

リズム運動の環境適応に関する数理的モデルについて†

伊藤 聡*・湯浅 秀男**・羅 志偉*
伊藤 正美*・柳原 大***

A Model of Adaptation to Environmental Changes in Rhythmic Movements

Satoshi ITO*, Hideo YUASA**, Zhi-wei LUO*,
Masami ITO* and Dai YANAGIHARA***

This paper considers an adaptation of rhythmic movements to changes in environments. Perturbed locomotion has been proposed as a new paradigm of motion learning. Here, we formulate this phenomenon with CPG model and give a rule for parameter changing in locomotion patterns. Our rule is derived from a criterion that less interaction is more natural in CPG oscillation. Then extending our approach, we discuss general features and necessary conditions for rhythmic motion and propose a mathematical framework for its adaptation.

Key Words: Rhythmic movements, Adaptation model, Periodic perturbation, CPG interaction,

1. はじめに

動物の運動には、その生成に高次神経系すなわち運動野を始めとする大脳皮質が関与するものと、基本的には脳幹・脊髄といった下位の神経系のみで生成が可能となるものが存在する¹⁾。前者はスポーツのように運動目的が意識にのぼることから随意的な運動とよばれる。一方、後者には自動的な運動²⁾や反射運動が含まれ、その運動は一般的には意識せずに行われる。自動的な運動には、歩行・飛翔・遊泳・咀嚼・呼吸³⁾など動物の生存のために必要不可欠で非常に頻繁に行われる基本的なものが多い。自動的な運動の特徴は、同じ動作の繰り返しにより周期的な運動パターンが形成されていることである。この周期運動のリズムは、CPG(セントラル・パターン・ジェネレータ)と呼ばれる脊髄レベルの神経振動子で生成されると考えられている⁴⁾。CPGはその周期性よりしばしば発振器モデルにより表現され、その発振パターンの形成についてこれまで多くの報告がなされてきた^{5)~11)}。しかし、これらの発振パターンが環境の変化に

対してどのように適応するかについては十分な議論がなされていない。

リズム運動の環境適応として興味深い実験パラダイムが、四足歩行運動に対して提案されている¹²⁾。Fig. 1に示すように、この実験は独立した速度で駆動できる3つのベルトをもつ特殊なトレッドミル上でネコを歩行させて行う。通常の歩行では四脚は等速度で動くトレッドミル上に置かれる。しかし、この実験では四脚のうち一脚(左前脚)のトレッドミルの回転速度を速めることによって周期的な摂動を加える。高次神経系の関与がないことを示すために、除脳ネコを用いる。ネコは頭部を固定しているため強制的に歩行をさせられる。最初のうちは脚間の協調がとれず、右前脚と左前脚とで周期が異なったり周期がサイクルごとに変化したりして、歩行パターンは安定しない。しかし、しだいに左前脚が速い環境に適応し、新しいパターンで歩行を始める。しかも新しい環境に適応した歩行パターンは記憶される。ある時間をおいて再び左前脚の速い環境で実験を行うと、ネコは実験の最初から適応したパターンで歩行することができる¹³⁾。実験で得られたネコの歩行パターンの変化の様子をgait diagramによって表すとFig. 2のようになる。環境適応によって前脚の両脚支持期に変化がみられる。両脚支持期には支持脚になる順序により二種類存在する。左前脚一脚での支持状態で右前脚を着地することにより両脚支持になる場合(B_1)と、逆に右前脚から左前脚の順序で支持脚になる場合(B_2)である。通常の歩行Fig. 2(a)では $B_1 = B_2$ であるが、摂動により $B_1 < B_2$ と差が生じる(Fig. 2(b))。しかし、適応によりその差は幾分小さくなる(Fig. 2(c))。この適応により左右前脚間で協調がとれ、速やかな体重の移動が可

† 第9回自律分散システム・シンポジウムで発表(1997.1)

* 理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター
名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2271 番地 130

** 名古屋大学工学部 名古屋市千種区不老町

*** 理化学研究所脳科学総合研究センター 埼玉県和光市広沢 2-1

* Bio-Mimetic Control Research Center, RIKEN,
Moriyama-ku, Nagoya

** Faculty of Engineering, Nagoya University, Chikusa-ku,
Nagoya

*** Brain Science Institute, RIKEN, Wako

(Received February 12, 1997)

(Revised April 1, 1998)

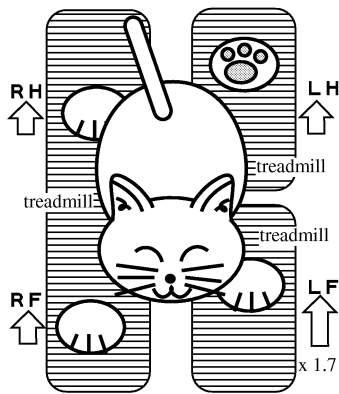


Fig. 1 Perturbed locomotion with decerebrate cat.

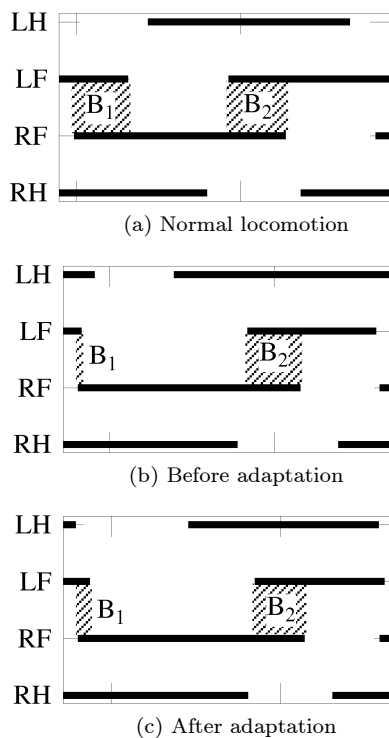


Fig. 2 Changing of locomotion pattern according to perturbation by experiments.

能になると考えられる¹²⁾. このような外乱に対する適応には、一酸化窒素を介した神経細胞間のシナプスの可塑性が必要であると示唆されている¹²⁾.

本研究では、環境の変動に柔軟に適応する人工システムの構築を目指して、上述したネコの適応的な振舞いについての数理的なモデルを構成し、その性質の解析を試みる。三浦ら¹⁵⁾は、調和振動子を結合させたCPGモデルにより、この周期振動によるパターン変化がシミュレートできることを示した。すなわち、摂動がないとき Fig.2(a)の歩行パターンを生成するCPGモデルに、左前脚にあたる発振器の接地相での速度を速めるような摂動を加える。このとき Fig.2(c)とほぼ同じ歩行パターンが発生した。しかし、ここで行ったシミュレーションでは、適応のための時間の説明

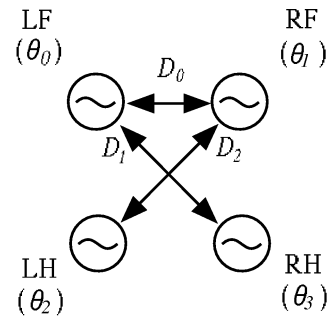


Fig. 3 Connection of four oscillators.(LF: left foreleg, RF: right foreleg, LH: left hindleg, RH: right hindleg)

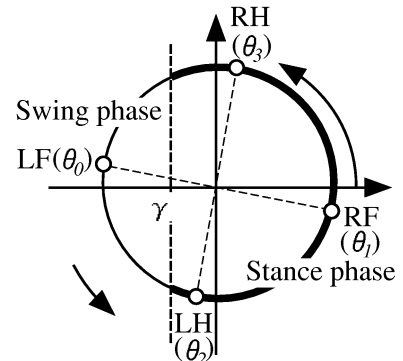


Fig. 4 Stance phase and swing phase. In this case, only the LF (θ_0) is in swing phase and the others (LH, RF, RH) are in stance phase.

ができない。実際のネコでは新しい環境下で歩行パターンを獲得するときに、十分な適応期間が必要である。ところがシミュレーションでは、実験結果と同じパターンが現れるまでにほとんど時間を要しない¹⁶⁾。また、ネコは新しい環境下で獲得した歩行パターンを記憶しており、時間をおいて同じ摂動条件で歩行をさせたとき最初から安定した歩行を示す。つまり、新しい環境に対して、記憶しているパターンの修正が行われているはずである。三浦らのシミュレーションでは、環境からの作用と発振器間の相互作用との間にバランスがとれた結果、新しい歩行パターンが生まれている(2.3.1節参照)。したがって、記憶したパターンそのものを修正しているわけではない。あくまでCPGに記憶したパターンで発振しようとした結果、摂動を打ち消すように相互作用が生まれ、新しいパターンにおちついたのである。

本稿では以上の問題点をふまえ、記憶したパターンの修正という立場からネコの歩行運動における環境適応について再考する。ここでの考察をもとに、リズム運動における環境適応の特徴や必要な性質について議論し、そのモデル化の枠組みを提案する。

2. 歩行運動におけるパターン生成

2.1 発振器によるモデル化

周期性のある歩行運動は、そのリズム形成が発振器を用いてモデル化される。本稿でも一本の脚に一つの発振器を取り付け、歩行パターンを4つの発振器の相対位相差によって表現する。各発振器は、Fig.3のように結合する。なお、

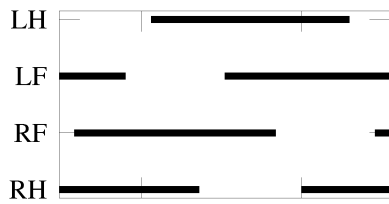


Fig. 5 Normal locomotion.

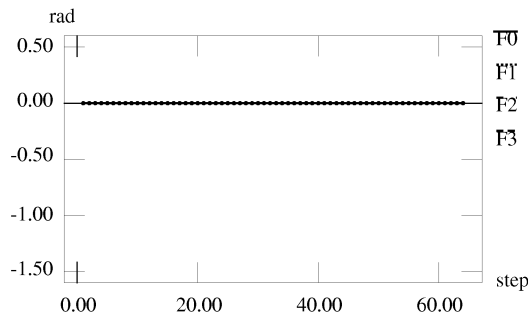


Fig. 6 Oscillator interaction during normal locomotion. No interaction works.

この結合方法は数学的なもので、実際のネコの神経系とは必ずしも一致しない。

発振器の位相情報で脚の運動状態を記述する。各脚は歩行時に遊脚と支持脚の2つの状態をとる。そこで発振器の位相 $[0, 2\pi)$ を2つに分割しそれぞれを対応づける。本稿では $\cos \theta_i \geq \gamma$ で支持脚相, $\cos \theta_i < \gamma$ で遊脚相とする (Fig. 4 参照)。一歩行周期での支持脚相の割合を表す接地率 β は γ を用いて、

$$\beta = \frac{\cos^{-1} \gamma}{\pi} \quad (1)$$

と書ける。 γ は、接地率が実験結果から得られた歩行パターンと等しくなるように定める。

2.1.1 支持脚相のダイナミクス

支持脚相では各脚はトレッドミル上に置かれている。したがって、その運動はトレッドミルに拘束される。つまり支持脚はトレッドミルの動く速度で駆動される。

$$\dot{\theta}_i = \rho_i \quad (i = 0, 1, 2, 3) \quad (2)$$

ここで、 $\rho_i (i = 0, 1, 2, 3)$ はそれぞれの脚の置かれるトレッドミルの回転速度を表す。

2.1.2 遊脚相のダイナミクス

遊脚相では各脚はトレッドミルからの拘束が解かれ自由に運動できる。発振器間の相互作用で各脚間の位相差が調節できるのは遊脚相のみである。

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + f_i \quad (i = 0, 1, 2, 3) \quad (3)$$

ただし、 $\omega_i (i = 0, 1, 2, 3)$ は遊脚相の角速度、 $f_i (i = 0, 1, 2, 3)$ は発振器間の相互作用である。湯浅ら⁷⁾は、位相差空間のダイナミクスが自律系・勾配系になる必要十分条件を示し、位相差空間のポテンシャル関数から各発振器間の相互作用を



Fig. 7 Perturbed locomotion without adaptation.

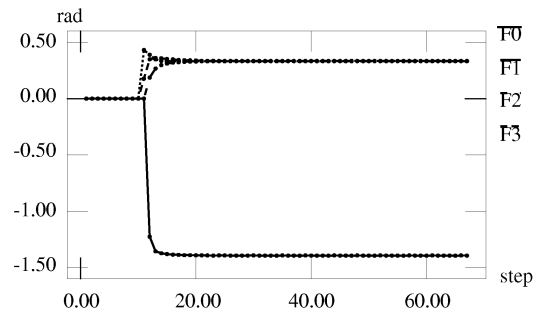


Fig. 8 Oscillator interaction in perturbed locomotion. The interaction works so that locomotion should converge to memorised pattern.

決定する方法を与えた。本稿ではこの手法を利用し、以下のように $f_i (i = 0, 1, 2, 3)$ を与える (付録 A 参照)。

$$f_0 = \tau_{\theta_0} (\theta_1 + \theta_3 - 2\theta_0 - D_0 - D_1) \quad (4)$$

$$f_1 = \tau_{\theta_1} (\theta_0 + \theta_2 - 2\theta_1 + D_0 - D_2) \quad (5)$$

$$f_2 = \tau_{\theta_2} (\theta_1 - \theta_2 + D_2) \quad (6)$$

$$f_3 = \tau_{\theta_3} (\theta_0 - \theta_3 + D_1) \quad (7)$$

$\tau_{\theta_i} (i = 0, 1, 2, 3)$ は発振器間の相互作用の大きさを調節する定数、 $D_j (j = 0, 1, 2)$ は目標とする位相差である。このとき ω_i と D_j が歩行パターンを記述するパラメータとなる。

2.1.3 トレッドミルのダイナミクス

トレッドミル上で歩行する場合、トレッドミルの回転速度が環境にあたる。それは環境を記述するパラメータ $\mu_i (i = 0, 1, 2, 3)$ により、

$$\rho_i = \mu_i \quad (i = 0, 1, 2, 3) \quad (8)$$

で与える。

2.2 通常および摂動下でのシミュレーション

2.2.1 トレッドミルが等速度回転の場合

トレッドミルが等速度で駆動される場合、環境のパラメータ $\mu_i (i = 0, 1, 2, 3)$ は

$$\mu_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \omega \quad (9)$$

で表せる。このときネコは Fig. 2(a) の歩行パターンで歩く。このとき Fig. 2(a) の歩行パターンが CPG に記憶されていたと解釈できる。

記憶されたパターンで歩行するときには、発振器間の相互作用は小さく独自のリズムで発振していると考えられる。言い換えると、摂動が働いた場合のみ記憶された歩行パター

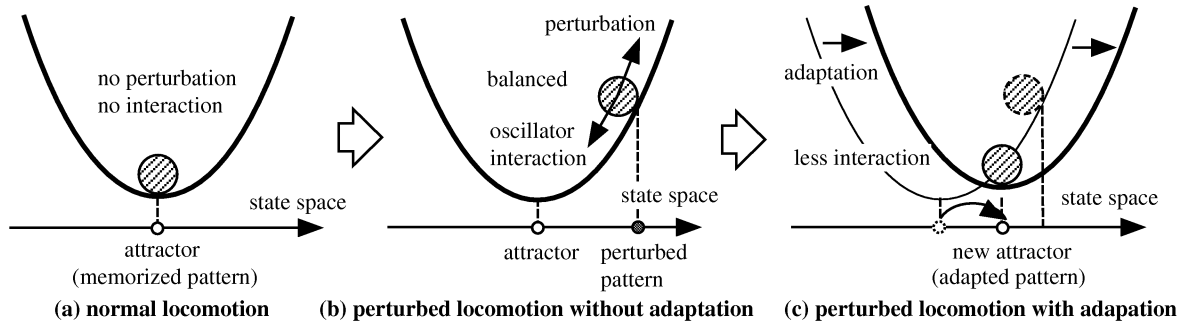


Fig. 9 Principle on adaptation in perturbed locomotion.

ンに引きもどすような相互作用が生じる。したがって、等速度のトレッドミル上での歩行パターンでは発振器間の相互作用がはたらかないように、パラメータを以下のように設定する。

$$\omega_0 = \omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega \quad (10)$$

$$D_0 = \frac{1}{2}\pi, D_1 = \frac{3}{4}\pi, D_2 = -\frac{1}{4}\pi, \quad (11)$$

また、支持脚相と遊脚相の比率が実際のネコの歩行と合うように γ を設定する。Fig. 2(a) では接地率 β はおよそ $2/3$ である。したがって (1) 式より $\gamma = -0.5$ とする。シミュレーションによる gait diagram を Fig. 5 に、各発振器間の相互作用 $f_i (i = 0, 1, 2, 3)$ を一歩行周期で積分した値

$$F_i = \int_T f_i dt \quad (i = 0, 1, 2, 3) \quad (12)$$

を Fig. 6 に示す。

2.2.2 摂動のある場合

ネコの実験では左前脚 (LF) のトレッドミルだけを 1.7 倍の速度で駆動している。シミュレーションでは、環境のパラメータが

$$\mu_0 = 1.7\omega, \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \omega \quad (13)$$

のときに対応する。gait diagram を Fig. 7 に、一歩行サイクルでの相互作用の積分値 F_i ((12) 式) を Fig. 8 に示す。シミュレーションでは、 μ_0 は歩行開始から 10 秒後に ω から 1.7ω へ変化させた。 μ_0 以外のパラメータは 2.2.1 節と同じである。

2.3 周期的摂動に対する環境適応

2.3.1 環境適応とは何か

ここで利用した湯浅ら⁷⁾の方法では、位相空間での勾配系の極小値がポイント・アトラクタとなり、相互作用はその極小値に収束させるようにはたらいっているといえる。Fig. 8 によると発振器は一周期あたりに常に他の発振器から干渉を受けていることがわかる。別の見方をすると、アトラクタにあたる発振パターンに近づけるように相互作用がはたらくが、一方では環境から周期ごとに一定の割合でアトラクタから遠ざけるような摂動を受ける。そして、アトラクタに近づける力と遠ざける力が釣り合った結果、Fig. 7 のような歩行パターンが現れるのである (Fig. 9(b) 参照)。記憶したパターンに収束させるよう常に相互作用が働いているにもか

かわらずそこに収束できないのは、記憶したパターンが新しい環境に対しては適切ではないためであると考えられる。

新しい環境に合わないときには記憶したパターンを修正する必要がある。本稿ではこの記憶パターンの修正を環境適応であるとする。各発振器は他から干渉を受けず、独自のリズムで振動するのが自然である。また相互作用を現在の状態が望ましい状態と異なるときその望ましい状態に戻そうとする力と考えれば、相互作用のない状態が理想的である。したがって、発振器間の相互作用が小さくなるように記憶パターン (アトラクタ) の修正を行う (Fig. 9(c) 参照)。

2.3.2 環境適応のダイナミクス

環境に適応するため、歩行パターンを記述するパラメータ、すなわち各脚の遊脚相での角速度 $\omega_i (i = 0, 1, 2, 3)$ と各脚間の目標位相差 $D_j (j = 0, 1, 2)$ を調節する。調節の基準は、発振器間の相互作用を小さくすることである。各パラメータをどのように変えるかは、一歩行サイクルでの発振器間の相互作用を評価してはじめて決めることができる。つまり、まず現在のパラメータでの発振状態が評価できなければならない。そのため、リズム運動の収束に比べてパラメータ調整のダイナミクスは十分に遅い。ここではパラメータの調整は以下の式にしたがい一歩行サイクルごとに行う。

$$\omega_i^{(n+1)} = \omega_i^{(n)} + \tau_\omega \int_T f_i dt \quad (i = 0, 1, 2, 3) \quad (14)$$

$$D_0^{(n+1)} = D_0^{(n)} + \tau_D \int_T (f_0 - f_1) dt \quad (15)$$

$$D_1^{(n+1)} = D_1^{(n)} + \tau_D \int_T (f_0 - f_3) dt \quad (16)$$

$$D_2^{(n+1)} = D_2^{(n)} + \tau_D \int_T (f_1 - f_2) dt \quad (17)$$

ここで、 n は歩行サイクル数、 T は歩行周期、 $f_i (i = 0, 1, 2, 3)$ は (4)–(7) 式で記述される相互作用力、 τ_ω と τ_D はそれぞれ遊脚相の角速度 ω_i および目標位相差 D_j を調節する速さを表すパラメータである。

(14) 式は ω_i という発振器固有の角振動数を調整することにあたる (付録 B 参照)。これにより一周期にうける相互作用の積分値 F_i を小さくすることができる。各歩行サイクルでは ω_i は一定でその変化は θ_i よりも十分ゆっくりであるとき、位相差のダイナミクスは勾配系のまま保たれるとみなせ



Fig. 10 Adapted locomotion to perturbation.

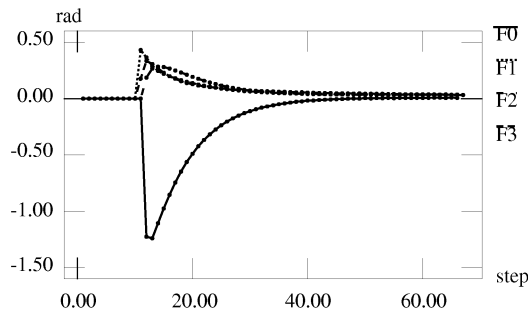


Fig. 11 Oscillator interaction in adapted locomotion. The interaction decrease with adaptation.

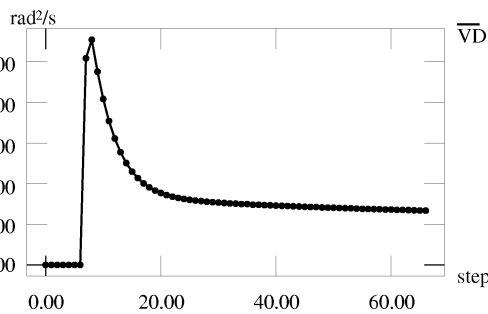


Fig. 12 Evaluation function V_D , which decrease with adaptation.

る。(15)–(17)式は相互作用の偏りを分散させるはたらきがあり、結果的に相互作用の2乗和の積分値 V_D

$$V_D = \int_T \sum_{i=0}^3 \left\{ \frac{1}{2\tau\theta_i} f_i^2 \right\} dt \quad (18)$$

を小さくする。すなわち、(18)式のポテンシャル関数に従う勾配系による発展方程式は、

$$\frac{dD_j}{dt} = -\tau_D \frac{\partial V_D}{\partial D_j} \quad (j = 0, 1, 2) \quad (19)$$

となり、(4)–(7)式を代入して計算すると(15)–(17)式が得られる。

2.3.3 シミュレーション

前節の適応ダイナミクスを適用してシミュレーションを行った。gait diagramをFig. 10に、 F_i ((12)式)および V_D の変化をそれぞれFig. 11とFig. 12に示す。また、Fig. 13とFig. 14はそれぞれ適応ダイナミクスにしたがう遊脚相の角速度および目標位相差の変化を表している。これらより、一周期あたりの発振器間の相互作用が小さくなるように、記憶した歩行パターンのパラメータが調節されていることが

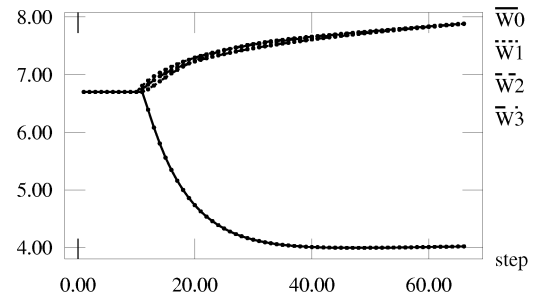


Fig. 13 Change of ω_i ($i = 0, 1, 2, 3$) by adaptation.

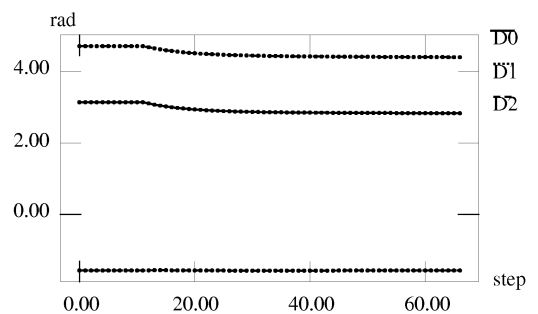


Fig. 14 Change of D_j ($j = 0, 1, 2$) by adaptation.

わかる。また適応ダイナミクスにより得られる歩行パターンFig. 10は、ネコの実験結果Fig. 2(c)によく似ている。さらに、シミュレーションでの摂動および適応による歩行周期・支持脚相・遊脚相の長さの変化をFig. 15に示す。これは第1章で述べた除脳ネコの実験結果Fig. 16とよく一致している(実験の詳細は文献^{12)~14)}を参照)。なお、シミュレーションでは除脳ネコの実験結果を参照し、各ダイナミクスの時定数を $\tau_{\theta_i} = 2.0$ ($i = 0, 1, 2, 3$)、 $\tau_w = 0.25$ 、 $\tau_D = 0.02$ とした。

3. リズム運動の環境適応について

3.1 一般的性質

本稿では、リズムパターンの形成に関するパラメータを環境の変化に合うように調節することが環境適応の本質であると考えられる。このパラメータには、システムの要素自身の特性を表すものと要素間の結合関係(相互作用で収束する状態)を記述するものがある。これらのパラメータによりリズム運動を表現するアトラクタが変化して、環境適応が達成される。この解釈のもとでリズム運動全般に共通する環境適応の性質について考察する。

(1) リズム運動パターンの記憶

リズム運動は一般に再現性がある。よって運動パターンが、例えば歩行運動での各発振器の固有振動数や発振器間にはたらく相互作用の目標位相差のように、何らかの形で記憶されていると考えられる。

(2) 記憶したパターンの調整

変化した環境にふさわしいパターンがすでに記憶されている場合は、そのパターンを想起し運動を行えばよい。しか

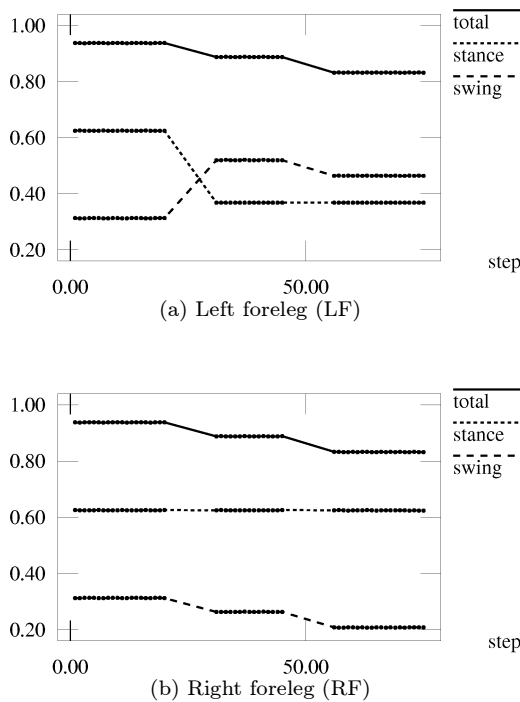


Fig. 15 The duration of swing phase, stance phase and step cycle for left and right foreleg (LF and RF) by simulation. The first stage (20 steps) is normal locomotion, the second (15 steps) is perturbed locomotion before adaptation and the last one (20 steps) is adapted locomotion.

し未だ経験したことの無い環境に対しては、それに合うパターンが記憶されているとは限らない。このときリズム運動を行いながら、環境に適するよう常に記憶したパターンを修正する必要がある。

(3) 環境の変動

常にランダムに変化する環境下では、CPGのようにフィード・フォワード的に生成するパターンで対応するのは不可能である。ある環境に対応したパターンが生成されるためには、その環境がある程度持続しなければならない。

(4) 環境適応のタイムスケール

適応のためには現在記憶しているパターンがどの程度環境に適しているのかを評価しなければならない。その評価のためには実際に運動を行う必要がある。運動後の評価によりパターンの修正が行われる。したがって、適応の速度は運動パターン生成のダイナミクスよりも十分ゆっくりしたものでないといけない。

(5) 適応の収束

記憶したパターンが常に調節されているとすれば、環境がそれに匹敵する速度で変化しては修正されるパターンは収束しない。すなわち一定とみなせる環境下で与えられた運動を何回も繰り返し行うことが必要である。そして、その繰り返しの過程で、適応のために必要となる環境情報が環境との相互作用をとおして認識されなければならない。

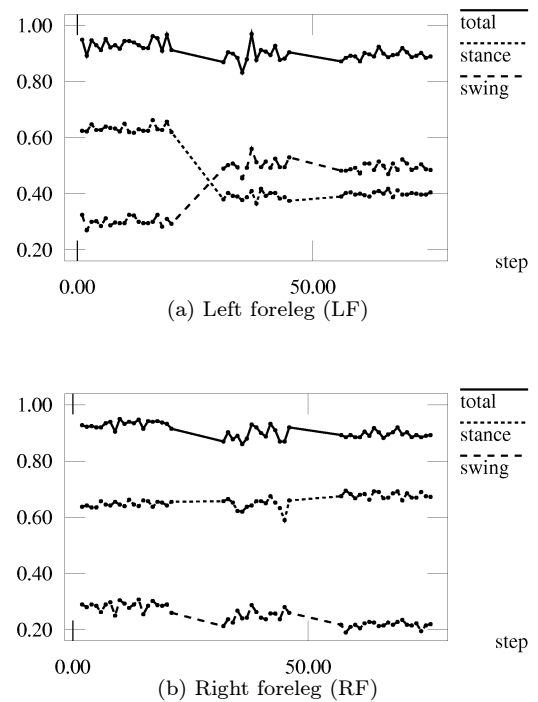


Fig. 16 The duration of swing phase, stance phase and step cycle for left and right foreleg (LF and RF) by experiment with decerebrate cat. Each stage is the same in Fig. 15

3.2 リズム運動の環境適応モデル

前節の考察をもとに、リズム運動における環境適応の枠組みを **Fig. 17** に提案する。 x はリズム運動を記述する状態変数、 y は環境の状態変数、 λ はリズムパターンを表現するパラメータ、 μ は環境を指定するパラメータである。

(a) 環境ダイナミクス (Environment Dynamics)

環境を記述するパラメータ μ をもとに環境のダイナミクスを規定する。適応が行われるためには μ はある期間一定である必要がある。(8)式に対応する。

(b) リズム運動ダイナミクス (Rhythmic Motion Dynamics)

環境からの作用をとおして、記憶したパラメータ λ で表されるリズム運動 (x 空間内のパターン) を生成する。このとき生成される運動は適切であるとは限らない。(2)-(7)式に対応する。

(c) 適応ダイナミクス (Adaptation Dynamics)

生成されたリズム運動が環境に対して適切でない場合、記憶したパターンのパラメータ λ を修正する。適切でないということはその運動に対してある意味で評価を与えており、何らかの評価関数 $E(x)$ が存在することを意味する。また運動を評価した後パターンの修正を行うことから、 λ のダイナミクスは x に比べて十分遅くなければならない。(14)-(17)式に対応する。

本稿では、 $x = [\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3]$ 、 $y = [\rho_0, \rho_1, \rho_2, \rho_3]$ 、 $\lambda = [\omega_0, \omega_1, \omega_2, \omega_3, D_0, D_1, D_2]$ 、 $\mu = [\mu_0, \mu_1, \mu_2, \mu_3]$ となる。このモデルによると、適応とは環境のパラメータ μ に対して

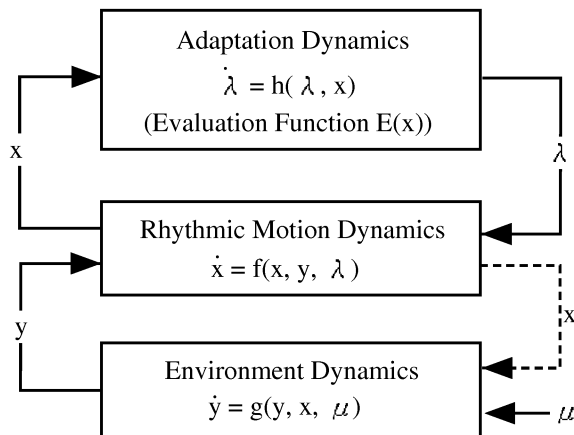


Fig. 17 Framework for Adaptation in rhythmic movements.

リズム運動パターンのパラメータ λ を対応づけることになる。これはリズム運動のダイナミクスを通して行われる。

4. 討論

ネコの歩行実験パラダイムは、リズム運動の環境適応を考える重要な条件を満たしている。それは、歩行運動に対して周期的・規則的な摂動がかけられることである。現象としてあらわれる歩行パターンは安定性を持っており、一過性の摂動では摂動前の状態に戻されてしまい適応は起こらない。また、不規則な摂動には適応は困難になる。我々のモデルでは、一過性の摂動に対する安定性と周期的・規則的な摂動に対する適応性を同時にみたし得る。そのためには、 τ_{θ_i} ($i = 0, 1, 2, 3$) に対して τ_w および τ_D を十分小さくする必要があり、パターンのパラメータつまりアトラクタの変化による適応は、この遅いダイナミクスにより達成される。大脳皮質と脳幹との神経連絡を切った除脳ネコでこの適応が達成され得るというのは、このアトラクタが小脳・脳幹のいずれかあるいは両方で表現・記憶されている可能性があると考えられる。

C P Gを用いた歩行運動のパターン生成に関して、Kimura^{8),9)}らは昆虫の6脚歩行を例に歩行速度・負荷の変化や足の切断に対する歩行パターンの変化をモデル化した。このとき発振器間の協調を負荷が分散するように設計し、協調のダイナミクスを発振器のダイナミクスに比べて十分遅くしている。速度・負荷の変化や足の切断は歩行運動に関する周期的・規則的な摂動と考えることができ、このモデル化は3.2で提案した枠組みに当てはめることができる。また、Taga^{10),11)}は人間の二足歩行を神経系と筋骨格系のダイナミクス間の相互作用で生まれる引き込み現象としてモデル化した。シミュレーションでは歩行運動が速度や負荷によって変化することが示され、real-time adaptabilityと呼んでいる。しかし、そこには遅いダイナミクスによるパラメータ調節という概念は含まれておらず、3.2の枠組みには合わない

い。それは歩行運動の現われ方が Fig. 9(b) のように摂動と相互作用の釣り合いに基づいているからである。適応とは記憶しているパターンを修正していくことと考えると3.1で示した性質が必要であり、未経験の環境に対する real-time adaptability は実現が困難なはずである。リアルタイムの環境適応については後にも議論する。

土屋¹⁷⁾は、環境に対する適応性の立場から運動制御系を複雑系ととらえ、その観点からの運動制御系の設計方法を提案している。その方法は、複雑系を構成する要素の振る舞いを記述する要素ダイナミクス(ルール)と要素間の相互作用を記述するルールダイナミクス(メタルール)で構成される。要素の莫大な自由度を拘束する方法としてオーダパラメータを導入し、それが目標値に収束するように各要素のダイナミクスを設定する。環境の変動に対しては、各要素の持つ状態の確率密度関数の目標値を変化させることによって要素ダイナミクスの変更を与える。しかし、この手法では想定される環境ごとに確率密度関数の目標値を予め設計しておく必要がある。本稿で取り上げたネコの歩行運動の場合、摂動を加えられた状態に対して運動が予め設計されていたとは考えにくく、むしろ運動を繰り返すうちに獲得されたと考えの方が自然である。そこで本稿では発振器間の相互作用を小さくするという評価基準を設け、そのためのダイナミクス(適応ダイナミクス)を構成した。システムを構成する個の局所的な相互作用により合目的な大域的秩序が形成されるには、個がそれ自身の特性を変えて協調することおよび個間の相互作用が環境によって変わることの2つが必要になる。この適応ダイナミクスは、土屋のいうルールダイナミクスに相当する。適応ダイナミクスがリズム運動ダイナミクスに比べて十分ゆっくりしたものであるという主張は、ルールダイナミクスが要素ダイナミクスに比べて十分遅いとする土屋の考えと一致する。Hakenのシナジェティクスの方法論¹⁸⁾では、時間スケールによってシステム・ダイナミクスを2つに分け、遅い方のダイナミクスで秩序パターンを形成し、また制御パラメータによる分岐で秩序パターンの遷移問題を記述しているが、適応調節過程については何も述べてはいない。これに対して、われわれの研究は、環境の変動に対する運動パターンの適応調節過程に焦点を当てている。

四足歩行では歩行速度に応じて歩行パターンが変化する。これはリアルタイムで行われる一種の環境適応と考えられる。この種の環境適応はここで取り上げたネコの歩行実験で見られる環境適応とは置かれる環境が経験済みか未経験かという点で性質が異なる。本稿での周期的摂動に対する環境適応は記憶した一つのパターンを未だ経験したことのない摂動のある環境に合うように修正することなのに対し、歩行速度に応じた環境適応はすでに経験した環境に対して記憶した複数のパターン内での遷移を行うことだからである。記憶したパターン内での遷移に関して、我々はエネルギー消費量を基準にモデル化を行った¹⁹⁾。そこでのC P Gモデルは本稿と同じものを用いている。これは二つの環境適応が同

じ枠組みで記述できる可能性を示唆している。しかし、どちらの場合にも、それぞれの歩行パターンが最初にどのようなように記憶されたのかが問題となる。歩行運動では、幼児にみられる反射歩行²⁰⁾のように生まれながらのリズム生成機構が備わっていると考えられている。したがって、運動が生成できるある程度のパターンが先天的に与えられると仮定して、それ以上の議論はここでは行わない。

5. おわりに

ネコの摂動下の歩行運動を例にリズム運動の環境適応について考察した。記憶したパターンのパラメータを発振器間の相互作用が小さくなるように調整することで、新しい環境に適応する歩行パターンが得られた。

本稿のモデル化に関する今後の課題の一つとして、筋骨格系を考慮してリズム運動ダイナミクスおよび適応ダイナミクスを構築することがある。例えば、適応ダイナミクスにより遊脚相の角速度を調節しているが、それはあまり遅くはできないはずである。遊脚相の角速度を遅くすると遊脚時間が長くなり、そのぶん接地率が小さくなる。接地率が小さくなることは、体幹を支える脚の平均本数が減少することに対応するので、体幹のバランスがとりにくくなるからである。しかし、姿勢の安定性に基づく遊脚相角速度の制限は、バランスが評価できる筋骨格系のモデルなしでは得ることはできない。

参考文献

- 1) 川人光男：脳の計算理論，産業図書，(1996)
- 2) 森 茂美：歩行の神経生理，リハビリテーション工学国際セミナー講演論文集，1-2-1-15，(1990)
- 3) Fred Delcomyn：Neural Basis of Rhythmic Behavior in Animals Science, **210**-31, 492/498 (1980)
- 4) Sten Grillner：Neurobiological Bases of Rhythmic Motor Acts in Vertebrates, Science, **228**, 143/149 (1985)
- 5) A.H.Cohen, P.J.Holmes, R.H.Rand：The Nature of the Coupling Between Segmental Oscillators of the Lamprey Spinal Generator for Locomotion：A mathematical Model, Journal of Mathematical Biology **13**, 345/369 (1982)
- 6) J.J Colins, S.A.Richmond：Hard-wired central pattern generators for quadrupedal locomotion, Biological Cybernetics **71**, 375/385 (1994)
- 7) 湯浅秀男、伊藤正美：自律分散システムの構造理論，計測自動制御学会論文集，**25**-12, 1355/1362 (1989)
- 8) S.Kimura, M.Yano, H.Shimizu：A self-organizing model of walking patterns of insects, Biological Cybernetics **69**, 183/193 (1993)
- 9) S.Kimura, M.Yano, H.Shimizu：A self-organizing model of walking patterns of insects II, Biological Cybernetics **70**, 505/512 (1994)
- 10) Gentaro Taga：A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion, I. Emergence of basic gait, Biological Cybernetics **73**, 97/111 (1995)
- 11) Gentaro Taga：A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion, II. Real-time adaptability under various constraints, Biological Cybernetics **73**, 113/121 (1995)
- 12) Dai Yanagihara, Masao Udo, Ikio Kondo and Tadayoshi Yoshida：A new learning paradigm: adaptive changes in

- inter limb coordination during perturbed locomotion in decerebrate cats, Neuroscience Research, **18**, 241/244 (1993)
- 13) 柳原 大：歩行の適応，生体の科学，**45**-5, 402/403 (1994)
 - 14) Dai Yanagihara, Ikuo Kondo: Nitric oxide plays a key role in adaptive control of locomotion in cat, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **93**, 13292/13297 (1996)
 - 15) 三浦康治，湯浅秀男，伊藤正美，柳原 大：発振器の協調による四足歩行パターン発生器モデルの挙動，一本の脚が別の速度でドライブされる場合，第8回自律分散システム・シンポジウム資料，151/154 (1996)
 - 16) 三浦康治：発振器の協調による四足歩行パターン発生器モデルの挙動に関する研究，名古屋大学大学院工学研究科修士学位論文 (1996)
 - 17) 土屋和雄：創発システムによる情報処理，運動制御の考え方 SICE セミナー「創発システムの設計と制御」(1996)
 - 18) Hermann Haken 著，牧島邦夫，小森尚志 訳：協同現象の数理，東海大学出版会 (1980)
 - 19) 伊藤 聡，湯浅秀男，伊藤宏司：エネルギー消費量による四足歩行パターン遷移の発振器—力学モデル，計測自動制御学会論文集，**32**-10, 1535/1542 (1996)
 - 20) Thelen E and Smith LB: A dynamic system approach to the development of cognition and action, MIT press (1994)

《付 録》

A. 位相差のダイナミクス

(4) から (7) 式を (3) 式へ代入すると

$$\dot{\theta}_0 = \omega_0 + \tau_{\theta_0}(\theta_1 + \theta_3 - 2\theta_0 - D_0 - D_1), \quad (\text{A. 1})$$

$$\dot{\theta}_1 = \omega_1 + \tau_{\theta_1}(\theta_0 + \theta_2 - 2\theta_1 + D_0 - D_2), \quad (\text{A. 2})$$

$$\dot{\theta}_2 = \omega_2 + \tau_{\theta_2}(\theta_1 - \theta_2 + D_2), \quad (\text{A. 3})$$

$$\dot{\theta}_3 = \omega_3 + \tau_{\theta_3}(\theta_0 - \theta_3 + D_1). \quad (\text{A. 4})$$

が得られる。このとき位相差 $\phi_0 = \theta_1 - \theta_0$, $\phi_1 = \theta_3 - \theta_0$, $\phi_2 = \theta_2 - \theta_1$ のダイナミクスは

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_0 &= \omega_1 - \omega_0 + \tau_{\theta_1}(-\phi_0 + \phi_2 + D_0 - D_2) \\ &\quad - \tau_{\theta_0}(\phi_0 + \phi_1 - D_0 - D_1), \end{aligned} \quad (\text{A. 5})$$

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_1 &= \omega_3 - \omega_0 + \tau_{\theta_3}(-\phi_1 + D_1) \\ &\quad - \tau_{\theta_0}(\phi_0 + \phi_1 - D_0 - D_1), \end{aligned} \quad (\text{A. 6})$$

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_2 &= \omega_2 - \omega_1 + \tau_{\theta_2}(-\phi_2 + D_2) \\ &\quad - \tau_{\theta_1}(-\phi_0 + \phi_2 + D_0 - D_2). \end{aligned} \quad (\text{A. 7})$$

となる。このダイナミクスは次のポテンシャル関数 V の勾配系，すなわち $\dot{\phi}_j = -\partial V / \partial \phi_j$, ($j = 0, 1, 2$) として記述できる。

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2} \{ \tau_{\theta_0}(\phi_0 + \phi_1 - D_0 - D_1) + \omega_0 \}^2 \\ &\quad + \{ \tau_{\theta_1}(-\phi_0 + \phi_2 + D_0 - D_2) + \omega_1 \}^2 \\ &\quad + \{ \tau_{\theta_2}(-\phi_2 + D_2) + \omega_2 \}^2 \\ &\quad + \{ \tau_{\theta_3}(-\phi_1 + D_1) + \omega_3 \}^2 \end{aligned} \quad (\text{A. 8})$$

B. 遊脚相角速度の調整

遊脚相でのダイナミクスは

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + f_i \quad (i = 0, 1, 2, 3) \quad (\text{B. 1})$$

で与えられる。これを遊脚時間内で積分すると

