

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 28 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870337

研究課題名(和文) 脊椎構造の機械的特性が生み出す歩容の多様性の実験的数理的解析

研究課題名(英文) Experimental and mathematical analysis of the diversity of the gait generated by the mechanical properties of the spinal structure

研究代表者

杉本 靖博 (Sugimoto, Yasuhiro)

大阪大学・工学研究科 ・准教授

研究者番号：70402972

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、多様な歩容発現に脊椎構造が持つ特性が果たす役割について実験的数理的に明らかにすることを目的し、四脚以上で脊椎構造を模した胴体を有する多脚型受動的動歩行ロボットの実現とその運動の理論的解析を行ってきた。その結果、胴体部分のヨー方向の自由度が重要であること、機構の非対称性が歩容を変化させることなどを明らかにした。さらに、脊椎の様に胴体部分に複数の自由度や粘弾性を持たせた歩行ロボットを揺動励振し歩行を実現させた。その結果、胴体部分に与えた自由度や粘弾性によって機体の共振特性が変化し、実現される歩容が変化することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this research, in order to clarify the role played by the spinal structure on diversified gait development experimentally and mathematically, we developed a multi-legged passive dynamic walking robot with a trunk emulating a spinal structure and four or more legs and carried out the theoretical analysis of the realized robot's walking. As a result, we found that the degree of freedom in the yaw direction of the trunk part was important, and the asymmetry of the mechanism of the walking robot changed the gait. Moreover, we also developed the walking robot with multiple degrees of freedom and viscoelasticity like the spine and realized a level walking by exciting a rocking motion. Then, we clarified that the resonance characteristics of the robot was changed due to the degree of freedom given to the trunk part and viscoelasticity, and the change caused the diversity of the gait.

研究分野：脚歩行ロボット

キーワード：受動的動歩行 脊椎構造 歩容

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 研究背景

脚式移動は多くの人々の興味を惹き、ロボティクスの分野では様々な研究がなされてきた。ホンダの ASIMO や産総研の HRP シリーズの発表以降、二脚歩行を対象とした研究が隆盛を極めているが、その一方でイヌやウマなどの大型哺乳類を意識した四脚歩行の研究や、昆虫等を意識した六脚や八脚歩行の研究も少なからず存在する。そういった四脚以上の歩行（本研究では、二脚歩行と区別するため「多脚歩行」と呼ぶ）の研究において、しばしば取り上げられるキーワードの一つが「歩容（歩行パターン）」である。多脚を持つ生物が、ウォークやトロット、ペース、バウンズなど多様な歩容を示すことは古くから知られているが、様々な研究により、環境や歩行スピード等に応じて歩容が巧みに切り替えられていることが明らかになってきた。この生物が見せる歩容の適応的選択・遷移は非常に興味深く、適応メカニズムの解明やより高効率で適応的な脚歩行ロボット実現に活かそうとする研究が、理学・工学の両面からなされるようになってきた。

### (2) 申請者の先行研究

本研究の着想の原点は、歩行ロボットの研究において近年着目されている受動的動歩行である。受動的動歩行は、アクチュエータを持たないロボットが、重力場をうまく利用しながら下り坂を歩き続ける運動のことである。この運動が示唆することは、自身のダイナミクスをうまく利用することで歩行の実現を可能にする特性を、歩行ロボットの機構自身が有しているということである。そのことから申請者は、「歩容の適応的選択・遷移に対しても、骨格系機構系自身が持つ特性が重要な役割を果たしているのでは？」という仮説に至った。そして「制御系を持たず機構系のみから構成される多脚の受動的動歩行により、多様な歩容が実現できるか？」という疑問をまず持った。

そこで申請者は、数値シミュレーション及び実機にて、4脚から最大で20脚を持つ多脚型受動的動歩行の検証を行ってきた。その結果、多脚型受動的動歩行がそもそも実現可能であること、そして、前脚と後脚を繋ぐ胴体、つまり生物では脊椎に相当する部分が持つ自由度を変化させることで、異なる歩容が発現することを確認してきた[引用文献 1,2]。

この結果は、制御をしなくても機構系の特性だけで歩容の適応的選択・遷移を引き起こせることを示す非常に意義あるものである。しかし、これまでの研究では多脚型受動的動歩行により発現する歩容は非常に限られたものであった。その大きな原因は、ロボットが持つ自由度が少ない、特に前脚と後脚を繋ぐ脊椎部分に与えた自由度が限定的であったことと、脊椎部分が持つ自由度に粘弾性特性を与えていなかったことにあると申請者は考え

ている。

## 2. 研究の目的

前項で述べた背景及び先行研究を受け、申請者は、生物が持つ脊椎と同様に、十分に複雑な自由度と、様々な剛性や粘弾性特性を持つような脊椎構造をロボットに持たせることで、より多様な歩容を発現させることができるのでは？そして、脊椎構造を含む骨格系機構系自身が持つ特性が多様な歩容発現にどのように寄与しているのかを数理的に明確にすることで、歩容の適応的選択・遷移機能解明に対して、新しい視座を与えることができるのではないかと考えるに至った。

そこで本研究では、多様な歩容発現に脊椎構造が持つ特性が果たす役割について実験的・数理的に明らかにすることを目的とする。機構系の特性に焦点を当てた解析を行うために、本研究では四脚以上による多脚型受動的動歩行に着目し、脊椎構造を持つ多脚型受動的動歩行ロボットの実現とその運動の理論的解析を通じてその目的の達成を目指す。

## 3. 研究の方法

### (1) 全体構想

本研究ではまず、脊椎構造を持つ多脚型受動的動歩行ロボットを作成し歩行実験を行う。ただし、生物の脊椎を単純に模倣した脊椎構造を作成するのではなく、脊椎構造が持つ様々な自由度や粘弾性といった機械的特性を取り出し、それらを細かく調整できる機構を作成する。そして、どの様な歩容が実際に発現するか、また脊椎構造が持つどういった特性が歩容に影響を与えるのかを実験的に検証する。次に、脊椎構造を持つ多脚型受動的動歩行ロボットの数理モデルを構築し実験結果を再現するとともに、構築したモデルの制御理論・力学系理論を用いた数理的解析を行う。最後に、数理的解析を通じて得られた結果に基づく歩行ロボットを作成し、理論解析の妥当性を検証する。それらを通じて、本研究の目標である「多様な歩容発現に脊椎構造が持つ機械的特性が果たす役割について実験的・数理的に明らかにする」ことを達成する。

### (2) 遂行する上での工夫

本研究で重要となる脊椎構造の設計だが、よく知られているように生物の脊椎構造は非常に複雑な構造をしており、それをそのまま模倣したものを設計することは容易ではない。さらに複雑な構造なままでは、モデル化することも数理的解析を行って重要な特性を抜き出すことも非常に困難となる。そこで本研究では、生物の脊椎を参考にはするものの、それらを単純に模倣した脊椎構造を作成することはない。

モデル構築や理論解析を容易にするためにも、脊椎構造が持つ機械的特性で重要と考えられる以下二点にまず着目する。

- ・ 進行方向に対してピッチ，ロール，ヨーの3自由度を持つ
- ・ それぞれの自由度に対して独立に剛性や粘弾性を持つ

そしてそれらの特性が陽に現れ，かつ細かくそれぞれの剛性や粘弾性を調整できる，比較的単純な構造をしたプロトタイプを作成する(図1)．そのプロトタイプを用いて歩行実験を行いながら順次改良していくことで，脊椎構造を持つ重要な機械的特性を明らかにしていく．

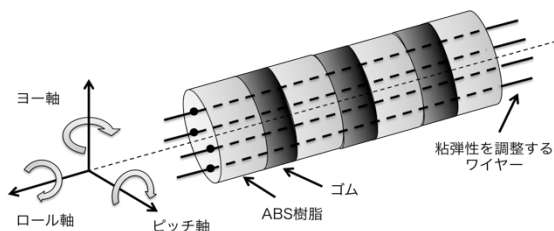


図1 脊椎構造のプロトタイプ

#### 4. 研究成果

##### (1) 脊椎構造が歩容に及ぼす影響の解析

多様な歩容発現に脊椎構造を持つ特性が果たす役割について実験的・数理的に明らかにするとした本研究の目的の達成に向けて，脊椎構造を持つ多脚型受動的動歩行ロボットを作成し歩行実験を行い，その運動解析を行ってきた．特に，重要な鍵となる脊椎構造部分に関しては，ヨー方向には曲がりやすくピッチ方向には曲がりにくく，さらにロール方向に関しては一定角度までの自由な回転が可能な胴体(図2)や，各自由度に対してばねを取り付け，ばねの張り方およびばねの種類を変えることによって復元特性を独立に調整することが可能な胴体(図3)など，脊椎構造を持つ様々な自由度や粘弾性といった機械的特性を取り出し，それらを細かく調整できる機構を複数種類作成して歩行実験を行ってきた．その結果，脊椎構造を持つ特性が実現される歩容に様々な影響を与えることが明らかになってきた．特に大きな結果としては，ヨー方向の自由度が重要であること，また，ヨー方向の自由度を入れることで，歩行速度が向上する一方で歩行の安定性が落ちるといった



図1 脊椎構造を模した胴体を持つ四脚受動的動歩行ロボット

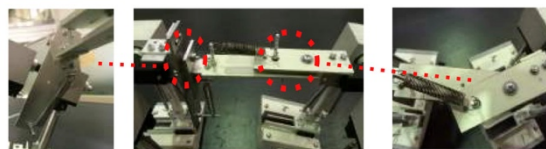


図3 復元特性を独立に調整することが可能な胴体

トレードオフの関係があることを見いだした(学会発表①)．また，脊椎構造に加え脚に非対称構造を加えることで，歩容に様々な変化を生み出すことも明らかにした(学会発表③)．

また，それまでの成果を受けて，脊椎構造にアクチュエータを埋め込み，それによって歩行を実現させようとする歩行ロボットも作成し歩行実験を行ってきた(図4)．その結果，脊椎構造にて駆動する場合，身体構造によって歩容が異なること，そして，その変化の様子は，生物に類似していることを示唆する結果を得られた(学会発表④⑨)．



図4 胴体駆動型歩行ロボット

さらに，ロボットにアクチュエータを搭載し少しのエネルギー印加を行うことで平地での歩行が実現可能な歩行ロボットも作成し，より多様な歩容を生み出すとともに，制御系と脊椎構造との相互作用について解析を行ってきた．特に，非常にシンプルかつ各脚の物理的連関が重要な鍵となる脚の制御法[引用文献3]を採用することで，脊椎構造が歩容に与える影響を解析し，特に低速域より中速域でその影響が顕著になることを示唆する結果を得た(学会発表⑪⑬)．

##### (2) 揺動運動に着目した運動解析

一方，対象としている受動的歩行が揺動を強く利用した歩行であるため，揺動による四脚受動的動歩行に関する理論解析もすすめてきた．その中で，まず胴体構造にロール方向自由度のみをもつロボットを作成し(図5)，揺動を励振することで平地歩行を実現する四脚準受動的動歩行に対し，非線形振動子を用いた制御方策についての提案も行ってきた．この成果は，国際学会にて発表を行った後に(学会発表②)，成果を再度まとめて論文誌に投稿し採択された(雑誌論文①)．

さらに，より詳細な運動解析を行うために

新たな歩行ロボット Duke2 を作成し、歩行実験を行った(図6)(学会発表⑤⑥)。このロボットでは、脊椎(胴体)部分に、ロール方向自由度だけでなく複数の自由度や粘弾性を持たせることができる構造となっている、それを用いた結果としては、まず2つの周期入力有位相差にも関わらず、入力の振幅を大きくすると歩容が変化することを見いだした。(学会発表⑧)。さらに、脊椎構造が歩容におよぼす影響について、機体の振動特性の観点から解析を行った。その結果、前後の揺動励振の位相差を変えると歩行速度が変化するが、脊椎部分に与えた自由度や粘弾性によって、ピークの現れ方が大きく変化すること、またそれらは機体の共振特性が変化することによって引き起こされることを明らかにした(学会発表⑩)。

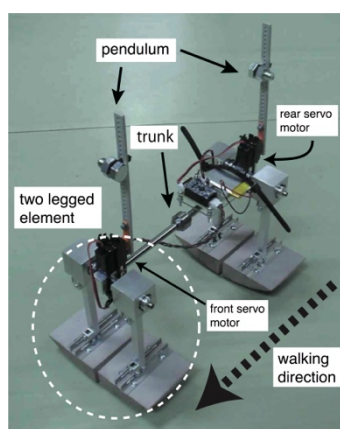


図5 四脚準受動的動歩行ロボット Duke

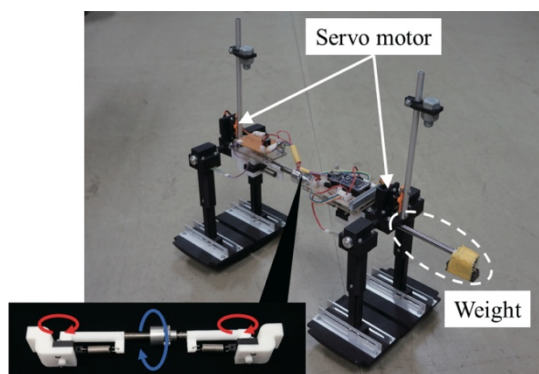


図6 四脚準受動的動歩行ロボット Duke2

<引用文献>

1. Y. Sugimoto, H. Yoshioka, K. Osuka, "Development of Super-multi-legged Passive Dynamic Walking Robot Jenkka-III", Proc. of SICE Annual Conference, pp. 576-579, 2011.
2. K. Nakatani, Y. Sugimoto, K. Osuka: "Demonstration and Analysis of Quadrupedal Passive Dynamic Walking", Advanced Robotics, vol. 23, No. 5, pp. 483-501, 2009.

3. D. Owaki, T. Kano, K. Nagasawa, A. Tero and A. Ishiguro, Simple Robot Suggests Physical Interlimb Communication Is Essential for Quadruped Walking, J. of The Royal Society Interface, Vol.10, No. 78, p. 20120669, 2013.

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1件)

① Yasuhiro Sugimoto, Takeshi Kibayashi, Masato Ishikawa and Koichi Osuka, Nonlinear Control by Coupled Oscillator: from Nonholonomic Systems to Quasi-Passive Dynamic Walker, Nonlinear Theory and Its Applications, Vol.E6-N, No. 4, pp. 475-487, 2015 (査読有)

DOI: <http://doi.org/10.1587/nolta.6.475>

[学会発表] (計13件)

① Yuji Kito, Yuichiro Sueoka, Daisuke Nakanishi, Yasuhiro Sugimoto, Masato Ishikawa, Wada Teruyo and Koichi Osuka, Quadruped passive dynamic walking robot with a new trunk structure inspired by spine, Dynamic Walking 2014, 2014/6/14, Zurich(Switzerland).

② Yasuhiro Sugimoto, Takeshi Kibayashi, Masato Ishikawa, Koichi Osuka, Nonlinear Control by Coupled Oscillator: from Nonholonomic Systems to Quasi-Passive Dynamic Walker, 2014 Int'l. Symp. on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2014), pp. 288-291, 2014/9/16, Luzern(Switzerland) (査読有)

③ Yuji Kito, Yuichiro Sueoka, Yasuhiro Sugimoto, Koichi Osuka, Quadruped passive dynamic walking robot with a spinal-like trunk and asymmetric leg structure, AMAM2015, pp. 288-291, 2015/6/22, Boston(USA).

④ 紀藤優治, 末岡裕一郎, 中西大輔, 杉本靖博, 石川将人, 大須賀公一, 4脚受動的動歩行ロボットの胴体関節の位置と剛性の影響の解析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会(ROBOMECH2015), 2P1-T07, 2015/5/19, 京都市勧業館「みやこめっせ」(京都府・京都市)

⑤ 岡本貴樹, 杉本靖博, 末岡裕一郎, 大須賀公一, 四脚準受動的動歩行機“Duke-II”の開発と歩行解析, 平成27年度計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会, pp. 105-107, 2016/1/8, 銀杏会館

(大阪府・吹田市)

⑥岡本貴樹, 杉本靖博, 末岡裕一郎, 大須賀公一, 四脚準受動的動歩行機”Duke-II”における歩容遷移の実験的検証, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH2016), 2016/6/9, パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市)

⑦杉本靖博, 紀藤優治, 岡本貴樹, 末岡裕一郎, 大須賀公一, 多脚歩行のための駆動胴体の設計とその歩行の解析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH2016), 2016/6/9, パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市)

⑧ Takaki Okamoto, Yasuhiro Sugimoto, Yuichiro Sueoka and Koichi Osuka, Analyses of Gait Transition in Quasi-Passive Dynamic Walking Locomotion, 19th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2016), pp. 412-420, 2016/9/13 London (UK) (査読有)

⑨ Yasuhiro Sugimoto, Yuji Kito, Yuichiro Sueoka and Koichi Osuka, Gait Analysis of 6-legged Robot with Actuator-equipped Trunk and Insect Inspired Body Structure, 5th International Conference Living Machines 2016, pp.526-531, 2016/7/20, Edinburgh (UK) (査読有)

⑩佐々木基, 杉本靖博, 大須賀公一, 末岡裕一郎, 準受動動歩行機”Hexapod-Duke”の歩行解析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH2017), 2017/5/11, ビックパレットふくしま (福島県・郡山市).

⑪濱元雅大, 杉本靖博, 末岡裕一郎, 大須賀公一, 胴体構造に着目した四脚歩行ロボットの歩容の解析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH2017), 2017/5/11, ビックパレットふくしま (福島県・郡山市).

⑫ Yasuhiro Sugimoto, Takaki Okamoto and Koichi Osuka, Walking Analysis of Quadruped Quasi-Passive Dynamic Walking Robot ” Duke-II” Focusing on Trunk Structure, CLAWAR2017, 2017, Porto (Portugal) (accepted) (査読有)

⑬ Yasuhiro Sugimoto, Suzuka Kondo, and Koichi Osuka, Analysis of the influence of the joint position of the trunk on gaits of a quadruped robot, AMAM2017, Sapporo (JAPAN), 2017 (accepted) (査読有)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉本 靖博 (SUGIMOTO Yasuhiro)  
大阪大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 70402972