

平成 27 年 9 月 21 日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870084

研究課題名(和文) シミュレーションとロボットを用いた四足動物の移動パターン生成原理の究明

研究課題名(英文) Analysis of the gait generation principle of quadrupeds by a simulated quadruped model and a robot

研究代表者

福岡 泰宏 (Fukuoka, Yasuhiro)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：40418679

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000 円

研究成果の概要(和文)：4足動物は低/中/高速において移動パターン(脚の動かし方)をwalk→trot→gallopと変化させることが知られている。生物学では、この3つの移動パターンは神経内に既存であり、それらを移動エネルギーが最少になるように速度に合わせて切替えていると報告されているが、個々の移動パターンがどのように神経内に構築されたのかは不明である。しかし、我々の4足歩行シミュレーションにおいて、速度変化と共に生じる胴体揺動変化に応じて、唯一プログラムに設定しているtrotからwalk, gallopが自然発生することを発見した。また、同様の成果を4足ロボットにおいても実現した。

研究成果の概要(英文)：It is well known that a quadruped changes its locomotion pattern called a gait (how to move its legs) from a walk to a trot to a gallop according to speed. It is reported in biology that these three gaits have already existed in an animal's nervous system, and that it switches the gaits according to speed to minimize energy for locomotion. However, it is not clear how each gait was developed in the nervous system. It was observed that an unprogrammed walk and an unprogrammed gallop emerged in our simulated quadruped model from a programmed trot, based on the varied body oscillation according to speed. In addition, we succeeded in the same result on a quadruped robot.

研究分野：Robotics

キーワード：Quadruped model Locomotion CPG Simulation study Quadruped robot

## 1. 研究開始当初の背景

4足動物は低/中/高速において移動パターン(脚の動かし方)を walk→trot→gallop と変化させることが知られている。生物学では、この3つの移動パターンは神経内に既存であり、それらを移動エネルギーが最少になるように速度に合わせて切替えていると報告されているが、個々の移動パターンがどのように神経内に構築されたのかは不明である。しかし、近年我々が行っている4足歩行シミュレーションにおいて、速度変化と共に生じる胴体揺動変化に応じて、唯一プログラムに設定している trot から walk, gallop が自然発生することを発見した。

## 2. 研究の目的

1の背景に基づき、本研究では、シミュレーションとロボットを用いて、動物の移動パターン生成メカニズムを明らかにすることを目指した。研究開始時点で我々が期待する結果がシミュレーションにおいては既に出ていたが、仮説を裏づける十分なデータが存在しなかった。よって、シミュレーションを用いた現象の詳細な分析を目指した。また、シミュレーションにおける仮想空間モデルだけでは主張の信頼性が十分ではないので、同様の機構・制御のロボットを用いた実機実験によりシミュレーションと同じ結果を出すことを目指した。

## 3. 研究の方法

### (1) シミュレーション方法

コンピュータシミュレーション上で制御パラメータ、および脚長や重心位置などの身体パラメータを様々に変更し、どのような条件で各移動パターンが生成されるのかを明確にすることにした。

シミュレーションモデルの各脚にはCPGと呼ばれる、脚の振動リズムを生成する神経制御システムをプログラムとして備えており、これら4つを結合することで基本的な移動パターンである trot を生成する。trot というのは対角にある2脚を同位相、それら対角ペアを逆位相で動かす、動物が中速において行う基本的な移動パターンである。

研究開始当初には、「姿勢反射の影響によって、4脚に供えたCPGの結合により生成される移動パターン trot から明示的にプログラムしていない walk, gallop が派生的に生じる」という申請者が主張する移動パターン生成原理はシミュレーションにおいて既の実証されていたが、それはまだ限定的な範囲の制御パラメータで行われた結果に過ぎなかった。様々な組合せのパラメータで行った場合、生物には見られない移動パターンが出現するかもしれない。CPGを構成するパラメータは10種類、その他、脚軌道制御に関わるパラメータが12種類存在する。そのうち、脚運動において支配的な進行速度、歩幅、脚振動周期に関わるパラメータに限定し

たとしても、8種類は影響力のあるパラメータが存在する。これらを広く探索することで、様々な起こりうる移動パターンとパラメータの関係性を分析した。

また、一つの移動パターンでも、身体構造の差異が原因で類似した別のパターンが現れることが推測された。例えば、低速歩行時に出現する walk において、diagonal sequence walk と lateral sequence walk が出現することが動物と同じ様にシミュレーションモデルにも見られた。walk とは、4脚が概ね90度の位相差を持って順番に振り出される移動パターンのことを言うが、その2つの walk では振り出しの順番が異なる。diagonal sequence walk は右前→右後→左前→左後、lateral sequence walk は右前→左後→左前→右後と振り出される。この2つがどのような条件を境界に現れるのかは不明で、また、それ以外の walk が出現する可能性も考えられた。同じ様に、高速(走行)時に出現する gallop において、transverse gallop と rotary gallop の出現(これらの違いも walk のように振り出される脚の順番が異なる)が見られたが、その境界は明白ではなかった。このように、歩容生成に支配的な身体・制御パラメータ調節により綿密にシミュレーションを行い、脚間位相差、身体揺動角度など歩行状況を表すデータから個々の移動パターン生成のルールを探り出すことにした。そして、これを論文に提示し、移動パターン生成原理の真意について主張することとした。

### (2) ロボットによる実験の手法

4足ロボットを製作し、実機実験によりシミュレーション結果を再現し、実環境でも移動パターン生成が可能なことで、本主張の信憑性を高めることにした。製作した4足ロボットにはシミュレーション内に構築したモデルと同様の機構を持たせた。1脚には、走行可能な高出力150WDCモータにより回転駆動する腰関節、および空気圧アクチュエータ(空気圧シリンダ)により伸縮する直動関節の2関節を供えた。密閉された空気は伸縮弾性特性を持つため、シリンダ内に空気をためておけば直動関節を体を支えるバネ(腱や筋弾性に相当)のように働かせることができる。このような直動弾性脚のことをバイオメカニクス分野ではSLIPモデルと呼び、単純構造ながらも動物に類似した歩行・走行パターンを生み出すことができることがわかっている。また、生物の脚弾性は walk から gallop までの速度変化に合わせて変わる。このような弾性可変なバネ機構を実現するのは一般に容易ではない。そこで、エアコンプレッサから供給するシリンダ内の空気圧を電磁弁により制御することで脚弾性を調節できるようにした(空気圧と弾性は比例関係にあり、高空気圧ほど高弾性を持つ)。センサ

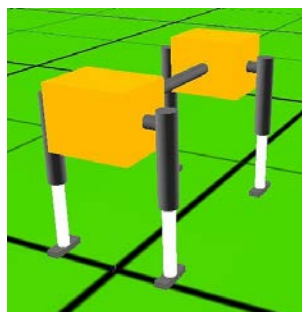
として腰関節角度を計測するエンコーダ、胴体角度を測る傾斜センサ、空気圧を測る気圧センサを備えた。制御に関してもシミュレーションと同じく、C P Gモデル、および傾斜センサにより計測した胴体傾斜に基づく姿勢反射モデルを用いた。

実験環境について、まずは進行方向平面に運動を2次元拘束して(横には倒れない)歩行・走行させることにした。運動としては2次元平面に制限されるが、シミュレーションの結果では、2次元拘束した場合でも  $walk \leftrightarrow trot \leftrightarrow gallop$  の移動パターン遷移は出現することがわかっているため、初期段階の成果としては十分なものと考えた。

#### 4. 研究成果

(1) 胴体傾きフィードバックを適用したシミュレーションモデルにおける研究成果

ここでは、C P Gに歩行中の胴体傾き情報をフィードバックしたときに、以下のようなシミュレーション4足モデルに出現した移動パターンについて説明する。



##### ① 胴体傾き情報をフィードバックしない4足モデルによる trot 移動

C P Gモデルに傾き情報をフィードバックしなければ、4足モデルの制御は trot で移動するように構築されたC P Gからなる制御系に依存するため、低速から高速にかけて、様々なパラメータを用いたいずれの速度でも、ずっと trot で移動することが確認された。

##### ② 胴体傾き情報をフィードバックする4足モデルによる lateral walk, trot, transverse gallop での移動

前述の4足モデルに移動中の胴体傾き情報をフィードバックすると、低速歩行時において、プログラムされてない lateral walk、高速時において transverse gallop が出現することがわかった。これらはいずれも動物に出現する移動パターンである。また、加速時、減速時、どちらでも出現することがわかった。制御パラメータを様々な調節し、様々な加速度、減速度による移動シミュレーションを行ったが、いずれの場合も同様の移動パターン遷移が実現することを確認できた。そして、プログラムされている trot とは異なるこれらの歩容が出現した理由についても概ね明らかになった。低速時、4足モデルの脚振動周期は長いので、胴体が大きく揺れる。それ

がC P Gにフィードバックされることで、trot の結合状態が調節され、lateral walk が出現した。そして、速度が上がるにつれて、脚周期は短くなっていくため、胴体の揺れは徐々に小さくなり、結果として、C P Gへのフィードバックはほぼゼロになるため、予めプログラムされた trot が中速時には出現した。一方、高速においては、空中にジャンプする浮遊相が生じるため、また胴体が大きく揺れる。そのため、trot から結合状態が調節され、transverse gallop が出現した。しかし、低速、高速、どちらも胴体が揺れるのに、なぜ異なる移動パターンが出現したのかというと、低速では脚振動数と胴体振動数の割合が2:1であるのに対し、高速ではそれが1:1になるからであると判明した。

以上の成果は国際論文誌 Biological Cybernetics に2013年に掲載された。これまでに本4足モデルのような自律的な移動パターン遷移を歩行から走行までシームレスに実現したシミュレーションモデルは存在しなかったため、高い評価を受けた。

##### (2) 脚負荷フィードバックを適用したシミュレーションモデルにおける研究成果

申請書作成時、また研究開始当初は、C P Gへのフィードバックは胴体傾き情報を適用しようと計画していたため、(1)のような成果に至ったが、実際の動物においては、胴体傾き情報がC P Gにフィードバックされているという知見は生物学分野ではなされていないことがわかった。動物は姿勢制御のためには胴体傾き情報よりも地面に脚をついたときの脚負荷情報を積極的に用いており、それがC P Gにフィードバックされていると指摘されている。従って、より生物学に近い分野での評価を受けるために、胴体傾き情報をではなく、脚負荷情報フィードバックを適用した4足モデルにおいて、(1)と同様のシミュレーションを行うことにした。その結果、(1)において出現した lateral walk, transverse gallop に加えて、さらに diagonal walk, right-lead canter, left-lead canter, right-lead transverse gallop, left-lead transverse gallop のプログラムしていない移動パターンが新たに出現し、合計で7種類の実際の動物に出現する移動パターンの創発を成功させた。これらの7種以外の移動パターンは動物にはほぼ見られないため、脚負荷情報のC P Gへのフィードバックが動物の移動パターン遷移のトリガーとなっているかもしれないという有用な知見を導き出すことができた。さらに、唯一プログラムされた trot からそれらの移動パターンが出現する簡単なルールを見つけることに成功した。

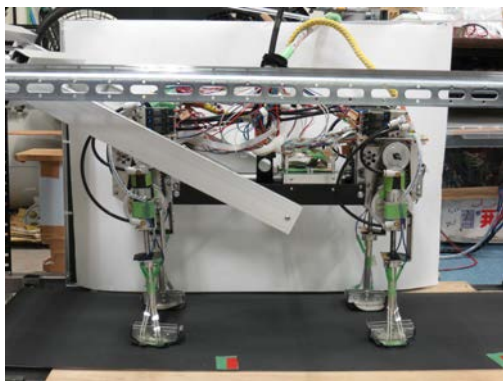
脚負荷のフィードバックは接地時に大きく負荷がかかる脚の接地時間を延長する効果があり、胴体が傾いた時の姿勢制御の役割を果たすが、一方で、この脚負荷フィードバ

ックが複数移動パターンを創発する要因となった。例えば、trot 時、胴体が前傾すると、接地状態にある一組の対角 2 脚のうち、前脚(左前脚)の負荷が後脚(右後脚)より大きくなり、脚負荷フィードバックを介して前脚のリズム生成器はより長く接地させようとするため、後脚が先に離地する。これは trot とは異なる移動パターンを意味している。この異なる移動パターンは、2 組の対角 2 脚の接地時における 3 種類の胴体傾き(前傾、後傾、水平)から、 $9(=3 \text{ の } 2 \text{ 乗})$ 通りの組合せが考えられる。そのうち 2 つは動物には見られない移動パターンであるが、別のものと非常に近い移動パターンとなっている。

このように、動物の様々な移動パターンを簡単なルールを用いて説明したのは私が知る限りでは、どの分野でも初めてであり、非常に高く評価され、Nature Publication Group が出版する Scientific Reports に 2015 年に採択された。

### (3) 4 足ロボットによる移動パターン遷移の実現

(1) で述べた成果をロボットにおいても実現すべく、シミュレーションモデルとほぼ同じ仕様の以下のような 4 足ロボットを作成した。



ロボットはシミュレーションモデルのように理想的な状態には無いため、移動パターン遷移の実現に多くの時間を要しており、現時点ではまだシミュレーションのような、速度を上げたときの lateral walk, trot, transverse gallop の一連の移動パターン遷移は実現できておらず、lateral walk から trot, trot から transverse gallop のそれぞれの遷移しか成功していないが、今年中にこれらを成功させ、国際論文誌に投稿する予定である。

### 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 2 件)

A simple rule for quadrupedal gait generation determined by leg loading feedback: a modeling study,

Y. Fukuoka, Y. Habu, T. Fukui,  
Scientific Reports, Vol. 5, No. 8169;  
DOI:10.1038/srep08169, 2015. (査読有)

Analysis of the gait generation principle by a simulated quadruped model with a CPG incorporating vestibular modulation.

Y. Fukuoka, Y. Habu and T. Fukui,  
Biological Cybernetics, Vol. 107, No. 6,  
pp. 695-710, 2013. (査読有)

〔学会発表〕(計 1 件)

羽部安史, 福井貴大, 福岡泰宏, シミュレーションを用いた 4 足動物モデルの歩容生成原理の分析, 第 34 回バイオメカニズム講演会, 2013. 11. 16, 国立障害者リハビリテーションセンター研究所 (埼玉県所沢市並木 4 丁目 1)

〔その他〕

ホームページ等

<http://fukuoka.ise.ibaraki.ac.jp/index-e.html>

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

福岡 泰宏 (FUKUOKA, Yasuhiro)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号 : 40418679

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし