

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05887

研究課題名(和文) シミュレーションとロボットを用いた4足動物の移動パターン生成原理の追究と評価

研究課題名(英文) Examination and evaluation of the principle of gait patterns' generation of quadrupeds using simulation and robots

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：4足動物は移動速度に合わせて4脚の振り方(移動パターン)をwalk, trot, gallopなどと切り替えていることが知られているが、なぜそのようなになるのかは生物学においても未だ明確にはわかっていない。本研究では、2階層Central Pattern Generator (CPG)と呼ばれる歩行走行のリズムを生み出す神経系を持つ猫のシミュレーション4脚モデルを構築し、walk, trotの自律歩容遷移が可能であることを実証した。また、人工筋肉アクチュエータにより駆動する後2脚のロボットを構築し、そのCPGモデルを用いてステップングが可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：It is known that quadruped animals can switch their gaits from walking to trotting to galloping according to speed, but the mechanism is still not revealed even in biology. In this study, we built a simulated quadruped modeled on a cat with nervous system called the two-level central pattern generators that could produce the rhythm of locomotion and demonstrated that it could achieve autonomous gait transition between walking and trotting. In addition, we built a hind-limb biped robot driven by artificial muscles and demonstrated that it could perform stepping motions with the CPG model.

研究分野：ロボティクス

キーワード：歩行ロボット

1. 研究開始当初の背景

4脚動物は、その脚間振動の位相差により定義される歩行・走行のパターン(歩容)をいくつか持っている。一般的な歩容として、低速時の walk, 中速時の trot, 高速時の gallop が挙げられ、4脚動物は移動速度に応じてこれらの歩容を切り替えている。これを歩容遷移現象という。

この歩容遷移現象が生じる要因は厳密にはわかっていないが、一般に、歩容遷移にはエネルギー消費が関係していると考えられており、エネルギー消費量が最小になるような歩容を選択して運動していると考えられている。一方、本研究では、歩容は Central Pattern Generator(CPG)と呼ばれる運動リズム生成器と姿勢反射の組み合わせによって創発されるという仮説を立てている。これまでの申請者らの研究成果より、歩容遷移と姿勢制御の間には密接な関係があることを示唆することができた。しかし、これまでは、直動脚を用いるなど、神経系、機構共にできるだけ要素を減らしたシンプルな4脚モデルを用いていたため、生物学的視点から見れば、動物とはやや乖離した印象を与えていた。また、4脚モデルの歩行走行結果を動物と比較して評価するにあたって不都合であった。

2. 研究の目的

1の背景を元に、本研究では、神経工学に基づいた CPG モデルと解剖学から得た筋骨格モデルを備えた3リンク脚を持つ4脚動物モデルをコンピュータシミュレーションに構築し、従来研究と同様に歩容遷移が観察されるかを確認することを研究の目的とした。より動物に近い4脚モデルにおいても著者らの仮説に基づいた歩容遷移現象が創発されたならば、生物の歩容遷移と姿勢制御の間には関係があるという主張をより強くすることができるであろう。

3. 研究の方法

(1) 4脚モデル

ここでは、4脚モデルの機構と制御について述べる。4脚動物モデルは、Cyberbotics社によって開発されたロボットシミュレータ Webots 上に構築し、歩行させた。

本研究に用いた4脚動物モデルの脚機構は、動物の骨格を参考としている。シミュレーション上での4脚動物モデルの大きさは、全長450mm、全幅163mm、総重量7.0kgと猫ほどの大きさに設定しており、1脚あたり3つのpitch軸周りに駆動する関節を持っている。

筋肉についても、動物の筋肉配置を参考とし、図1の下部に示すような配置としている。図中の6つの筋肉が1脚にある3つのリンクをそれぞれ駆動させることで脚を振動させることができる。筋肉は、シミュレーション上では直動アクチュエータを用いて再現している。

各筋肉モデルは、それぞれ対応する運動二

ユーロン(Mn)から信号を受け取ることで収縮する。筋肉モデルの特性式を式(1)-(5)に示す。 $F_{max}$ は筋肉の最大収縮力、 $F(V)$ はMnからの入力値、 $F_l$ は筋肉長による特性変化、 $F_v$ は収縮速度による特性変化、 $F_p$ は筋肉長により受動的に発生する力である。 $x$ は標準化された筋肉長、 $v$ は筋肉の収縮速度である。 $x$ は実際の筋肉長 $L$ [mm]と最適長さ $L_{opt}$ を用いて $x=L/L_{opt}$ により算出される。また $\beta=2.3$ ,  $\rho=2.0$ ,  $\omega=1.26$ ,  $b_1=-0.69$ ,  $b_2=0.18$ ,  $c_1=0.17$ である。

$$F = F_{max} \cdot (f(V) \cdot F_l \cdot F_v + F_p) \quad (1)$$

$$F_l(x) = e^{-|(x^\beta - 1)/\omega|^\rho} \quad (2)$$

$$F_v(x, v) = \frac{b_1 - c_1 \cdot v}{v + b_1} \quad \text{if } v \leq 0 \quad \text{otherwise} \quad \frac{b_2 - c_2(x) \cdot v}{v + b_2} \quad (3)$$

$$c_2(x) = -5.34x^2 + 8.41x - 4.7 \quad (4)$$

$$F_p = \text{stiff} \ln \left( \frac{x+1.4}{e^{0.05} + 1.0} \right) - 0.02 \left( e^{18.7(x-0.79)} - 1.0 \right) \quad (5)$$

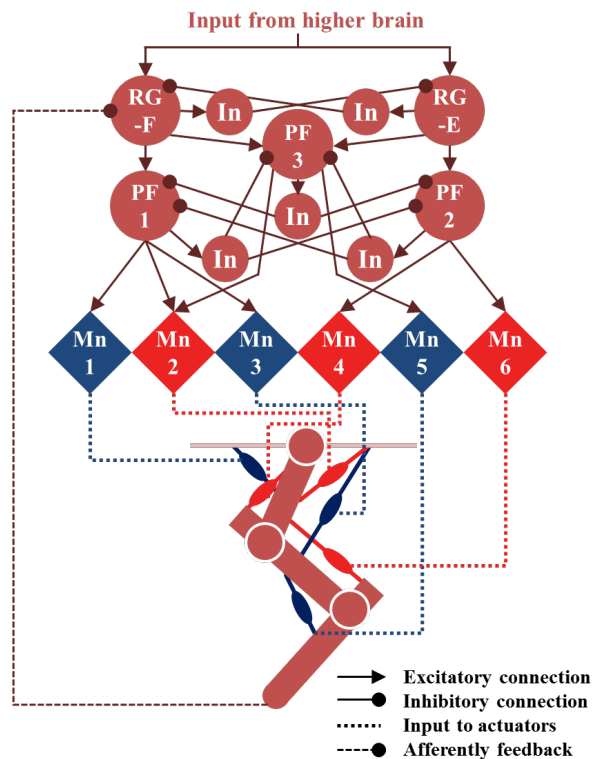


図1 CPG and musculoskeletal system of each leg

(2) 神経系

本研究で用いた神経系に相当するCPGは、リズム生成層(RG層)とパターン形成層(PF層)の2階層であり、その下にMnが結合されている。本研究ではPF層とMnを拡張す

ること、3リンク脚における6つの筋肉に対応させた1脚のCPGの内部構造を図2に示す。

RGは上位中枢から信号を受けることにより活性化するが、RG層は屈筋側ニューロンのRG-Fと伸筋側ニューロンのRG-Eが介在ニューロン(In)を通して相互抑制結合しているため、RG-FとRG-Eが交互に活性化する。つまり、上位中枢が一定の入力を与えるだけで、運動のリズムを生成することができる。

PF層におけるPF1, PF2, PF3はそれぞれ、遊脚相、支持脚相、離昇相を担っており、それぞれの相を実現するのに必要な筋肉に対応したMnへつながっている。PFはRGのリズムに応じて順次活性化することで、歩行運動に必要な遊脚、支持脚、離昇の指令をMnに周期的に送る。

図1のRG, PF, Mnの特性式を式(6)に、Inの特性式を式(7)に示す。式(6)と(7)において、 $I_{NaP,i}$ ,  $I_{K,i}$ はそれぞれナトリウムイオン、カリウムイオンの移動による電流であり、 $I_{Leak,i}$ は漏れ電流、 $I_{SynE,i}$ と $I_{SynI,i}$ は興奮性および抑制性ニューロン結合により発生する電流を表す。Cはニューロンのキャパシタンス、Vはニューロン電位を表す。また、添字*i*は*i*番目のニューロンを表す。

$$C \cdot \frac{dV_i}{dt} = I_{NaP,i} - I_{K,i} - I_{Leak,i} - I_{SynE,i} - I_{SynI,i} \quad (6)$$

$$C \cdot \frac{dV_i}{dt} = I_{Leak,i} - I_{SynE,i} - I_{SynI,i} \quad (7)$$

式(8) - (12)は式(6), (7)に示した電流の特性を表している。 $\bar{g}_{NaP}$ ,  $\bar{g}_K$ ,  $\bar{g}_{Leak}$ ,  $\bar{g}_{SynE}$ ,  $\bar{g}_{SynI}$ は各電流の最大コンダクタンス、 $E_{Na}$ ,  $E_K$ ,  $E_{Leak}$ ,  $E_{SynE}$ ,  $E_{SynI}$ は逆転電位であり、これらは全て定数である。 $a_{ji}$ ,  $b_{ni}$ ,  $c_{mi}$ ,  $w_{ki}$ は、それぞれ興奮性の神経結合荷重、抑制性の神経結合荷重、上位中枢からの入力荷重、筋肉からのフィードバック情報の入力荷重である。 $d_m$ は上位中枢からの定常入力であり、式(11)の $fb_k$ は筋肉の長さ、および収縮速度のフィードバック項である。

$$I_{NaP,i} = \bar{g}_{NaP} m_{NaP} h_{NaP} (V_i - E_{Na}) \quad (8)$$

$$I_{K,i} = \bar{g}_K m_K^4 (V_i - E_K) \quad (9)$$

$$I_{Leak,i} = \bar{g}_{Leak} (V_i - E_{Leak}) \quad (10)$$

$$I_{SynE,i} = \bar{g}_{SynE} (V_i - E_{SynE}) \quad (11)$$

$$I_{SynI,i} = \bar{g}_{SynI} (V_i - E_{SynI}) \cdot (\sum_j b_{ji} f(V_j) + p_i \cdot Feed_i) \quad (12)$$

$m_K$ と $m_{NaP}$ は式(13)および(14)により表され、 $h_{NaP}$ は式(15)の微分方程式から導出され、 $h_{NaP}$ および $h_{NaP}$ は式(16), (17)によりニューロン電位から算出される。式(18)によりニューロンの電位からそのニューロンの活性度を得る事ができる。なお、活性度は0.0~1.0の間で表される無次元数である。

$$m_K = \frac{1}{1 + \exp(-(V_i + 44.5)/5)} \quad (13)$$

$$m_{NaP} = \frac{1}{1 + \exp(-(V_i + 47.1)/3.1)} \quad (14)$$

$$\tau_{h_{NaP}} \cdot \frac{d}{dt} h_{NaP} = h_{\infty NaP} - h_{NaP} \quad (15)$$

$$h_{\infty NaP} = \frac{1}{1 + \exp((V_i + 51)/4)} \quad (16)$$

$$\tau_{h_{NaP}} = \frac{\tau_{h_{NaP}max}}{\cos(k((V_i + 51)/8))} \quad (17)$$

$$f(V_j) = \frac{1}{1 + e^{-(V_j - V_{th})/k}} \quad \text{if } -50[\text{mV}] \leq V_j \quad \text{otherwise } 0 \quad (18)$$

式(11)における $fb_n$ はIa求心性連絡を示しており、式(19)と(20)に分けて表され、それぞれ屈筋側と伸筋側の筋肉に対応する。なお、本研究では、Mn1とMn2に対応する筋肉に対してこのフィードバックを適用する。 $v_{norm}$ は筋肉の収縮速度を標準化した値であり、 $v$ を実際の筋肉の収縮速度とすると $v_{norm} = v/L_{th}$ と定義される。

$$fb_0 = k_v \cdot v_{norm-F}^p + k_{dI} \cdot d_{norm-F} + k_{nI} \cdot f(V_{Mn-F}) + const_I \quad (19)$$

$$fb_2 = k_v \cdot v_{norm-E}^p + k_{dI} \cdot d_{norm-E} + k_{nI} \cdot f(V_{Mn-E}) + const_I \quad (20)$$

このCPGを各脚に搭載し、隣接する脚同士のRG層を抑制性結合することで、基本歩容のtrotを生成する。なお、trotとは、対角の脚同士が同位相で振動し、隣り合う脚同士は逆位相で振動する歩容である。

また、姿勢制御として式(12)の $Feed_i$ に対して、式(22)で表現する脚負荷情報のフィードバックを導入している。これは、図1に示すように、脚にかかった負荷を屈筋のRGへ抑制性信号として与えるものである。これにより、より負荷の大きい脚の支持脚期は延長され、結果として体が傾いた方向への転倒を防ぐものである。式(22)の $PRESS\_GAIN$ は脚負荷フィードバックのゲイン、 $F_{foot}$ は足裏にかかった負荷である。

$$Feed_i = \frac{PRESS\_GAIN}{1 + e^{-(F_{foot} - 50)/10}} \quad \text{if } 5[\text{N}] \leq F_{foot,i} \quad \text{otherwise } 0 \quad (22)$$

#### 4. 研究成果

以前の研究で用いたシンプルな機構と神経モデルを備えた4脚モデルの代わりに、前節で説明した、新しく提案した動物の特徴を

より詳細に反映させた機構と制御を持たせた4脚動物モデルを用いてシミュレーションを行った結果、様々な速度において歩行運動をさせることに成功した。この時、脚負荷情報のフィードバック無しでは、様々な速度においてプログラム通りの基本歩容 trot を示した。図2と図3に速度約0.47[m/s]での trot の時のCPG出力と脚接地情報を示す。図2では左前脚(LF)と右後脚(RH)のペアと右前脚(RF)と左後脚(LH)のペアが同位相で振動していることが分かる。図3の脚接地情報は上から順にLF, LH, RF, RHの接地情報を表しており、横軸は時間を表す。この図より、対角のペアが同時に接地、離昇していることがわかる。

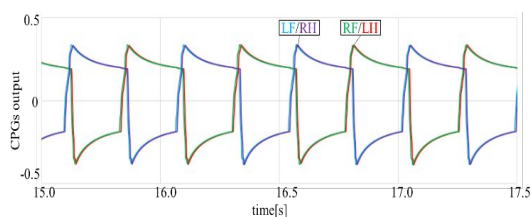


図2 CPG output during trotting without leg load feedback

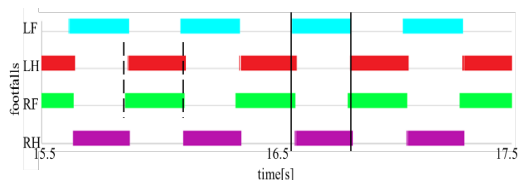


図3 Footfalls during trotting without leg load feedback

また、同様に、低速では walk 歩容が自律的に出現した。これにより、神経工学に基づいたCPGと動物に近い筋骨格を備えた4脚動物モデルを用いて、walk-trot 間の歩容遷移を実現した。また、trot-gallop においても遷移を見せている。

また、これと同様の機構と神経系を持つロボットも製作し、後脚によるスムーズなステップングを実現している。

今後は、シミュレーションにおける walk-trot-gallop の一連の歩容遷移、およびロボットによる同様の歩容遷移を実現し、前述した本研究の歩容遷移に関する仮説を強固なものにしていきたいと考えている。

## 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1件)

1. Energy evaluation of a bio-inspired gait modulation method for quadrupedal locomotion,

Y. Fukuoka, K. Fukino, Y. Habu and Y. Mori, *Bioinspiration & Biomimetics*, vol.10,

No.4, 046017, 2015. (査読有)

{ 学会発表 }(計3件)

1. Y. Fukuoka

Bio-inspired gait transition for quadruped robots the 2nd international symposium on swarm behavior and bio-inspired robotics (SWARM 2017), 2017, 10, 29, 京都大学(京都府京都市左京区吉田本町36番地1)

2. 羽部 安史, 福井 諭, 石原 淳也, 福岡 泰宏

生物の神経構造と筋骨格を模した4脚動物モデルによる歩容遷移現象の創発

ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2017.5.12, ビッグパレット福島(〒963-0115 福島県郡山市南2丁目52)

3. 福井貴大, 福岡泰宏

4脚ロボットにおける自律歩容遷移とそれに伴うロバスト性の向上

ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2017.5.12, ビッグパレット福島(〒963-0115 福島県郡山市南2丁目52)

{ 図書 }(計0件)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

茨城大学工学部准教授

福岡 泰宏 (FUKUOKA, Yasuhiro)

研究者番号: 40418679

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者 なし