多型的な CPG 回路モデルによる 2 脚ロボットの実時間行動遷移

藤井 亮 暢^{*1} 石 黒 章 夫^{*2} Peter Eggenberger Hotz^{*3}

Real-Time Action Selection of a Biped Robot using Polymorphic CPG Circuits

Akinobu Fujii^{*1}, Akio Ishiguro^{*2} and Peter Eggenberger Hotz^{*3}

In order to create agile locomotion for legged robots, so far various methods have been proposed with the concept of neural circuits, or so-called Central Pattern Generator (CPG). In contrast to these approaches in which monolithic CPG neural circuits are employed to control locomotion, this paper focus on a polymorphic CPG neural circuit. This allows us to dynamically change the properties of CPG circuit according to the current situation in real-time. To this aim, the concept of neuromodulation mechanism is introduced to modulate a CPG circuit. To verify the feasibility of this approach, this concept is applied to the control of a 3-D biped robot which is intrinsically unstable. In order to explore the parameters of the CPG circuit with a neuromodulation mechanism, an evolutionary algorithm is employed in this study. Simulation results show that the neuromodulation mechanism dynamically changes synaptic weights of the CPG circuit. This synaptic change leads to creating different behaviors, such as walking behavior and stepping behavior, from the same circuit.

Key Words: Action Selection, Neuromodulation, CPG (Central Pattern Generator), Artificial Evolution, Biped Robot

1. は じ め に

近年、生物の適応的な歩行を目指し、歩行生成を司る神経系である Central Pattern Generator (以下 CPG) に基づいた、自律的・創発的な歩行生成に関する研究が活発に行われている [1]. その中でも、多賀の提案したグローバルエントレインメント (Global Entrainment) は、神経系、筋骨格系、環境との相互作用から歩行が生成され、非線形力学系を考慮したロボティクス理論として注目を集めている [2] [3] [13]. これまでの CPG 回路モデルによる歩行生成に関する研究では、定常歩行の生成や外乱のある環境下での歩行など、いかにして歩行を継続させるかが研究の焦点であった。

その一方で、歩行の停止・開始に関する研究は未だ少数である。ここでは、歩行の停止を停留型足踏み運動 (以下、足踏みと呼ぶ) と考えて話を展開する。矢状面内モデル、かつ前額面方向の運動が小さく、適切なタイミングで行われているとき、足踏み運動は、重心位置の射影が常に足部の支持位置の範囲内に存在する静的な安定性を持った運動である。そのため、動的に

安定である歩行運動とは異なる運動であることに注意されたい。これまでに、CPG 回路モデルに基づいて足踏み運動を生成する研究が行われてきた。多賀は、簡単な姿勢制御モデルを作り、その場で足踏み運動を行う 2 足モデルを構築した [3]. 多賀は、姿勢制御系とリズム制御系が独立に存在し、それらが相互作用を通じて統合されることで動的ならびに静的な運動が生成されることを示した。宮腰ら [4] ならびに松浦 [5] は、その場で足踏み運動から徐々に前進する行動遷移が現れたことを報告している。しかしながら、足踏み運動から歩行へ遷移するメカニズムに関して詳細に説明されておらず、また、歩行から足踏み運動への行動遷移に関しては述べられていない。ここで、これらの研究で用いられている CPG 回路モデルの構造に着目すると、その構造は歩行中変化することなく、静的なものであった。

筆者らはこれまでに、神経生理学において観察された神経調節 (neuromodulation) を参考にした CPG 回路モデルを提案してきた。提案するモデルは、従来のものと異なり、その回路構造は状況に応じて実時間で変化する。提案モデルにより環境変動に対する適応能力 (adaptability) が向上することを示したが [6]~[9], 複数の異なる行動の生成については考察していなかった。そこで本論文では、提案する CPG 回路モデルにより、同一の回路構造 (回路を構成する要素ならびに要素間の結線配置が同一) から歩行運動、足踏み運動の二つの異なる運動が生成されることを確認したので報告する。

原稿受付 2002 年 12 月 16 日

^{*1}株式会社豊田中央研究所

^{*2}名古屋大学大学院

^{*3}チューリッヒ大学

^{*1}Toyota Central Research and Development Laboratories

^{*2}Nagoya University

^{*3}University of Zurich

Fig. 1 The stomatogasitric nervous system in the *Lobster*

2. 神経修飾機構

2.1 神経生理学的知見

生物の CPG は、回路を構成する要素（神経振動子）間の結合荷重を変更することにより、環境に適した運動を同一の回路から発現させている。本節ではその神経生理学的知見を紹介する。

Meyrand らは、ロブスターの胃の神経回路構成が食べ物の飲み込み時にどのように変化するかに関して詳細な実験的検証を行っている [10]。Fig. 1 の左図に示すように、通常時は食道 (oesophageal network)、幽門 (pyloric network)、噴門部 (gastric network) はそれぞれ独自の発振を行っており、互いに非干渉の関係にある。通常時には独立した発振を行っている各部位は、食べ物を飲み込むときに再構成されて同図右のような回路に即座に変化し協調運動を始める。この現象は、いままで存在しなかった結合を生成したわけではなく、もともと存在していたシナプス結合が抑制されて顕在化していなかったと考えられている。

このような現象は神経修飾と呼ばれ、神経修飾物質 (neuro-modulator, 以下 NM) がシナプスの特性を変化させるために発生する現象である。神経修飾により回路構造を変化させ、多様な出力パターンを生成する回路を「多型回路 (polymorphic circuit)」と呼ぶ。このような回路は、放出された NM から状況を評価し、それに応じて多様な行動あるいは情報を生成する情報システムとして考えられる。

2.2 提案手法

筆者らはこの現象に着目し、これまでに神経修飾機構を有する CPG 回路モデルを提案している [6]~[9]。本節では提案手法の基本概念を述べる。提案手法においては、センサニューロンからシナプス荷重の変更を司る NM が拡散されるものとし、拡散された NM と結合する受容体はシナプス上に存在すると仮定した。NM の拡散とシナプスへの影響という、上下 2 層の相互作用を経てその状況における適切な神経回路が発現する。Fig. 2 にその概念図を示す (図中の実線は結合の強化を、破線は弱さを表す)。提案手法により、ある一つの回路構造から複数の情報 (ロボットの行動) を生成することが期待できる。このような手法は、新たな行動を生成させるたびに、回路あるいは回路を構成する要素を新規に追加することなく行動を生成することが可能となり、計算資源の有効化に役立つと思われる。

本研究では提案手法の有効性を示すために、障害物の有無による 2 脚ロボットの歩行の停止・開始問題を取り上げる。

Fig. 2 A schematic diagram of the neuromodulation mechanism

Fig. 3 3-D biped robot model used in the simulation

Table 1 Body and joint parameters of the biped robot

Part	Size[m]	Mass[kg]
torso	0.56	2.0
pelvis	$0.1 \times 0.36(d \times w)$	1.0
thigh	0.44	1.0
shank	0.47	1.0
foot	$0.31 \times 0.21(d \times w)$	1.0

3. シミュレーション

提案手法の妥当性を検証するため、計算機シミュレーションを行った。以下にシミュレーションモデルについて説明する。

3.1 2 脚ロボットモデル

シミュレーションでは、Fig. 3 に示す 2 脚ロボットを用いた。シミュレータには三次元シミュレータ *MathEngine* [11] を用いた。本モデルは、左右の大腿、下腿、足、そして上半身と腰部からなり、それぞれの部位に固有の長さ、質量パラメータが設定されている。本研究で用いた各パラメータの値を Table 1 に示す。腰関節は前額面方向に 1 自由度を持ち、股関節と膝関節、ならびに足首関節は矢状面方向に 1 自由度を持つ。ただし、膝関節は逆折れしないものとした。各関節には後述する神経振動子が配置され、その出力に比例したトルクが加えられるものとした。ロボットは床と足裏のみで接触する。ここで、接触点は

片足に4点ずつ存在し、うち2点が爪先、残りの2点は踵にある。ロボットの関節部はHingeジョイントとし、摩擦力はないものとした。

3.2 神経振動子

CPG回路モデルを構築する神経振動子には、松岡の提案した神経振動子モデルを採用した[12]。このモデルでは、一つのニューロンが以下に示す一階の連立微分方程式で表現される：

$$\tau_r \frac{du_i}{dt} = -u_i + \sum_{j=1}^n w_{ij} y_j + w_{s_i} s_0 - b f_i + feed_i \quad (1)$$

$$\tau_a \frac{df_i}{dt} = -f_i + y_i \quad (2)$$

$$y_i(u_i) = \max\{0, u_i\} \quad (3)$$

ここで、添字 i, j はニューロン番号、 τ_r, τ_a は時定数、 u_i は膜電位、 w は接続しているニューロンとの間の結合荷重、 s_0 は駆動入力（ここでは1とする）、 w_{s_i} はニューロンへ駆動入力を伝えるシナプス結合の荷重、 f_i はニューロン内部の疲労状態、 $feed_i$ はセンサフィードバック、 y_i はニューロンの出力、 b は係数を示す。

コントローラで用いる神経振動子は、二つのニューロン（伸筋ニューロン、屈筋ニューロン）が相互抑制されることにより構成されている。それぞれのニューロンの出力に応じて伸筋と屈筋は駆動される。神経振動子は、振動子の固有周期と類似した周期を持つ信号が入力されると引き込み現象を引き起こす性質を持つ。

3.3 CPG回路モデルの構造

本研究では、前述の神経振動子7個を、Fig. 4に示すように抑制性結合を介して接続することで2足歩行を生成するCPG回路モデルを構築した。ここで、股関節の振動子に関しては、筋骨格系と神経系との間に安定した引き込み現象を生じさせるため、股関節の関節角度情報がフィードバックされている：

$$feed_e = k\theta_{hip}, \quad (4)$$

$$feed_f = -k\theta_{hip} \quad (5)$$

ここで、 θ_{hip} は股関節角度、 k はフィードバック係数であり、本研究では試行錯誤的に $k = 8$ と設定した。 $feed_e$ と $feed_f$ は、股関節の伸筋ニューロンならびに屈筋ニューロンにそれぞれフィードバックされる。

また、ロボットには、前方の障害物とロボット間の距離を検出できる仮想センサを有するものとした (Fig. 5)。

3.4 神経修飾メカニズム

CPG回路モデルに適用される神経修飾メカニズムに関して、本研究では以下のように設定した：

(1) NMの拡散

本研究では簡単のために、距離センサのみがNMを拡散するものとした。ここでNMは、Fig. 5に示すようにセンサ値がNMの放出閾値（同図中 θ ）によって決定される領域 (Fig. 5 網掛部) に存在するときのみ拡散される。NMが拡散されている間、受容体を仮定した結線は結合荷重が更新される。後述するが、 θ は進化的計算手法を用いて決定した。

Fig. 4 CPG controller for the biped robot

Fig. 5 Distance sensor used in the simulation

(2) NMによる荷重変更

本研究では、拡散されたNMを受容する受容体は、神経振動子間の全シナプス上ならびに神経振動子へ駆動入力を伝える全シナプス上に存在するものとした。この受容体の配置は左右対称とした。

NM非放出時の w, w_s を基本結合荷重 w_d, w_{sd} とすると、NMが拡散している間、次式に従ってその結合荷重を変化させる：

$$\epsilon_1 \frac{dw}{dt} + w = w_d + \delta w, \quad (6)$$

$$\epsilon_1 \frac{dw_s}{dt} + w_s = w_{sd} + \delta w_s, \quad (7)$$

$$\epsilon_1 = \frac{\delta t}{\alpha} \quad (8)$$

ここで、 $\delta w, \delta w_s$ は結合荷重の増加（減少）分を、 α は変化率を表す。センサ値が放出閾値からはずれた場合には、以下の式に従ってその結合荷重はもとの荷重に戻る。

$$\epsilon_2 \frac{dw}{dt} + w = w_d, \quad (9)$$

$$\epsilon_2 \frac{dw_s}{dt} + w_s = w_{sd}, \quad (10)$$

$$\epsilon_2 = \frac{\delta t}{\beta} \quad (11)$$

ここで、 β は変化率を表す。

Table 2 The parameters to be evolved in the 1st stage

Parameters	Range
τ_r	0.01 ~ 0.075
τ_a	0.04 ~ 0.75
$w(=w_d)$	-5.0 ~ 0.0
$w_s(=w_{sd})$	0.0 ~ 4.0
b	1.25 ~ 2.0

4. 進化的計算による CPG 回路モデルの獲得

本研究では、CPG 回路モデルのパラメータを決定するために、ロボットの身体性や環境との相互作用をコントローラに反映可能な進化的計算手法を用いた。

本研究では、歩行の停止・開始をスムーズに行うことが可能なコントローラを構築するため、以下の二段階に分けて進化的計算を適用した。各段階で求める未知パラメータは、バイナリ表現されたビット列（遺伝子型）で表現される。これを 100 個体用意し、各段階でそれぞれ 200 世代にわたって進化させた。突然変異率は 0.1、交叉率は 0.2 とした。

(1) 第一段階（基本 CPG 回路モデルの獲得）

この段階では、基本となる CPG 回路モデルを構築することを目的とする。この段階では **Table 2** に示すパラメータを探索の対象とした。

進化過程では、ロボットは平地上に置かれ、30 [s] 間転倒しなければ、歩行できるものとした。また、転倒するような個体の発現を防ぐため、評価式 f_1 は、初期姿勢から転倒（腰部の高さが初期姿勢の 70% 以下に下がった場合）するまでの移動距離（ D_{flat} ）とした：

$$f_1 = D_{flat} \quad (12)$$

(2) 第二段階（神経修飾メカニズムの獲得）

この段階では、状況に応じて適切な行動調節を可能とする神経修飾メカニズムの獲得を目的とする。ここでは、第一段階で獲得した最良個体を 100 個体複製し、それらに神経修飾メカニズムに関する遺伝情報を追加したものを初期集団とした。この初期個体集団に対して、壁を配置した平地上にて 200 世代にわたって進化させた。壁はロボットの初期位置から 3 [m]、6 [m] 先に配置する (**Fig. 6**)。一つ目と二つ目の壁は、一定時間（7 秒、17 秒）がたつと取り除かれるものとした。ここでは、第一段階で獲得した遺伝情報は保存し、新たに追加した神経修飾メカニズムに関する遺伝子情報のみ進化させた。この段階での探索の対象は、NM の固有放出閾値 θ 、結合荷重の変化率 α ならびに β 、そして結合荷重の増加（減少）分 $\delta w, \delta w_s$ とした。詳細は **Table 3** に記す。

この段階での評価式 f_2 は移動した距離を用いた：

$$f_2 = D_{stepping} \quad (13)$$

ここで、転倒条件と評価時間に関しては、第一段階と同一のものとした。

Fig. 6 Test environment in the evolutionary processes**Table 3** The parameters to be evolved in the 2nd stage

Parameters	Range
θ	0.5 ~ 2.484
α	0.01 ~ 0.1
β	0.01 ~ 0.1
δw	-2.4 ~ 3.9
δw_s	-2.4 ~ 3.9

(a)

(b)

Fig. 7 Obtained locomotion through the 1st stage of evolution: (a) Walking under flat terrain; (b) Transition of the angle of the right leg under flat terrain

5. シミュレーション結果

5.1 平地上の歩行

第一段階における進化計算の結果、筋骨格系と神経系との相互カップリングにより比較的容易に平地歩行可能な CPG 回路モデルを獲得できた。この段階で獲得された歩容（0～8 [s]）を **Fig. 7(a)** に示す。また、右脚の股関節、膝関節、足首関節の角度を **Fig. 7(b)** に示す。

5.2 足踏み運動の生成

第二段階における進化計算の結果、歩行中壁に近づく足踏み運動に遷移し、壁がなくなると再び歩行を開始する個体が発現した。 **Fig. 8** に、ロボットの位置の進行方向に関する時間推移を示す。同図より、壁（位置 3 [m]、6 [m]）の手前にてロボットは停止していることが分かる。そのときの w 、 w_s の推移を **Fig. 9, 10** に示す。足踏み中（4～8 [s]）、14～18 [s]）にほとん

Fig. 8 Transition of the robot's position under the test environment

Fig. 9 Transition of w under the test environment

どの w, w_s が更新されていることが分かる。歩行から足踏みへの場合には緩やかに荷重更新が、足踏みから歩行への場合には瞬時に荷重更新が行われていることが分かる。この結合荷重の更新により、神経振動子の出力値が調節されている。神経振動子の出力推移を Fig. 11 に示す。同図から、足踏みを生成するために各振動子の出力、位相が変化していることが見て取れる。

生成された運動が異なるものであることを確認するために、歩行運動ならびに足踏み運動のリミットサイクルをプロットした。Fig. 12 に、歩行運動と足踏み運動の股関節、膝関節、足首関節のリミットサイクルをそれぞれ示す。同図から、歩行時と足踏み運動時のリミットサイクルの形状は異なっており、同一の回路構造から異なる運動が生成されていることが分かる。

6. 考察

6.1 歩行の停止・開始のメカニズム

多賀は、CPG 回路モデルによる 2 足歩行シミュレーションにおいて、リズム生成系のほかに姿勢制御系を仮定し、歩行時の静的バランスを維持できるようにしている [3]。この姿勢制御系はインピーダンス制御に似た働きをし、状況に応じて関節の粘弾性を変化させるものであった。多賀は、この二つの制御系

Fig. 10 Transition of w_s under the test environment

Fig. 11 Transition of the oscillator output from each joint

からなる相互作用の度合いを変化させることで歩行運動と足踏み運動を生成した。換言すると、複数の運動を生成する際には、異なる役割を持ったまったく別の制御系を追加する必要があるといえる (Fig. 13 (a))。一方で本研究では、CPG 回路モデルの構造が同一であっても歩行運動と足踏み運動という特徴の異なる運動の生成ならびにスムーズな運動移行が可能であることを示した。このことは、提案手法を用いた場合、新しい運動を生成する際に別の回路 (制御系) あるいは回路を構成する要素数を新規に増やす必要がなく、その計算資源を最小限にとどめる利点を有するといえる (Fig. 13 (b))。

実際の生物では、リズム生成系と姿勢制御系は独立して働いているという研究報告があるので、多賀のモデルは妥当性が高いといえる。その一方で、小規模な回路から複数の運動を生成可能である本手法は、工学的な視点から見た場合、限られた計

(a) Limit cycle in walking (b) Limit cycle in stepping behavior

Fig. 12 Obtained limit cycles in both behaviors

Fig. 13 Difference between Taga's model [3] and the proposed model

算資源を有効に使うという点で優位性があると考えられる。

生物自身も限られた計算資源（この場合神経系）を有効に使うことにより適応的な行動を生成している。例えば、昆虫の脳は、脊椎動物のそれと比較して非常に小規模であるにもかかわらず無限定環境に適応している。本研究の結果は、知能研究の観点から見ても興味深いものである。

6.2 センサフィードバック

引き込み現象による歩行生成において、定常的な歩行を生成するためには、歩行周期と類似した信号波形を持つセンサ情報を CPG 回路モデルに直接フィードバックする必要がある。そのため、歩行周期とは異なる信号波形を持つセンサ情報を用いる場合には、そのフィードバックの仕方に注意を要することを筆者らはこれまでに主張してきた [6] [8] [9]。適応的な歩行を生成するためには視覚センサは必要不可欠であるが、そのセンサ信号波形は当然歩行周期と異なるものであるため、CPG 回路モデルをコントローラとして用いる場合にはなんらかの工夫をしなくてはならない。

多賀は、視覚情報（障害物までの距離、高さ）を用いた 2 足モデルの障害物またぎ越え問題を検討するために「一過的運動

Fig. 14 Oscillator output and sensory signals: (a) oscillator output; (b) signal of hip angle sensor; (c) signal of distance sensor

制御系」を提案した [13]。この制御系では、障害物に関する視覚情報とリズム生成系に関する情報とを同時に受けて、それらを統合している。さらに de Rugy らは、一過的運動制御系を拡張して、時間情報に基づいたロコモータポインティングを行うモデルを構築した [14]。

本論文では、視覚センサを用いる前段階として障害物とロボットとの距離を測る仮想的なセンサを用意し、CPG 回路モデルの出力に反映させることを試みた。使用した仮想センサ出力波形は、Fig. 14 に示すように、歩行周期とはまったく異なるものである。それにもかかわらず、本手法により歩行運動を壊すことなく、足踏み運動への運動遷移に距離情報が適切に反映されることが確認された。

本手法において、歩行生成 (behavior generation)、環境知覚 (perception)、行動調整 (behavior regulation) といった異なる機能が「一枚」の CPG 回路モデルに埋め込まれていることに注意されたい。今回の結果は、今後画像情報を扱う場合にも、本手法が有効な手段となりえることを示唆している。

7. まとめおよび今後の課題

本研究では、生物の神経回路が同一の回路構造から複数の行動を生成する多型的な回路であることに着目し、神経修飾機構を持つ CPG 回路モデルを提案した。提案した CPG 回路モデルを 2 脚ロボットに適用し、障害物の有無に応じて歩行と足踏み運動のスムーズな遷移が可能であることを示した。本研究では、多型的な神経回路による行動遷移を調べることを主としたために必要最小限のセンサを用意した。しかしながら、環境を知覚し、安定な歩行を継続させるためには視覚センサや床反力センサなど多数のセンサを統合・フィードバックする必要がある。今後は多数のセンサ情報を CPG 回路モデルに適切に反映させるメカニズムの構築を目指す。今回は歩行と停留型足踏みの遷移に着目したが、その他にも前進型足踏みや後ずさりなど多様な行動パターンが存在する。各行動パターンはそれぞれ類似しているものやそうでないものが存在し、提案手法の有効性

はその類似度に大きく影響されるものと考えられる。しかしながら、その類似度の定義化に際しては、ロボットの身体性や環境との相互作用（文脈に相当）も斟酌する必要があり、発現した行動の表層の特徴のみから規定することは非常に困難である。今後の予定としては、行動の類似度を明確化する指標を考案し、それをもとに提案手法の有効性を明確化したいと考えている。また、筆者らのグループは、適応的な歩行の生成のために、身体のダイナミクスが歩行制御に与える影響に関しても研究を進めている [15] [16]。

謝 辞 本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究 (C) (課題番号 12650442) の援助を受けた。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- [1] 木村: “神経モデルを用いた生物型移動ロボット研究の紹介”, 日本神経回路学会誌, vol.8, no.2, pp.70-76, 2001.
- [2] G. Taga, Y. Yamaguchi and H. Shimizu: “Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment,” *Biological Cybernetics*, vol.65, pp.147-159, 1991.
- [3] 多賀: “ヒトの歩行・姿勢制御に関するエコロジカル・ニューロ・バイオメカニクス”, 第10回生体・生理工学シンポジウム論文集, pp.265-268, 1995.
- [4] 宮腰, 多賀, 國吉, 長久保: “神経振動子を用いた三次元 2 足足踏みシミュレーション—ヒューマノイドの実世界内行動を目指して—”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.1, pp.87-93, 2000.
- [5] 松浦, 石村, 島田, 和田: “Global Entrainment に基づいた 2 足ロボットの歩行運動”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2002, CD-ROM 1P1-E11, 2002.
- [6] A. Fujii, A. Ishiguro and P. Eggenberger: “Evolving a CPG controller for a biped robot with neuromodulation,” *Proc. International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR2002)*, pp.17-24, 2002.
- [7] A. Fujii, N. Saito, K. Nakahira, A. Ishiguro and P. Eggenberger: “Generation of an Adaptive CPG Controller for a Quadruped Robot with Neuromodulation Mechanism,” *Proc. International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2002)*, pp.2619-2624, 2002.
- [8] 藤井, 石黒, Eggenberger: “神経修飾機構を有する CPG 回路モデルを用いた歩行生成”, 計測自動制御学会論文集, vol.38, no.11, pp.981-989, 2002.
- [9] A. Ishiguro, A. Fujii and P. Eggenberger: “Neuromodulated Control of Bipedal Locomotion Using a Polymorphic CPG Circuit,” *Adaptive Behavior*, vol.11, pp.7-17, 2003.
- [10] P. Meyrand, J. Simmers and M. Moulins: “Construction of a pattern-generating circuit with neurons of different networks,” *NATURE*, vol.351, pp.60-63, 1991.
- [11] MathEngine 社: <http://www.mathengine.com>
- [12] K. Matsuoka: “Mechanisms of frequency and pattern control in the neural rhythm generators,” *Biological Cybernetics*, vol.56, pp.345-353, 1987.
- [13] G. Taga: “A model of the neuro-musculo-skeletal system for anticipatory adjustment of human locomotion during obstacle avoidance,” *Biological Cybernetics*, vol.78, pp.9-17, 1998.
- [14] A. de Rugy, G. Taga, et al.: “Perception-action coupling model for human locomotor pointing,” *Biological Cybernetics*, vol.87, pp.141-150, 2002.
- [15] A. Ishiguro, K. Kawasumi and A. Fujii: “Increasing Evolvability of a Locomotion Controller Using a Passive Dynamic Walking Embodiment,” *Proc. International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2002)*, pp.2581-2587, 2002.
- [16] 川角, 藤井, 石黒: “二脚受動歩行機構を用いた身体性と制御系の相互作用に関する一考察”, 電論 C, vol.123, no.5, pp.1031-1032, 2003.
- [17] 伊藤, 湯浅, 伊藤: “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, vol.32, no.11, pp.1535-1543, 1998.
- [18] 土屋, 辻田: “Central Pattern Generator モデルに基づく 4 脚歩行ロボットの歩行制御”, 日本ロボット学会誌, vol.20, no.3, pp.243-246, 2002.
- [19] S. Kimura, M. Yano and H. Shimizu: “A self-organizing model of walking patterns of insects,” *Biological Cybernetics*, vol.69, pp.183-193, 1993.

藤井亮暢 (Akinobu Fujii)

1975 年 8 月 21 日生。1998 年名古屋大学工学部電子情報学科学卒業。2003 年名古屋大学大学院工学研究科計算理工学専攻博士課程後期課程修了。同年、(株)豊田中央研究所入所、現在に至る。博士(工学)。この間、2000 年理化学研究所ジュニアリサーチアソシエイト。2001 年日本学術振興会特別研究員(2年間)。計測自動制御学会会員。(日本ロボット学会正会員)

Peter Eggenberger Hotz

He graduated in Medicine 1985 from University of Lausanne, worked in industry until 1990. He worked in AI Lab at Department of Computer Science, University of Zurich until 1999. From April 1999, he worked at ATR Human Information Processing Research Laboratories (Department 6), Japan until 2001. From November 2001, he works at University of Zurich. His research interests are artificial life (neural networks, developmental system etc.) and robotics.

石黒章夫 (Akio Ishiguro)

1964 年 5 月 18 日生。1987 年名古屋大学工学部電子機械工科学卒業。1991 年名古屋大学大学院工学研究科電子機械工学専攻博士課程後期課程修了。同年、同大学助手。1997 年同大学大学院工学研究科計算理工学専攻助教授、現在に至る。この間、チューリッヒ大学客員研究員。主として、創発システムならびにロボット工学に関する研究に従事(工学博士)。日本 AEM 学会論文賞、日本機械学会優秀講演論文賞などを受賞。IEEE、日本機械学会、電気学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)