

# 環境の変化に適応する四足歩行ロボットシステム

伊藤 聡<sup>\*1</sup> 湯浅 秀男<sup>\*2</sup> 羅 志偉<sup>\*1</sup>  
伊藤 正美<sup>\*1</sup> 柳原 大<sup>\*3</sup>

## Quadrupedal Robot System Adapting to Environmental Changes

Satoshi Ito<sup>\*1</sup>, Hideo Yuasa<sup>\*2</sup>, Zhi-wei Luo<sup>\*1</sup>,  
Masami Ito<sup>\*1</sup> and Dai Yanagihara<sup>\*3</sup>

Animals change their gait patterns with environmental conditions. The adaptive changes of gait patterns can be observed in the experiment where a decerebrate cat was forced to walk on the treadmill. This experiment suggests that cats should memorize the locomotion pattern and adjust it in adaptation process. From this point of view, we control the quadruped walking robot to behave adaptively on the treadmill like this cat. For the control and adaptation law, we take the decentralized approach: each four limb is regarded as subsystem, and pattern generation and adaptation is achieved with only the local interaction among four subsystems. Such a system structure is supposed to be important on the adaptability and flexibility.

**Key Words:** Adaptive Learning, Quadruped Robot, Locomotion Pattern, Rhythm Generator, Parallel Processing

### 1. はじめに

#### 1.1 研究背景

動物は非常に多様な動きを示す。その運動の多様性は、動物が非常にたくさんの運動の自由度を持つことに起因する。しかし、自由度の多さは運動の多様性を生み出す反面、一つの運動に対して膨大な計算量を要求する。その解決法の一つとして、動物は運動のパターン化を行っている。歩行運動においては、それは歩行パターンとして知られている。特に四足動物では、速度や負荷などの違いによって現れるいくつかのパターンが報告されている [1]~[4]。

歩行のパターンは、その高い再現性により、何らかのかたちで記憶されていると考えられる。そして環境条件の変動に伴い、動物はその記憶しているパターンを変化させることができる。これは特殊なトレッドミルを用いた除脳ネコの歩行実験においても観察される [5][6]。その実験では、左右の前脚でトレッドミルの速度が異なるような環境に、ネコが記憶した歩行パターンを変化させて適応することが報告されている (第 1.2 節参照)。我々はこれまでにこのネコの歩行実験で観察される適応的な振舞いの数理的なモデルを提案してきた [7][8]。本研究で

は、その数理モデルに基づいた歩行の適応を、ロボットによって実現することを試みる。

運動のパターン化のほかに、動物は並列分散的な情報処理により計算量の軽減を図っている。例えば、歩行パターンすなわち歩行運動のリズムの生成では、高次の神経系による集中的な制御は行われていない。歩行のリズムは、脊髄にある神経振動子が局所的に相互作用することで、自己組織的に生成されている [9]~[12]。このような並列分散的なシステム構造は、ここで考える適応性・柔軟性を実現する上で重要である [13]。我々が提案した数理モデルも、自律分散的なアプローチに基づいて構成されている。ここでいう自律分散とは、局所並列的な部分系間の相互作用による大域的なパターンの自己組織化を意味する。本研究では、提案した数理モデルを、歩行ロボットの運動方程式を含めた非線形力学系として発展させるが、その制御系に対しても自律分散的なシステム構成を継承するよう考慮した。

歩行パターンの生成に関しては、発振器を用いたリズム生成器のモデルが多く提案されている [14]~[18]。しかし、我々の提案してきた数理モデル [7][8] も含めて、これらの多くはロボットによる実験を行っていない。我々は、適応には環境からの物理的影響が重要な要因であると考えている。歩行ロボットの実験では、この物理的な相互作用をとおした理論検証が可能であり、適応的な振舞いを物理系における現実の運動として実現することは大きな意味がある。歩行ロボットの研究のなかでは、歩行ロボットを転倒させずにいかに推進させるかは重要なテーマの一つである。歩行ロボットの安定性に関しては、実際

原稿受付 1998年7月27日

<sup>\*1</sup>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

<sup>\*2</sup>名古屋大学大学院工学研究科

<sup>\*3</sup>理化学研究所脳科学総合研究センター

<sup>\*1</sup>Bio-Mimetic Control Research Center (RIKEN)

<sup>\*2</sup>Graduate School of Engineering, Nagoya University

<sup>\*3</sup>Brain Science Institute (RIKEN)

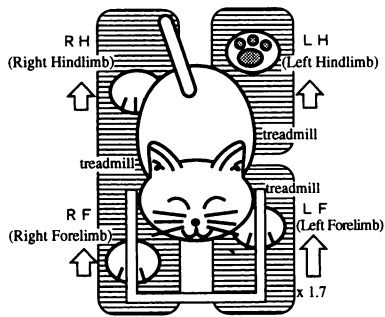


Fig. 1 Experiment for adaptive locomotion with a decerebrate cat

に歩行ロボット（特に2足）を用いた多くの研究が報告されている[19]~[24]。しかし、本研究はそれらの研究とは焦点が異なり、環境適応により歩行パターンが変化することに重点をおく。したがって、歩行ロボットの環境適応の実現の第一段階として、歩行機械の安定性の問題は考えないこととする。

本稿の構成は以下のものである。本章の残りでは、我々が考えるトレッドミル上の歩行実験におけるネコの適応的振舞いと、それに対して我々が提案した数理モデルについて述べる。第2章では、実験用に製作した四足歩行ロボットとトレッドミルに関して説明する。第3章では、四足歩行ロボットの制御方法、第4章では環境変化に対する適応則について述べる。このロボットの制御方法および適応則は、提案した適応の数理モデルでの並列分散的な構成が保たれるよう工夫している。これらの制御方法を用いた歩行ロボットによる実験の結果を第5章に示し、最後の節にまとめを与える。

## 1.2 除脳ネコの歩行実験における適応

除脳ネコとは、大脳皮質や大脳基底核などといった高次の神経系とそれより下位の神経系との連絡を外科的に切断したネコである。除脳の目的の一つは、観察された現象が高次神経系の関与を必要としないことを示せる点にある。この除脳ネコを用いて、柳原らは、運動の適応調節に、小脳における一酸化窒素を介したシナプスの可塑性が重要な役割を果たしていることを示した[5][6]。

その実験では、除脳ネコを Fig. 1に示すようなトレッドミル上で歩行させる。このトレッドミルには三つのベルトがあり、それぞれ異なった速度で駆動できるようになっている。実験は脳内の細胞活動を記録するため、ネコの頭部を固定して行う。最初、すべてのベルトをそれぞれ同じ速度（36[cm/s]）で駆動して実験を行う。このとき除脳ネコは、健常なネコと同じ walk という歩行パターンで歩行する。次に、左前脚のベルトだけを約1.7倍の速度（61[cm/s]）で、他の二つは先と同じ速度（36[cm/s]）で駆動するという条件で実験を行う。ネコは最初は定常的なパターンで歩くことができないが、しばらくすると walk とは違った新しいパターンで歩行するようになる。次に、ネコに数分の休息を与え再び左前脚のベルトのみ速い環境で実験を行う。すると、新しい歩行パターンを獲得してしまった後では、その獲得したパターンが最初の一歩目から現れる。つまり適応後は学習の期間は必要としない。

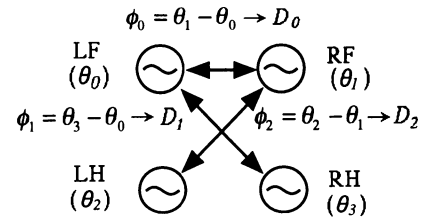


Fig. 2 Structure of rhythm generator consisting of four oscillators

この実験により、除脳ネコは歩行時のリズムすなわち脚運動の位相関係を歩行パターンとして記憶し、また、その記憶しているパターンを環境条件に応じて変化させていることが分かる。

## 1.3 歩行の適応と数理モデル

### 1.3.1 歩行リズムの生成原理

神経生理学的実験によると、脊椎動物の場合、歩行運動のリズムは脊髄にある神経振動子群の相互作用によって自己組織的に生成される。この見解に基づき、我々は Fig. 2 に示すように、四つの発振器を結合して歩行運動のリズム生成器を構成した[8]。各発振器はそれぞれの脚運動のタイミングの生成すなわち各脚の運動計画を司る。このとき歩行パターンは、おもに四つの発振器間の位相差で表現できる。したがって歩行パターンの生成は、位相差の制御と等価になる。

結合発振器系の位相差の制御に関して、湯浅らは勾配系を用いる方法を提案している[14]。その手法では、各発振器を自律的な挙動を示す部分系とみなし、パターンを各部分系間の定常的な関係として捉える。そして、その関係を満たす状態が唯一の極小点となるようなポテンシャル関数の構成方法に関する十分条件を与えている。

我々の提案した数理モデルでは、この手法を利用している。このとき定常的な関係とは各発振器の位相の差の関係  $\phi_0 = \theta_1 - \theta_0$ ,  $\phi_1 = \theta_3 - \theta_0$ ,  $\phi_2 = \theta_2 - \theta_1$  である。したがって、ポテンシャル関数は位相差空間に唯一の極小点  $\phi_j = D_j$ , ( $j = 0, 1, 2$ ) を持つ関数として記述される（付録 A 参照）。 $D_j$  は  $\phi_j$  の目標値である。

### 1.3.2 適応メカニズム

勾配系に従うと、定常状態では各位相差  $\phi_j$  ( $j = 0, 1, 2$ ) はポテンシャル関数の唯一の極小点に対応するそれぞれの目標値  $D_j$  ( $j = 0, 1, 2$ ) に収束することが保証される。このときの状態は Fig. 3 (a) のようにポテンシャルの極小点にとどまる。ポテンシャルの勾配は目標パターンに収束させる力である[7]から、現れたパターンは安定となる。つまり、Fig. 3 (a) の状態に一過性の摂動が加わっても、勾配系のダイナミクスによりもとのパターンが復元される。ここで目標パターンが形成されているとき、ポテンシャルの勾配が零、言い換えると発振器間に相互作用が働いていない状態となることに注意する。

トレッドミルの速度が変化した場合、一過性の摂動の場合とは異なり、歩行運動に加わる摂動は周期的となる。これは左前脚がトレッドミル上におかれるごとに規則的に摂動を受けるからである。このような場合、パターンが目標パターンに収束する前に、次の摂動が再び歩行運動に加わることになる。長い時

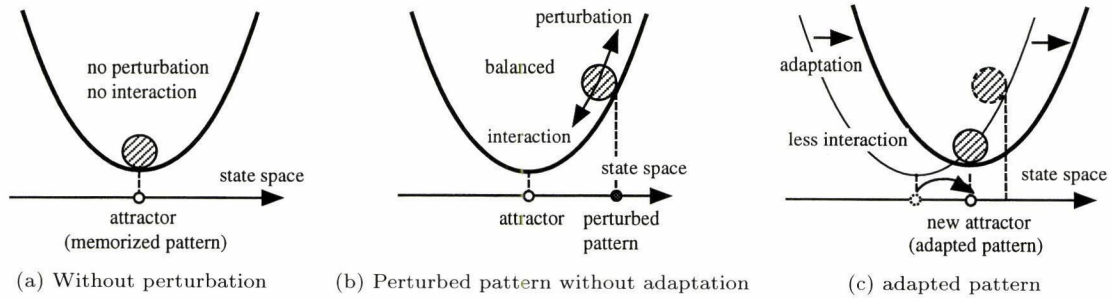


Fig. 3 Mechanism of adaptation in perturbed locomotion

間スケールでみると、Fig. 3 (b) のように、ポテンシャルの勾配と環境からの力が釣り合った状態となる。

Fig. 3 (b) では、望ましいパターンを実現しようとする勾配の力が常に加わっている。しかし目標パターンは実現されない。このような状態になった原因は、目標パターンが新しい環境に合っておらず、その環境下では実現が不可能であったためであると考えられる。そこで、勾配からの力で目標パターンが実現されるように、つまり、勾配の力が小さくなるように、ポテンシャルの極小点そのものをゆっくりと変化させる (Fig. 3 (c))。これは発振器間の相互作用が小さくなるように記憶した目標パターンをゆっくりと変化させることと等しい [7] [8]。我々は、このような目標パターンの調節過程を適応と考える。勾配系に基づいた適応の数式表現は付録 B, C 章に述べる。

## 2. 実験システムの開発

### 2.1 四足歩行ロボットの設計

歩行ロボットは、Fig. 4 (a) のように、各脚を一つのユニットとみなして製作し、それら四つを機械的に結合することによって構成する。

歩行ロボットはトレッドミル上を歩行するため、電源やコントローラは外部に固定設置でき、ケーブルを通して本体と結合する。各ユニットはモータおよび減速ギア、それらを固定する胴部、脚部から成り、総重量は約 1.7 [kg] である。

Fig. 4 (b) に各脚の構造を示す。各ユニットは股関節と膝関節の 2 自由度をもった一本の脚を有する。上腿部、下腿部のリンクはジュラルミン製で、ともに長さは 8.5 [cm] である。それらはタイミングベルトおよび減速ギア (1/10.6) をとおして上部に取り付けた AC サーボモータ (30 [W]) で駆動される。二つの関節角度はモータのエンコーダにより算出する。使用するモータの性能を Table 1 に示す。股関節を動かす範囲を鉛直方向から前後に  $\pm 30$  度以内とすると、このモータは 1 ユニットの支持し加減速するのに十分である。また、床反力を計測するため、各脚にはひずみゲージ式変換器を下腿部に取り付ける。ひずみゲージ式変換器の性能を Table 2 に示す。

歩行ロボットの足底には直径 20 [mm]、長さ 10 [cm] のアルミ製丸パイプを使用する。足底を進行方向に丸くとると、床面上を転がることにより足首に相当する自由度が自由関節として確保できる。また、足底の幅を比較的長くとることで、左右のバランスが確保され運動が矢状面内に限定されることが期待できる。トレッドミル上で足が滑らないように、パイプの表面に

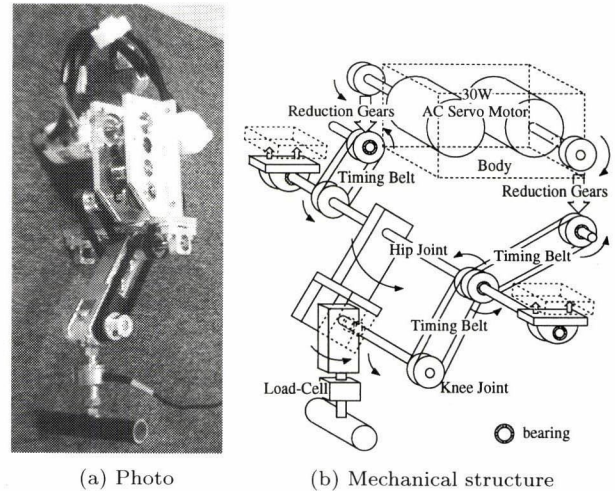


Fig. 4 Mechanical structure of one leg of a quadruped robot

Table 1 Specifications of motors in the robot system

Rated output	30 [W]	100 [W]
Rated torque	0.095 [N·m]	0.32 [N·m]
Max. torque	0.28 [N·m]	0.95 [N·m]
Rated speed	3,000 [r/min]	3,000 [r/min]
Max. speed	5,000 [r/min]	5,000 [r/min]
Gear ratio	1/1	1/11
Weight	0.24 [kg]	1.7 [kg]
Usage	locomotion robot	treadmill

Table 2 Specifications of strain gage transductor

	Specifications
Rated load	$\pm 5.0$ [kgf]
Admissible	150%
Rated output	0.4 [mV/V] (more than $800 \times 10^{-6}$ )
Weight	about 80 [g]

ゴムを張り、トレッドミルとの間に十分大きな摩擦を確保する。

### 2.2 トレッドミルの構成

除脳ネコの実験では、トレッドミルは三つのベルトで作られていた。しかしここでは作りやすさを考慮して、同一の小型トレッドミルを四つ製作し、それらを結合することで一つのトレッドミルを構成する。小型トレッドミルには 100 [W] の AC サーボ・モータ (Table 1 参照) をそれぞれに一つずつ使用する。したがって各脚がのせられるベルトをそれぞれ独立に駆動

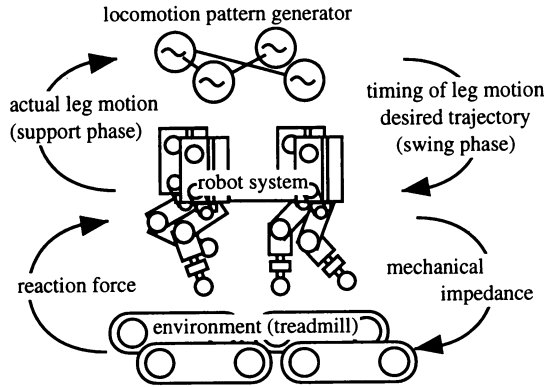


Fig. 5 A flow in control for quadrupedal robot system with pattern generator

することが可能である。

### 3. 歩行ロボットの脚運動の制御

#### 3.1 リズム生成器に基づく歩行制御

歩行の制御には第 1.3 節で紹介した数理モデルを用いる。Fig. 5 に歩行制御の流れを示す。歩行のパターン生成器は、各脚間の協調関係つまり位相関係を構築する。そして各脚は、基本的には、歩行パターン生成器の出力するリズムに基づいて運動を行う。つまり、脚をいつ接地させ、どのタイミングで地面からはなすのかは、すべて各脚の発振器の位相から判断し制御を行う。しかし、非対称なベルトの速度変化のように、環境条件によっては、歩行パターン生成器の構成した脚間の協調関係が崩され、目標とする位相差では歩行ができない場合が生じる。そのとき、環境に合うように協調関係を再構成しなければならない。その再構成が適応であり、ここでは Fig. 3 に示した考え方により行う。ところで、適応には、ベルトの速度などの環境変化が歩行パターン生成器にフィードバックされる必要がある。これは発振器の位相を、ベルトに従った脚の運動に応じて更新することで可能になる。

#### 3.2 脚のリンク・モデル

ネコの実験では、ネコは頭部を固定され、その状態でトレッドミル上を歩行している。そのような状態でも歩行運動を滑らかに遂行するためには平衡感覚は必要であり、転倒を防ぐ平衡の問題は取り扱うべき重要な問題である。しかし、除脳ネコの実験において、平衡が崩れたとしてもネコが完全に転倒することはない。つまり転倒させられず強制的にトレッドミル上を歩かされるうちに、ネコは新しい環境に適応していく。そのような適応過程に焦点を当てるため、本稿では胴部は固定されて、脚のみが動くものとして考える。脚の運動は前後に動かすことが主となる。したがって、脚運動は矢状面内に限定できる。さらに簡単のため、歩幅は一定であり、足先はトレッドミルと点接触をして滑らないと仮定する。

このような仮定の下では、歩行ロボットは、四つの独立した脚の運動方程式で記述でき、そのおのおのは平面内を動く二重振り子の方程式として与えられる。

$$M_i(q_i)\ddot{q}_i + H_i(q_i, \dot{q}_i) + G_i(q_i) = \tau_i + J^T(q_i)F_i, \quad (1)$$

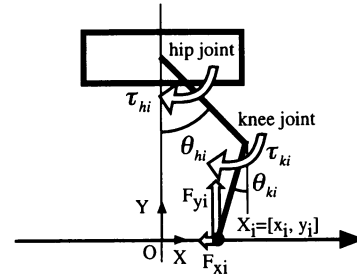


Fig. 6 A link model of one limb. Each limb has the same structure

ここで、 $i(i = 0, 1, 2, 3)$  は脚の番号、 $q_i = [q_{hi}, q_{ki}]^T$ 、 $q_{hi}$ 、 $q_{ki}$  はそれぞれ股関節、膝関節角度、 $T$  は行列の転置、 $\tau_i = [\tau_{hi}, \tau_{ki}]^T$ 、 $\tau_{hi}$ 、 $\tau_{ki}$  はそれぞれ股関節、膝関節の出力トルク、 $M_i$  は慣性行列、 $H_i$  はコリオリ・遠心力項、 $G_i$  は重力項、 $F_i = [F_{xi}, F_{yi}]$ 、 $F_{xi}$ 、 $F_{yi}$  はそれぞれトレッドミルからの水平方向、垂直方向の反力、 $J$  は関節空間から歩行空間へのヤコビ行列である。なお、Fig. 6 に示すように、股関節からトレッドミルに下ろした垂線の足を各歩行空間の原点とした。

#### 3.3 支持脚相・遊脚相の判定

脚運動には、脚が床つまりトレッドミルに接地している支持脚相と、床から離れている遊脚相の二つの相がある。トレッドミルの動きの影響を受けるか否かの違いにより、それらの相では脚運動のダイナミクスに大きな違いが生じる。したがって、目標軌道の計画、制御とも二つの相で分けて考える。

脚運動における二つの相の判定は床反力によって行う。床反力の垂直成分  $F_{yi}(i = 0, 1, 2, 3)$  が、ある値 ( $F_Y$ ) より小さければ遊脚相、それ以外は支持脚相として扱う。また各発振器は、脚運動のタイミングを取るために、対応する脚が周期的なステップ動作のなかのどの位相にあるのかをモニターしていなければならない。そこで Fig. 7 に示すように、発振器では位相空間  $[0, 2\pi)$  を二つに分割し、 $[\pi\beta, (2 - \beta)\pi)$  のときを遊脚相、他を支持脚相として表現する。 $\beta$  は接地率と呼ばれ一歩行周期に占める支持脚相の割合を表す。

歩行運動時には、発振器の位相と脚運動の位相<sup>†</sup>とが一致するように工夫する。そのために遊脚相では発振器の位相に合わせるように脚の運動を制御し、逆に支持脚相では脚の運動に応じて発振器の位相を更新する。注意すべきことは、脚運動の軌道計画は発振器の状態すなわち支持脚相か遊脚相かによって切り換え、脚の運動制御は実際に脚が接地しているかどうかに基づいてその制御則を決める点である。つまり、発振器では支持脚相であっても実際の脚はまだ床に接地していない状況も起こりえる。この場合、支持脚相として生成した目標軌道に対し遊脚とみなした制御を行う。

#### 3.4 遊脚相での軌道計画および制御

遊脚相では、脚は床には拘束されないため自由な運動ができる。したがって、発振器を位相差空間の勾配系ダイナミクスにより時間発展させて、脚間の位相差関係を形成させる(付録 A

<sup>†</sup>この場合の位相とは、周期的な運動となる脚運動がその歩行周期のどの段階にあるかを表すものである。したがって、支持脚相・遊脚相を表すものではない。

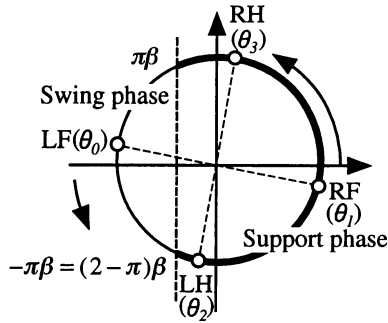


Fig. 7 Oscillator phases. These are used for making commands to limbs for taking off or touching down

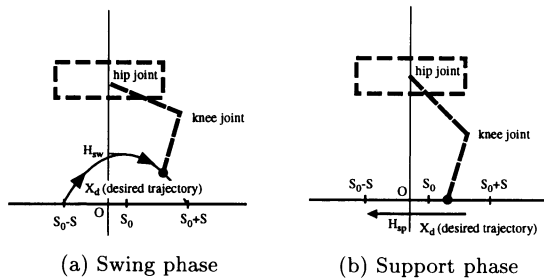


Fig. 8 Desired trajectory of toe movement

参照). これにより, 設定した発振器間の目標位相差が実現できる. 発振器の位相に基づいて脚運動の軌道生成を行いそれに追従するように制御すれば, 目標とする位相差をもつ脚間の協調関係が達成される.

脚運動の軌道計画としては, 足先の目標軌道  $X_{di}$  を考える. 歩行時の歩幅は一定と仮定したため, それを  $[S_0 + S, S_0 - S]$  とおく.  $S_0$  はステップ運動の中心,  $2S$  が歩幅となる. したがって遊脚相では発振器の位相は  $\pi\beta$  から  $(2 - \beta)\pi$  に時間発展するのに対し, 足先は座標  $(-S + S_0, 0)$  から  $(S + S_0, 0)$  まで連続的に変化する. ここでは足先が床面と衝突しないように, Fig. 8 に示すような目標軌道  $X_{di} = [x_{di}, y_{di}]$  を次式で与える.

$$x_{di} = \frac{S}{(1 - \beta)\pi}(\theta_i - \pi) + S_0, \quad (2)$$

$$y_{di} = H_{sw} \cos \pi \frac{(x_{di} - S_0)}{2S}, \quad (3)$$

$x_{di}$ ,  $y_{di}$  はそれぞれ足先の水平方向, 垂直方向の目標値,  $H_{sw}$  は遊脚における足先位置の上限である.  $\theta_i$  の時間発展の速度によって遊脚の運動の速さが変化することに注意する.

各関節トルクは足先の位置  $X_i = [x_i, y_i]$  がその目標軌道  $X_{di}$  に追従するように決定する.

$$\tau_i = J(q_i)^T [\ddot{X}_{di} + K_v(\dot{X}_{di} - \dot{X}_i) + K_p(X_{di} - X_i)], \quad (4)$$

ここで,  $K_p$ ,  $K_v$  はそれぞれ位置, 速度のフィードバック・ゲインである. 遊脚では式 (1) の床反力は零 ( $F = [0, 0]$ ) となる.

遊脚から支持脚への軌道計画の切り換えは, 発振器の位相が遊脚相の領域から支持脚相の領域に入った瞬間 ( $\theta_i = (2 - \beta)\pi$ ) に行う. この切り換えにより, 遊脚相での目標軌道式 (2)(3) が発散したり振動したりはしない.

### 3.5 支持脚相での軌道計画および制御

支持脚相では脚運動はトレッドミルの影響を受ける. 一般にトレッドミル上の歩行では, 足先がトレッドミルと同じ速度で拘束されたまま動く. そこでトレッドミルと同じ速度で動くような足先の目標軌道を生成すべきである. しかし, トレッドミルの速度は実際にトレッドミル上で歩行運動をし, トレッドミルからの力学的な作用を受けなければ検出できない. そこで取りあえずトレッドミル速度の推定値  $\hat{V}_i$  により目標軌道を生成する. もちろん推定値は実際の速度と必ずしも一致しない. この問題は歩行運動を繰り返しながら行う学習によって解決する (第 4.1 節参照). 最終的には学習によってトレッドミルの速度にあった軌道が生成できる.

発振器の位相が支持脚相にあるとき, 足先の目標軌道をトレッドミル速度の推定値  $\hat{V}_i$  を用いて

$$x_{di} = S_0 + S - \hat{V}_i^{(n)}(t - t_0^{(n)}), \quad (5)$$

$$y_{di} = H_{sp}, \quad (6)$$

で与える. ここで  $n$  は歩行のステップ数,  $t$  は現在の時刻,  $t_0^{(n)}$  は発振器の位相が支持脚相の領域 ( $\theta_i = (2 - \beta)\pi$ ) に入ったときの時刻,  $H_{sp}$  は支持脚相での足先の垂直方向の目標値である. 足先がトレッドミルに常に接触しているように  $H_{sp}$  には零より少し小さい値を設定する.

トレッドミルの速度が変化した場合, それに対応して足先の軌道も変化する必要がある. そこで脚の制御は目標軌道回りのインピーダンス制御を行い, 床反力に対する応答が

$$M_d \ddot{X}_i + D_d(\dot{X}_i - \dot{X}_{di}) + K_d(X_i - X_{di}) = F_i, \quad (7)$$

となるように各関節トルク  $\tau_i$  を決定する. ここで,  $M_d$ ,  $D_d$ ,  $K_d$  は目標とする慣性, 粘性, 弾性を表現する行列である. 特にトレッドミルの動作方向にはインピーダンスは十分に小さくしておく. すると, トレッドミルの速度変化によって加えられる足先への外力により, 脚運動が変化する.

一方, 発振器の位相は足先の変位に応じて更新する. 足先位置が最後部の  $(-S + S_0, 0)$  に達したときに発振器の位相  $\theta_i$  が支持脚相から遊脚相に移る ( $\theta_i = \pi\beta$ ) ように, 足先位置の関数として

$$\theta_i = -\frac{2\pi\beta}{S - S_0 + x_{0i}^{(n)}}(x_i - x_{0i}^{(n)}) - \pi\beta, \quad (8)$$

で与える.  $x_{0i}^{(n)}$  は脚が接地した瞬間の足先の水平位置である. また, 位相空間の周期性より, 支持脚相は  $[-\pi\beta, \pi\beta]$  として考えた. 式 (8) は足先位置の発振器への感覚フィードバックに対応する. 理論的には足先位置は支持脚相の最初で  $(S + S_0, 0)$  に制御されるはずであり, 式 (8) は  $x_{0i}^{(n)} = S + S_0$  として

$$\theta_i = -\frac{\pi\beta}{S}(x_i - S - S_0) - \pi\beta, \quad (9)$$

と与えられるべきである. しかし実際に制御してみると, 定常偏差や時間遅れのために完全には  $x_{0i}^{(n)} = S + S_0$  とはならない. 式 (8) はそのずれを吸収するように設計した. 以上をまと

めると、発振器の位相の時間発展は、支持脚相では式(8)で記述され、遊脚相では位相差空間の勾配系ダイナミクスに従うという非線形なものとなる。

支持脚相から遊脚相への軌道計画の切り換えも、発振器の位相により決定する。式(8)の関係より、足先位置が最後部の $(-S+S_0, 0)$ に到達したときに反射的に脚を前に踏み出すようにみえる。

#### 4. 適応調節則

##### 4.1 トレッドミル速度の学習則

トレッドミルの速度に対して、その推定値 $\hat{V}_i^{(n)}$ により生成した足先の目標軌道式(5)(6)が合っているとき、足先はトレッドミルと等速度で動く。したがって足先に対してトレッドミルから水平方向の力は加わらない(Fig. 9(a))。しかし、足先の目標軌道がトレッドミルの速度に合っていない場合は、その誤差のため足先はトレッドミルから力を受ける。トレッドミルの動作方向のインピーダンスは小さいため、足先はその力に従いトレッドミルの動きに追従する。結果として足先の位置はその目標位置からずれたものとなる(Fig. 9(b))。

Fig. 9(a)の場合も(b)の場合も、見かけはトレッドミルの動きに追従した運動であるが、両者には質的な違いがある。(a)は目標軌道と一致している点で、意図した運動を達成し能動的に動いていると考えられる。それに対し(b)は、自分のたてた目標とは異なる運動を外力により強制的に遂行させられている受動的なものとなす。

トレッドミルの速度に目標軌道が合っていれば、実際の軌道と目標軌道との間にずれは生じず、逆に誤差が大きいほどそのずれは大きくなる。学習則ではそのずれを各歩行周期の支持脚相で積分し、その大きさに応じてトレッドミル速度の推定値 $\hat{V}_i^{(n)}$ を各歩行ステップごとに修正していく。トレッドミルは水平方向しか動かないため、軌道間のずれは水平成分のみを考える。

$$\hat{V}_i^{(n+1)} = \hat{V}_i^{(n)} + \tau_V \int_{T_{sp}^{(n)}} (x_{di}^{(n)}(t) - x_i^{(n)}(t)) dt \quad (10)$$

ここで、 $T_{sp}^{(n)}$ は支持脚相の継続時間、 $\tau_V$ は学習の速さを決めるパラメータである。

##### 4.2 歩行パターンの適応則

これまでの定式化で、設定したリズム・パターンでの歩行運動と、トレッドミルの速度変化の発振器へのフィードバックが可能となった。本節では、歩行パターンの適応を考える。これ

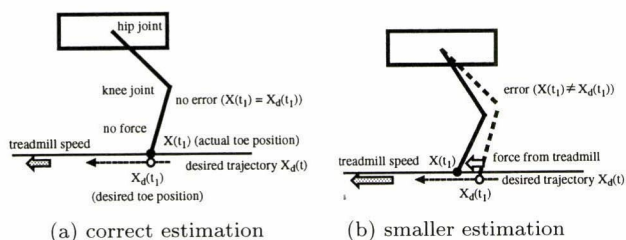


Fig. 9 Treadmill speed estimation and limb movement

は発振器の位相に反映されたトレッドミルの速度変化をもとに、生成する歩行パターンをいかに変えるかという問題である。

基本的な方針は、第1.3.2節に示した「発振器間の相互作用が小さくなるように、記憶している目標パターンをゆっくりとしたダイナミクスで変える」ことである。記憶しているパターンを表現するパラメータは、各発振器の固有振動数 $\omega_i (i=0, 1, 2, 3)$ と各脚間の目標位相差 $D_j (j=0, 1, 2)$ である。つまり、これらのパラメータを発振器間の相互作用(付録Aの式(12)~(15)で与えられる $f_0, f_1, f_2, f_3$ )が小さくなるよう付録B, Cに示すように調節する。各パラメータの調節は、一歩行サイクルごとに、歩行運動に比べて十分ゆっくりとしたタイム・スケールで行う。

#### 5. ロボット実験による考察

除脳ネコの実験では、ネコははじめに walk と呼ばれる歩行パターンを記憶している。したがって、その walk を目標パターンとして設定する。歩行周期は1秒、接地率 $\beta$ はネコの実験と同じぐらいの $\beta = \frac{2}{3}$ とする。Table 3に設定した値を示す。これらは学習の初期値となる。

この設定値のもとで、Fig. 10のように歩行ロボットをトレッドミルの上部に固定し歩行運動をさせた。トレッドミルから股関節までの高さは155[mm]であり、トレッドミルの速さは18[cm/s]、歩幅 $2S$ は12[cm]とした。トレッドミル上で実現されたロボットの歩行パターンをネコの歩行パターンとともにFig. 11に示す。

次に、左前脚のトレッドミルの速度を速め、ネコと同じように歩行パターンが適応的に変化するかを調べる。歩行を始めて

Table 3 Parameters for walk gait

natural frequencies	desired relative phases
$\omega_0 = 2\pi$	$D_0 = \pi$
$\omega_1 = 2\pi$	$D_1 = \frac{3}{2}\pi$
$\omega_2 = 2\pi$	$D_2 = -\frac{1}{2}\pi$
$\omega_3 = 2\pi$	

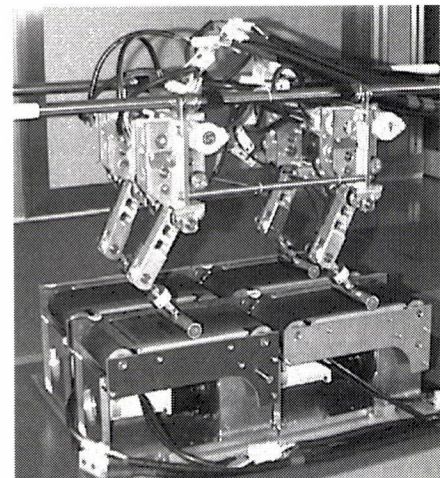


Fig. 10 Locomotion experiment of quadruped robot on treadmill

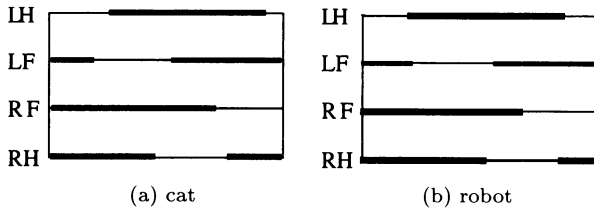


Fig. 11 Walk gait of a cat and a robot

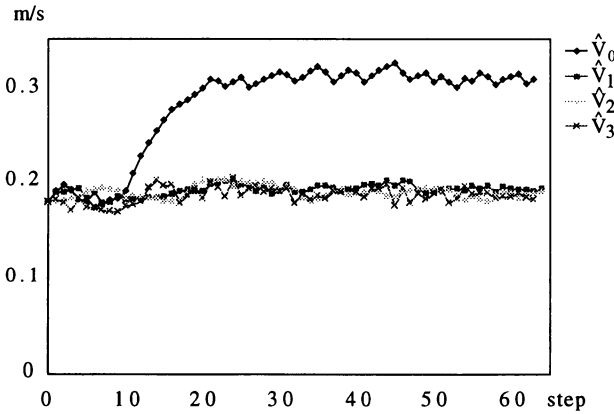


Fig. 12 Learning of treadmill speed

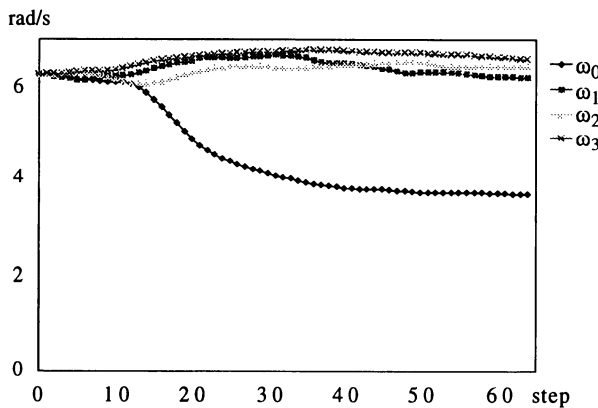


Fig. 13 Learning of natural frequencies of each four oscillators

10秒後に、除脳ネコの実験条件と同じように左前脚の速度だけを1.7倍の30.6 [cm/s]に上げた。

Fig. 12は歩行ロボットが推定したトレッドミル速度である。歩行開始から10ステップ(約10秒後)を境に、左前脚のトレッドミル速度の推定値が上昇している。これはトレッドミルの速度の学習が行われていることを示す。Fig. 13とFig. 14には各発振器の固有振動数 $\omega_i (i=0, 1, 2, 3)$ と発振器間の目標位相差 $D_j (j=0, 1, 2)$ の変化を示す。またFig. 15とFig. 16は、それぞれの適応則の評価関数に対応する $F_i (i=0, 1, 2, 3)$ (式(24))および $V_D$ (式(26))の変化である。各発振器間の相互作用が減少するように、記憶した目標パターンが変化していくことが分かる。Fig. 17に、ネコおよびロボットの実験それぞれにおいて、適応後に得られた歩行パターンを示す。ロボットの歩行パターンは歩行開始から60秒後、トレッドミル

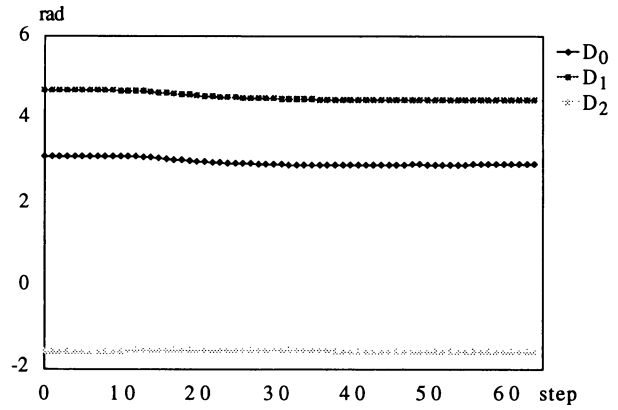


Fig. 14 Learning of desired relative phases

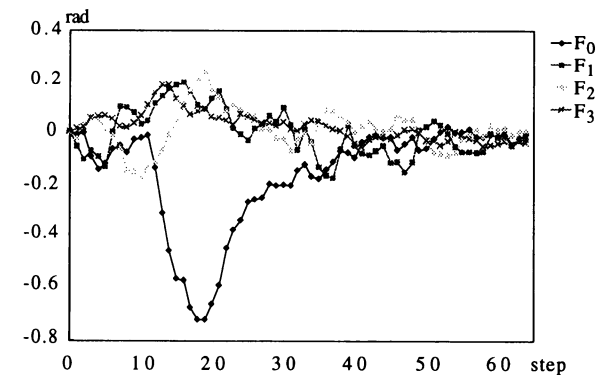


Fig. 15 Learning processes of natural frequencies

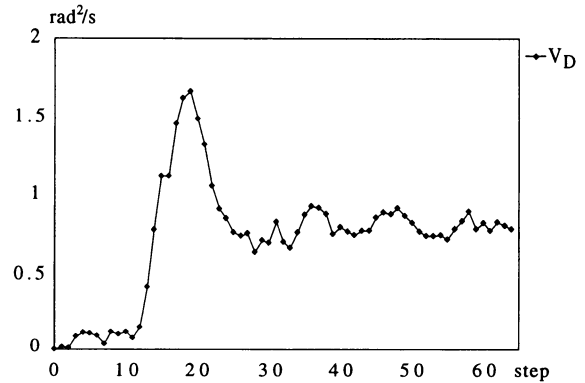


Fig. 16 Learning processes of desired relative phases

の速度が変化して50秒後のものである。なお、実験で用いた各ダイナミクスの時定数は $\tau_\theta = 1.0, \tau_\omega = 0.2, \tau_D = 0.25, \tau_V = 10.0$ である。

## 6. おわりに

本研究では、記憶しているパターンを環境に応じてゆっくりと変化させることが適応の本質であると考え、その観点から除脳ネコと同じような振舞いをロボットで実現させた。そこでの制御則および適応則は、各脚を部分系としてみなした場合、完

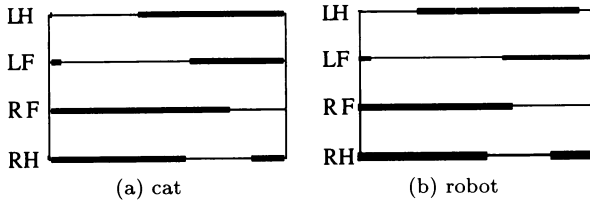


Fig. 17 Adapted gait of a cat and a robot

全に局所的な情報交換のみで実現している。

歩行実験では、ロボットをトレッドミル上に固定して行った。除脳ネコの実験がトレッドミル上に頭部を固定して行っていることを考えると、実験の最初の段階としては妥当な実験条件であるといえる。しかし、支えなしでトレッドミル上を歩くにはどうするかは、制御の立場からは興味深い問題である。この問題は、今後の研究の発展方向の一つとして考えている。

謝辞 本研究のロボットシステムを設計するにあたり的確なご助言をいただいた愛知工業大学の加藤厚生教授、および実際の製作に携わっていただいた愛知工業大学の畑智成氏に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] E. Muybridge: *Animals in motion*. Dover pub, 1957.
- [2] M. Hildebrand: "Symmetrical gaits of horses," *Science*, vol.150, pp.701-708, 1965.
- [3] M. Hildebrand: "Symmetrical gaits of dogs in relation to body build," *J. Morph.*, vol.124, pp.353-360, 1968.
- [4] P.P. Gambaryan: "How mammals run," *Anatomical Adaptations*, Wiley, 1974.
- [5] D. Yanagihara, M. Udo, I. Kondo and T. Yoshida: "A new learning paradigm: adaptive changes in interlimb coordination during perturbed locomotion in decerebrate cats," *Neuroscience Research*, vol.18, pp.241-244, 1993.
- [6] D. Yanagihara and I. Kondo: "Nitric oxide plays a key role in adaptive control of locomotion in cat," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol.93, pp.13292-13297, 1996.
- [7] 伊藤聡, 湯浅秀男, 羅志偉, 伊藤正美, 柳原大: "リズム運動の環境適応に関する数理モデルについて", 計測自動制御学会論文集, vol.34, no.9, pp.1237-1245, 1998.
- [8] S. Ito, H. Yuasa, Zhi-wei Luo, M. Ito and D. Yanagihara: "A Mathematical Model of Adaptive behavior in Quadruped Locomotion," *Biol. Cybern.*, vol.78, pp.337-347, 1998.
- [9] S. Grillner: "Locomotion in Vertebrates: Central Mechanisms and Reflex Interaction," *Physiological Reviews*, vol.55, no.4, pp.247-304, 1975.
- [10] S. Grillner: "Neurobiological bases of rhythmic motor acts in vertebrates," *Science*, vol.228, pp.143-149, 1985.
- [11] F. Delcomyn: "Neural basis of rhythmic behavior in animals," *Science*, vol.210, pp.492-498, 1980.
- [12] K. Pearson: "The control of walking," *Scientific American*, vol.235, pp.72-74, 79-86, 1976.
- [13] 特集 自律分散システム, 計測と制御, vol.29, no.10, pp.877-952, 1990.
- [14] H. Yuasa and M. Ito: "Coordination of Many Oscillators and Generation of Locomotory Patterns," *Biological Cybernetics*, vol.63, pp.177-184, 1990.
- [15] G. Schöner, WY. Jiang and JAS. Kelso: "A synergetic theory of quadrupedal gaits and gait transitions," *Journal of Theoretical Biology* 142:359-391, 1990.
- [16] S. Kimura, M. Yano and H. Shimizu: "A self-organizing model of walking patterns of insects," *Biological Cybernetics*, vol.69,

pp.183-193, 1993.

- [17] J.J. Collins and S.A. Richmond: "Hard-wired central pattern generators for quadrupedal locomotion," *Biological Cybernetics*, vol.71, pp.375-385, 1994.
- [18] G. Taga: "A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion," *Biological Cybernetics*, vol.73, pp.97-111, 113-121, 1995.
- [19] 三浦宏文, 下山勲: "竹馬型二足歩行ロボットの制御系", 日本ロボット学会誌, vol.1, no.3, pp.176-181, 1983.
- [20] 細江繁幸, 武市機八, 熊井聡, 伊藤正美: "高ゲインフィードバックによる2足歩行の安定解析", 計測自動制御学会論文集, vol.22, no.9, pp.948-954, 1986.
- [21] M.H. Raibert: *Legged Robots That Balance*. MIT Press, 1986.
- [22] S. Kajita, A. Kobayashi and T. Yamamura: "Dynamic walking control of a biped robot along a potential energy conserving orbit," *IEEE trans. on RA*, vol.8, no.4, pp.431-438, 1992.
- [23] 高西淳夫: "上体の運動によりモーメントを補償する2足歩行ロボット", 日本ロボット学会誌, vol.11, no.3, pp.348-353, 1993.
- [24] 米田完, 広瀬茂男: "歩行機械の転倒安定性", 日本ロボット学会誌, vol.14, no.4, pp.517-522, 1996.

## A. 歩行リズムの生成

各発振器のダイナミクスを発振器の固有振動数  $\omega_i (i = 0, 1, 2, 3)$  と発振器間の相互作用  $f_i (i = 0, 1, 2, 3)$  により

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + f_i \quad (i = 0, 1, 2, 3), \quad (11)$$

$$f_0 = \tau_\theta(\theta_1 + \theta_3 - 2\theta_0 - D_0 - D_1), \quad (12)$$

$$f_1 = \tau_\theta(\theta_0 + \theta_2 - 2\theta_1 + D_0 - D_2), \quad (13)$$

$$f_2 = \tau_\theta(\theta_1 - \theta_2 + D_2), \quad (14)$$

$$f_3 = \tau_\theta(\theta_0 - \theta_3 + D_1). \quad (15)$$

で与える。  $D_j (j = 0, 1, 2)$  は位相差  $\phi_j (j = 0, 1, 2)$  の目標値である。ポテンシャル関数は各発振器の固有振動数が等しいとき、

$$V = \frac{1}{2} \{ \tau_\theta(\phi_0 + \phi_1 - D_0 - D_1)^2 + \tau_\theta(-\phi_0 + \phi_2 + D_0 - D_2)^2 + \tau_\theta(-\phi_2 + D_2)^2 + \tau_\theta(-\phi_1 + D_1)^2 \} \quad (16)$$

で与えられる。式(11)～式(15)により計算される位相差  $\phi_j (j = 0, 1, 2)$  のダイナミクス

$$\dot{\phi}_0 = \tau_\theta(-\phi_0 + \phi_2 + D_0 - D_2) - \tau_\theta(\phi_0 + \phi_1 - D_0 - D_1), \quad (17)$$

$$\dot{\phi}_1 = \tau_\theta(-\phi_1 + D_1) - \tau_\theta(\phi_0 + \phi_1 - D_0 - D_1), \quad (18)$$

$$\dot{\phi}_2 = \tau_\theta(-\phi_2 + D_2) - \tau_\theta(-\phi_0 + \phi_2 + D_0 - D_2). \quad (19)$$

は、確かに式(16)の勾配系として  $\dot{\phi}_j = -\partial V / \partial \phi_j (j = 0, 1, 2)$  で記述できる。式(16)のポテンシャルの勾配が発振器間の相互作用に対応している。

## B. 発振器の固有振動数の調節

遊脚相での発振器のダイナミクスは

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + f_i \quad (i = 0, 1, 2, 3) \quad (20)$$



で与えられる。これを遊脚時間内で積分すると

$$\theta_i(t) = \omega_i t + F_i \quad (i = 0, 1, 2, 3) \quad (21)$$

$$F_i = \int_{T_{sw}^{(n)}} f_i dt \quad (i = 0, 1, 2, 3) \quad (22)$$

となる。 $n$  は歩行のステップ数、 $T_{sw}^{(n)}$  は遊脚相の時間である。 $F_i > 0 (< 0)$  のとき、 $\theta_i$  はその分加速 (減速) したことになる。この相互作用は角速度  $\omega_i$  が遅 (速) かったために生じたと考えられる。つまり、 $\omega_i$  を速 (遅) くすれば相互作用を小さくできるはずである。したがって、受けた相互作用に比例した分だけ、次式に従い調整を行う。

$$\omega_i^{(n+1)} = \omega_i^{(n)} + \tau_\omega F_i \quad (i = 0, 1, 2, 3) \quad (23)$$

$F_i = 0$  のときは  $\omega_i$  は速くも遅くもなかったことを意味し調整は行わない。支持脚では相互作用ははたらかないので、式 (22) は次式のようにも書ける。

$$F_i = \int_{T^{(n)}} f_i dt \quad (i = 0, 1, 2, 3) \quad (24)$$

$T^{(n)}$  は歩行周期である。したがって、最終的な適応則は

$$\omega_i^{(n+1)} = \omega_i^{(n)} + \tau_\omega \int_{T^{(n)}} f_i dt \quad (i = 0, 1, 2, 3) \quad (25)$$

として与える。これにより一周期に受ける相互作用の積分値  $F_i$  を小さくすることができる。適応則式 (25) は結合した発

振器間の局所的な情報交換のみで計算できる。

### C. 目標位相差の調節

$D_j (j = 0, 1, 2)$  の調節は、発振器間の相互作用の 2 乗和  $V_D$

$$V_D = \int_{T^{(n)}} \sum_{i=0}^3 \left\{ \frac{1}{2\tau_\theta} f_i^2 \right\} dt \quad (26)$$

を減少させるように各歩行ステップごとに行う。

$$D_j^{(n+1)} = D_j^{(n)} - \tau_D \frac{\partial V_D}{\partial D_j^{(n)}} \quad (j = 0, 1, 2) \quad (27)$$

ここで、 $\tau_D$  は目標位相差  $D_j$  を調節する速さをきめるパラメータである。

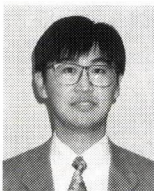
式 (27) に式 (26) および式 (12) ~ (15) に代入して計算すると、最終的に次式を得る。

$$D_0^{(n+1)} = D_0^{(n)} + \tau_D \int_T (f_0 - f_1) dt \quad (28)$$

$$D_1^{(n+1)} = D_1^{(n)} + \tau_D \int_T (f_0 - f_3) dt \quad (29)$$

$$D_2^{(n+1)} = D_2^{(n)} + \tau_D \int_T (f_1 - f_2) dt \quad (30)$$

式 (28) ~ (30) は相互作用の偏りを分散させるはたらきがある。これらの式も、式 (25) と同じように、結合した発振器間の局所的な情報交換のみで計算できる。



伊藤 聡 (Satoshi Ito)

1968年12月10日生。1991年名古屋大学工学部情報工学科卒業。1993年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。1994年より理化学研究所に勤務。IEEEなどの会員。(日本ロボット学会正会員)



羅 志偉 (Zhi-wei Luo)

1963年10月3日生。1984年中国華中工学院自動制御と計算機学部卒業。1984年から1986年まで中国蘇州大学教師。1986年から1988年愛知工業大学客員研究員。1991年名古屋大学大学院工学研究科情報工学専攻博士前期課程修了。1992年同大学大学院博士後期課程修了。1992年から1994年豊橋技術科学大学助手。1994年より理化学研究所フロンティア研究員。現在に至る。工学博士。ロボット工学、制御工学などの研究に従事。日本神経回路学会、IEEEなどの会員。(日本ロボット学会正会員)



柳原 大 (Dai Yanagihara)

1964年2月10日生。1986年順天堂大学体育学部卒業。1988年順天堂大学大学院体育学研究科修了。1991年中京大学博士後期課程修了。同年中京大学体育研究所助手。1992年大阪大学健康体育部助手。1995年より理化学研究所・フロンティア研究システムフロンティア研究員。現在、同研究所脳科学総合研究センター研究員。博士(体育学)。運動の適応制御、小脳のシナプス可塑性等を神経生理学・分子生物学的に研究している。北米神経科学学会、日本生理学会、日本神経科学学会、日本体育学会等の会員。



湯浅秀男 (Hideo Yuasa)

1961年4月2日生。1986年名古屋大学大学院博士前期課程修了(情報工学専攻)。同年同工学部情報工学科助手。1992年同工学部電子機械工学科講師。1993年理化学研究所客員研究員を併任。現在に至る。工学博士。主に自律分散システムの研究に従事。電気学会、システム制御情報学会、日本神経回路学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)



伊藤正美 (Masami Ito)

1930年9月18日生。1953年東京都立大学工学部卒業。1959年電気試験所(現電子総合研究所)入所。1964年名古屋大学助教授。1970年同大学教授。1993年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長。1996年より同研究所制御系理論研究チームリーダー併任。名古屋大学名誉教授。工学博士。1998年12月逝去。(日本ロボット学会正会員)