている。そこで、McGeer により受動的歩行に関して実験的にその実現可能性を示されて以来、様々な研究がなされてきた。特に、受動的歩行の実際の歩容設計への応用に関する研究は数多くなされている。ところが、これまでの多くの研究では受動的歩行の表層的な現象にのみが

着目されており、ロボットのダイナミクス自身が歩容を生成するという受動的歩行の本質は十分利用されていない。

(2) 受動的歩行の力学的原理解明

以上で述べたような状況が起こる大きな原因は、そもそも受動的歩行という安定な現象が起こることはよく知られているものの、その現象の力学的原理が解明されていない、つまり、「何故この現象が安定になるのか?」という疑問に十分答えられていないことにある。受動的歩行の運動解析、安定解析に関する研究もその応用に関するものと同様に数多くなされているが、対象とするロボットが非常に簡単なものであっても、状態のジャンプを含むある種のハイブリットシステムとなるため、これまでの研究では歩行運動に関するリミットサイクルやポアンカレマップが解析的な扱いをされることはほとんどなく、数値的な安定性の議論に終始していた。

2. 研究の目的

本研究では1で述べたような状況を打破すべく、受動的歩行の本質、動作原理を探り、受動的歩行という現象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ものである。特に、本研究では、受動的歩行に見られる興味深い現象の一つである歩行周期の分岐現象に特に着目して解析を行なうことで、上記目的の達成を目指すものである。本研究では、受動的歩行に見られる一現象である分岐現象の解明を進めることで、受動的歩行全体の原理解明を進めようとするものであり、他に例を見ない独創的な研究である。

3. 研究の方法

(1) 研究代表者は、受動的歩行の動作原理を解析的に探るため、対象を非常に簡単なモデルと限定し、さらに運動方程式を線形化することで、状態のジャンプを有するシステムとなる受動的歩行の解析的な運動解析を行ってきた。その中、歩行ロボットの遊脚が地面に着地する瞬間のロボットの状態（これを衝突点と定義）に特に着目し、その衝突点から次の衝突点への状態遷移写像（ポアンカレマップ）を解析的に導出し、さらにそのポアンカレマップ内にフィードバック構造があることを見出してきた（図1参照）。このことは受動的歩行の安定性を語る上で非常に興味深い結果といえるが、フィードバック構造内部の各要素に関する考察が現状では

未だ不十分であるため、それらを明確にすることから研究を行なう。

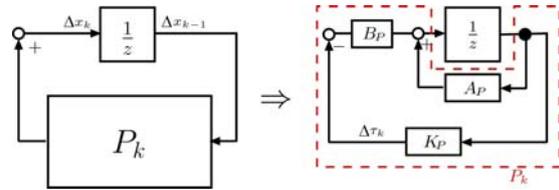


図1 ポアンカレマップ内の構造

(2) また、本研究では2で述べたように受動的歩行の歩行周期の分岐現象にも着目する。分岐現象は受動的歩行に見られる興味深い現象の一つで、ロボットの物理パラメータや斜面の傾斜角を変化させると、それまで一歩行周期で運動していたロボットが二歩行周期、四歩行周期…へとその歩容が変化する現象をいう。しかしながら、シミュレーションや実験によってこうした現象が起こることが確認されているものの、受動的歩行の安定原理同様、なぜそうした現象が起こるかは全く解明されていない。そこで、(1)で述べたようなこれまで用いてきた手法を拡張することで、一歩行周期のポアンカレマップとの比較を行ないながら多歩行周期の運動解析を行うことで「何故歩行周期の分岐が起こるのか」の解明を目指す。

4. 研究成果

(1) 2周期受動的歩行歩行の解析

3で述べたように研究代表者は、これまでに近似的ではあるが解析的なポアンカレマップを導き、そのポアンカレマップ内にフィードバック構造があることを見出してきたが、一歩行周期に対するポアンカレマップだけでなく、二歩行周期運動をしている場合においても、一周期歩行と同様に衝突点に着目して解析的なポアンカレマップの導出を行い、それをを用いた安定解析が可能であることを示した（図2参照）。

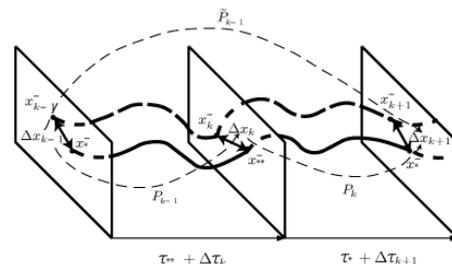


図2 二周期歩行のポアンカレマップ

また、上記で導出した二周期歩行対応のポアンカレマップにおいても一周期歩行対応のポアンカレマップと同様に、フィードバック構造が見いだせることを示した (図3参照).

このことは、一周期歩行の場合と同様に、二周期歩行においてもそのシステム内に自己安定性が内在されていること示す非常に興味深い結果である.

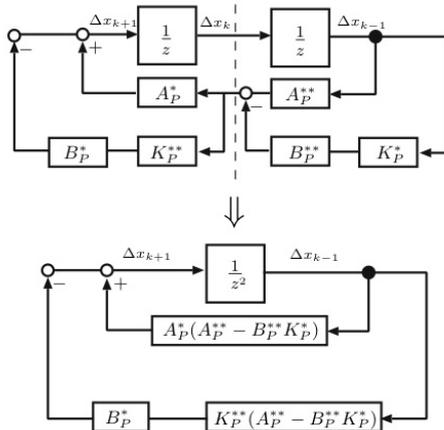


図3 二周期受動的歩行のポアンカレマップ内のフィードバック構造

さらに、四歩行周期以上についても同様なポアンカレマップが求めることが出来る可能性を示し、受動的歩行のシステム内に、自己安定性と強い関係にあるフィードバック構造が階層的に存在しており、環境やロボットの物理パラメーターに応じてもっとも適当なものが選択されている構造が存在している可能性について議論を行った (図4参照).

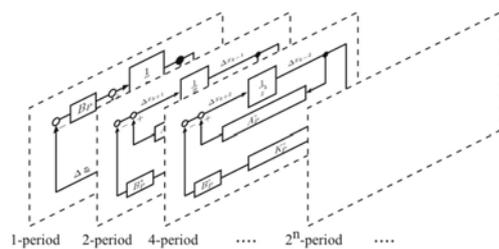


図4 フィードバック構造の階層構造

(2) 多脚型受動的歩行

また、これまでは受動的歩行は二脚のロボットのみにおいて確認されていた現象であったが、それを四脚や六脚に拡張したロボットにおいても安定な受動的歩行が起きること

をシミュレーション及び実機 Quartet-IV (図5) にて確認した.

犬や馬などの動物では歩行速度に応じて walk, trot, pace 等、歩容が変化することがよく知られている. この歩行速度によって歩容が変化することは一種の分岐現象ともいえるが、歩行シミュレーション上や実験機 Quartet-IV にて、四脚の受動的歩行においても胴体の剛性や坂道の傾斜角により歩容が変化することを示した (図6).

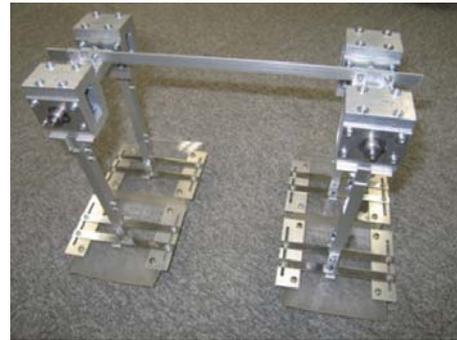


図5 実験機 Quartet-IV

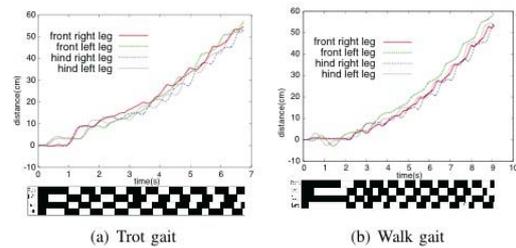


図6 四脚受動的歩行ロボットにおける Walk 歩容と Trot 歩容

このような歩行速度に依存した歩容の変化は、脳が削除された除脳ネコにおいても、確認されていることから、比較的低レベルの神経系と筋骨格系のカップリングにて引き起こされていると考えられるが、骨格系だけから構成される受動的同胞ロボットにおいても同様の歩容の変化が起こることを示したこの結果は、(歩行)運動の安定性に対して、制御系となる神経系だけではなく、制御対象となる骨格系が持つ自己安定性が強く影響を及ぼしていることを示すものであり、非常に興味深く意義深い結果であるといえる.

さらに、もっと多脚の場合 (最大 20 脚) においても受動的歩行が実現出来ることを示した. これは、人を含む哺乳類だけではなく、

昆虫のようなサイズの小さい生物の歩容においても、受動的歩行が示唆する骨格系を持つ歩容に対する自己安定性が、安定な運動の生成に重要な意味を持つ可能性を示唆するものである。

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 3 件)

1. Kazuhiko Nakatani, Yasuhiro Sugimoto, Koichi Osuka: "Demonstration and Analysis of Quadrupedal Passive Dynamic Walking", *Advanced Robotics*, Vol.23, No.5, pp. 483-501, 2009 (査読有り)

2. Yasuhiro Sugimoto and Koichi Osuka: "Hierarchical Implicit Feedback Structure in Passive Dynamic Walking", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.20, No.4, pp. 559-566, 2008 (査読有り)

3. 平田健太郎, 大須賀公一, 杉本靖博: "むだ時間系の安定解析再訪-受動歩行の遅延フィードバック制御まで-", 計測と制御, vol.45, No.4, pp.376-380, 2006 (解説論文)

[学会発表] (計 7 件)

1. Yasuhiro Sugimoto, Kazuhiro Nakatani, Koichi Osuka: "Motion Analysis of Quadrupedal Passive Dynamic Walking", *Dynamic Walking 2009*, Vancouver, Canada, 2009, 8-10 June (発表予定)

2. 吉岡秀隆, 杉本靖博, 大須賀 公一: "超多脚型受動的歩行ロボットの実現に関する研究", ロボティクスメカトロニクス講演会 2009 (Robomec 2009), 福岡, 2009, 24~26 May (発表予定)

3. 中谷和弘, 大須賀公一, 杉本靖博, 赤澤智昭: "四脚受動的歩行の存在証明と歩容解析", 第 13 回ロボティクスシンポジウム, 香川, 2008, 3月16~17日

4. Yasuhiro Sugimoto, Koichi Osuka: "Hierarchical Implicit Feedback Structure in Passive Dynamic Walking", *Proc. of 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2007)*, San Diego, USA, 2007, 29 October.

5. Koichi Osuka, Yasuhiro Sugimoto, Tomohiro Akazawa, and Kazuhiko Nakatani: "On Multi-legged Passive Dynamic Walking", *Proc. of 2nd International Symposium on Mobiligence*, Awaji, Japan, 2007, 18-20 July.

6. Koichi Osuka, Masatsugu Iribe, Yasuhiro Sugimoto: "On Passive Adaptive Mechanism in Passive Dynamic Walking", *Proc. of International conference on Morphological Computation*, Venice, Italy, 2007, 19 March.

7. Yasuhiro Sugimoto, Koichi Osuka: "Implicit Feedback Structure in Passive Dynamic Walking", *Dynamic Walking 2006 Workshop*, Ann Arbor University, USA, 2006, 6~8 May.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉本 靖博(SUGIMOTO YASUHIRO)
神戸大学・工学研究科・非常勤講師
研究者番号: 70402972

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し