

マルチロボットシステムにおける多様性の生成と機能創発

---リズムの相互引き込みに基づく「場」的制御---

金沢工大 ○三宅美博

Diversity Generation and Function Emergence in Multi Robot System

---Mutual-Entrainment-Based BA Oriented Control---

○ Yoshihiro MIYAKE (Kanazawa Inst. Tech.)

Abstract--- Mutual-entrainment-based BA oriented control in distributed intelligent system is proposed based on our experimental findings in biological pattern formation in *Physarum*. In this report, coordinative group formation model and coordinative luggage carrying model in multi robot system were constructed as examples of it. As a result, it was clarified that self-referential metadynamics which generates constraints for self-organization dynamics between the multi robotic system is essential to realize diversity generation and function emergence in such system.

1. はじめに

従来の知的人工システムでは、設計者がシステムと環境を分離し環境のとりうる状態とシステムの応答の集合をあらかじめ規定し、それらの間での写像関係をルールとして規定することによって明示的に設計されてきた。しかし、このような自己完結型の方法では環境が複雑化するにつれシステムが際限なく肥大化し、しかも、あらかじめ規定されていない環境には対応できないという原理的限界も生じさせる。

一方、生命システムは有限の複雑さしか持たないにも関わらず、それよりも遥かに複雑な外部環境の中で自律的に生きていくことができる。これは内部観測に伴う情報の部分性とそれに基づくシステムの無限定性を、拘束条件の自己生成によって自己言及的に限定できることに基づいている。特に、システムと環境の間での循環的相互作用を通して自他非分離的な「場」を自己組織することを通して、適切な拘束条件の生成が可能になる。

本研究では、生命システムの持つこのような自己不完結性に基づく開かれた知の在り方に学び、人工システムにおける「場」的制御を実現する。特に、ここではマルチロボットシステムにおける多様性の生成と機能創発の問題を設定し、ロボット間および外部環境に対して開かれているモデルを構築する。

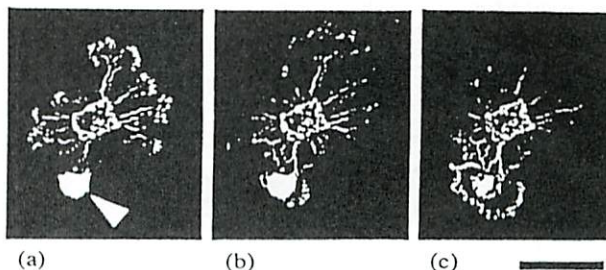


図 1

2. リズムの相互引き込みに基づく

「場」的制御 [1]

著者は、実際の生命システムから「場」の基本構造を学び、それに基づいて知的マルチロボットシステムを構築するというアプローチを試みている。そして、図1に示す真正粘菌 (*Physarum*) というアメーバ状生物の走化性をモデル系として、その環境適応的な形態形成機構の解明からスタートした。

その結果、この生物は表現の無限定性を持つサブシステムの集団から構成され、その無限定性が細胞内リズムの相互引き込みを通して協調的に限定されることを実験的に示した。そのとき個々のサブシステムの表現、たとえば頭や尾という分化は、局所的な外部環境だけで決定されるのではなく、他のサブシステムとの相互関係に基づいて規定された。つまり、サブシステムが相互に多様化し協調的に機能分散すること

で、個体全体としての機能が創発されることが示された。

例えば図2のように、ひも状の粘菌の両端2カ所に誘引刺激を与えた場合でも、個体が分裂するように走化性が発現することはない。このとき両端の領域でローカルには誘引刺激として受容されているにも関わらず、相互引き込みを通して細胞内リズムが個体全体としてコヒーレントなクラスターを生成することによって、一方では接近する行動が現れ、他方では逃避する行動が現れる。つまり、環境に対する意味づけが、そのローカルな環境自体によって決定されるのではなく、個体全体としての統合性によって規定されている。

このとき同調したコヒーレントなクラスター内の位相構造を解析してみると、図3のように、刺激地点から他端へ向かって位相勾配（位相の空間微分）が単調に減少している。さらに、これに対応するように、各領域での行動速度も単調に減少した。このことは、クラスター内が均質なのではなく、積極的に多様化していることを示している。さらに、このグローバルな秩序はシステムサイズでスケールアップされていることも示された。つまり、ローカルに定義される位相勾配という形で、各領域がそれぞれの位置においてコヒーレントな秩序を解釈することによって、各領域のシステム全体の中での相対的位置関係がわかり、それに基づいて個々の領域の行動状態が限定され走化性における協調的な応答を可能にしていることを示唆している。

これらのことを踏まえて、図4のようにまとめることができる。まず、全体システムは多数のサブシステムから構成され、個々のサブシステムは無限定性を有する身体系とそれを限定するための拘束条件を生成するコンテキスト系という2中心から構成される。身体系はリズム的性質をもつ構成要素から構成され、近接する身体系との間および環境との間での相互引き込みを通してグローバルな「場」（外部場）を自己組織する。さらに、その外部場の秩序に関する場の情報が個々のサブシステムのコンテキスト

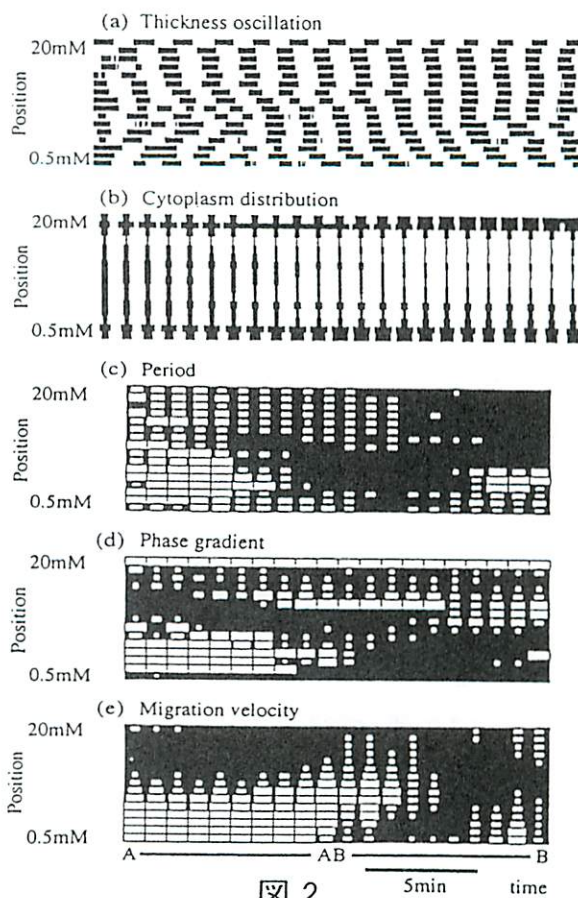


図 2

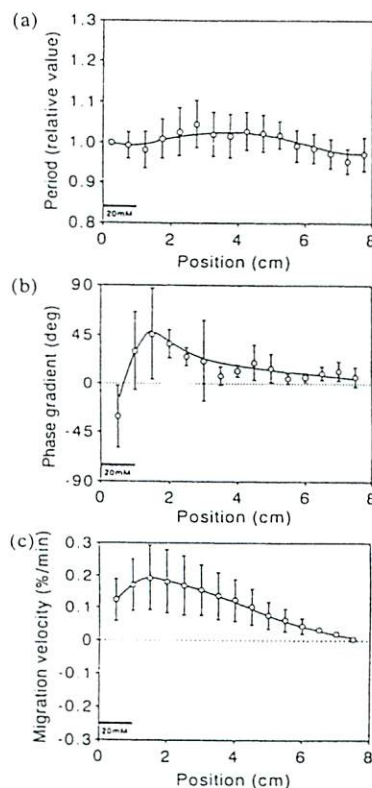


図 3

系によって解釈され、その内部に位相勾配としての「場」（内部場）を表現することになる。これは各サブシステムのシステム全体の中での位置関係および環境との関係を表現しており、部分の中に全体が映されていると言える。さらに、その内部場に基づいて拘束条件が生成され、自己言及的に身体系に戻すことでその無限定性が限定され、身体系間での自己組織を通して生成する外部場の機能表現が規定される。

3. グループ編成マルチロボット [2]

以下、マルチロボットにおける多様性生成と機能創発の問題に上記の制御手法を適用する。まず、最も簡単なケースとして、ロボット間でのみ開かれているマルチロボットシステムを構築した。具体的には、図5のように、一定外部環境下での隊列歩行において、その相対位置に応じたグループ編成として多様化させることを試みた。

システムの基本構造は図4の制御モデルに基づいて、個々の歩行ロボットをサブシステムに対応させる。さらにサブシステムは2中心からなり、一つはロボット本体としての身体系であり、それは近接ロボットの歩行リズムとの相互引き込みを通して外部場を自己組織する。もう一方は、その外部場を解釈し、拘束条件を生成し身体系の歩行パターンの多義性を限定するコンテキスト系である。

個々のロボットの身体系としては、図6の多質の2足歩行モデルを用いる[3]。これは、神経系と筋骨格系の間での循環的相互作用を通して多義的な歩行パターンを自己組織できるモデルであり、拘束条件としての神経系への定常入力に依存して歩行パターンが限定される。また、この身体系における歩行リズムの相互引き込みを通して自己組織されるグローバルな運動パターンとして外部場が生成される。隣り合って人と歩いたときに歩行リズムが同調した経験をもつ人は多いと思われるが、それに対応した現象である。具体的には、ロボットの足の接地タイミングをパルス信号として、隣接ロボットの対応した神経系に入力する。このような条件下

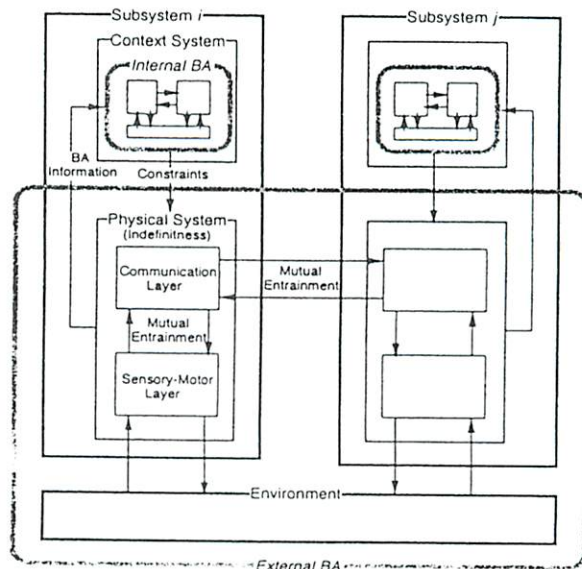


図 4

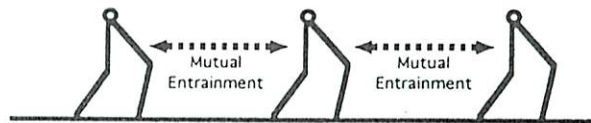


図 5

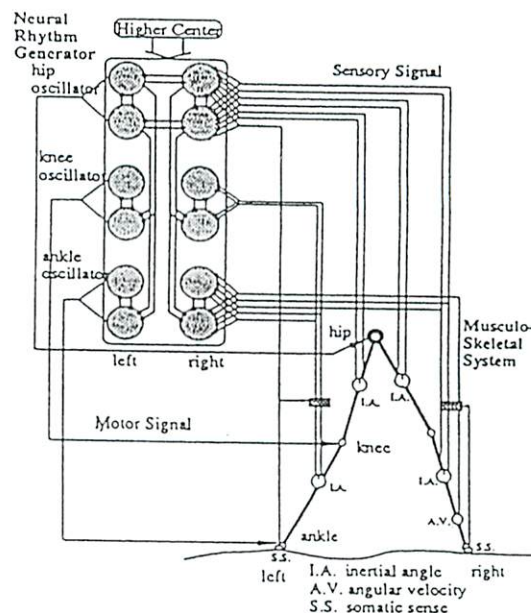


図 6

での歩行リズムの相互引き込みを通して自己組織される外部場を図7に示す。各ロボットの足の接地タイミングが徐々にずれていることがわかる。

ただ、この身体系だけでは、拘束条件を自己生成するためのメカニズムを持たない。そこで図4のコンテキスト系を参考にして、位相勾配としてのローカル量に着目し、外部場から場の秩序に関する場の情報を取り出す。具体的には、隣接するロボット間の足の接地タイミングの時間差を位相勾配と定義すると、図7のように隊列の先頭から末尾にかけて直線的な勾配が生成される。このようなグローバルパターンは、粘菌の場合と同様で、ロボット間の相対的位置関係を示す情報を担い得る。そこで各ロボットでは、これを拘束条件として、身体系における歩行パターン、特に歩幅を自己限定することによって、ロボット相互の距離が調節されグループ編成としての多様化を達成する。

このような場の自己組織による制御は予測できない環境下で有効である。ただし、ここでは外部環境が一定であるため、マルチロボット内における予測できない変化に対する応答を調べた。その一例として、9体3グループ編成で歩行中に3体のロボットを急に除去した結果を示す。図8のように、最終的に6体3グループが自発的に再編成された。これは位相勾配パターンがシステムサイズの変化に対応してリアルタイムで再構築され、個々のロボットの機能が再規定されるからである。例えば図中のロボットAは最初はグループ1であったが、結果的にグループ2になっている。このような相互補償は、ロボットを除去あるいは追加する位置とその数に依存せず観察された。もし、このような制御を明示的に記述したら、記述量の爆発を生じるであろう。

4. 荷物運搬マルチロボット

グループ編成モデルでは、外部環境を一定と仮定しているため、環境とシステムの間での相互作用を通して生成する機能の問題を扱えない。そこで、ここでは図9のように、マルチ

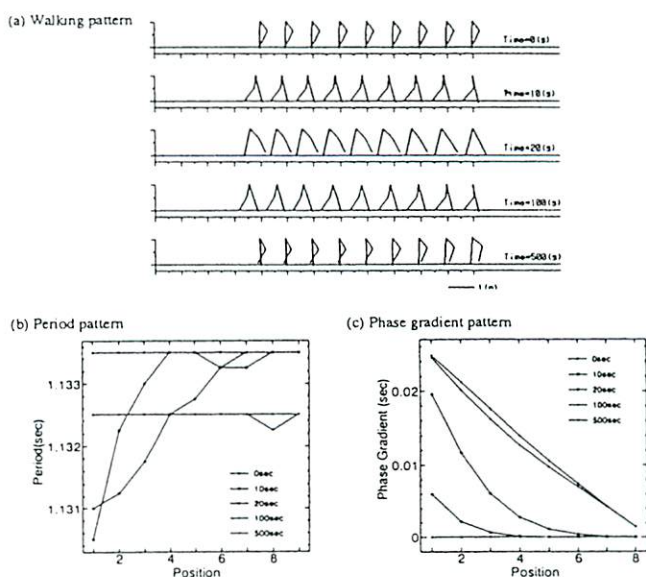


図7

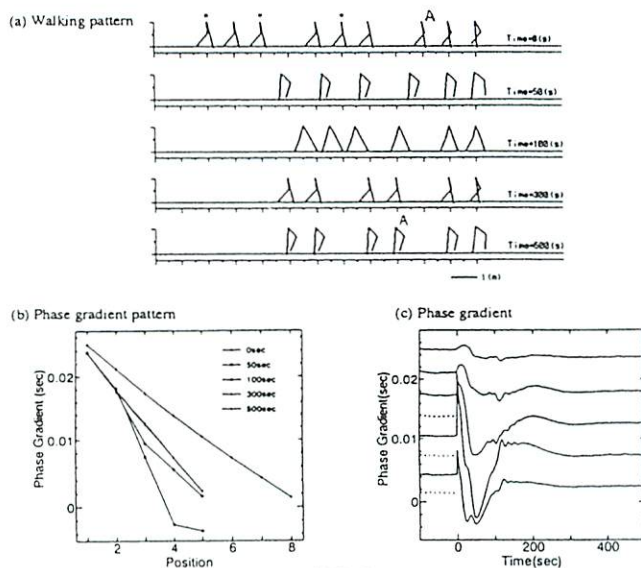


図8

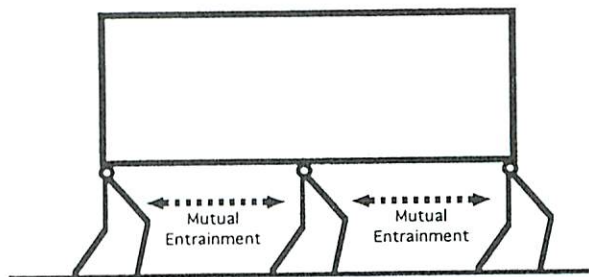


図9

ロボットが多様化し、大きい荷物を役割分担して運搬する問題を設定し、ロボット間だけではなく、外部環境としての荷物に対しても開かれているモデルを構築する。

まず、個々のサブシステムにおける身体系として用いたのは、先と同様の歩行ロボットとその相互引き込みである。このようなロボットの身体系相互と荷物の中で相互作用を通して自己組織される外部場のうち、荷物を運搬できる場合を図10に、運搬できずに転ぶ場合を図11に示す。このとき重要なことは、システムが外部環境に開かれていることから、システムと環境の関係が場の秩序に反映されることである。具体的には、各ロボットの歩行パターンは、運搬する荷物の運動や属性からの影響を受ける。

このときコンテキスト系では、外部場の秩序は、個々のロボットの歩行リズムに伴う腰の上下振動として解釈してみた。図12は、内部場で解釈された場の情報の一例を表示している。荷物が軽いときは、揺れの周期が歩行周期の約1/2で安定なモードであるが、運べる重さの限界に近付くと、ほぼ歩行周期の不安定モードへと不連続転移する。このことは、ロボットと荷物の相互関係が内部場の周期性に表現されていることを示している。さらに、この運動パターンの振幅に関して解析したところ、安定モードのときは、隊列の先頭のロボットから末尾にかけて振幅が単調に減少することがわかった。このことは、各ロボットの相対的位置関係も内部場に表現される可能性を示している。詳細な解析は現在進行中である。

また、コンテキスト系からの拘束条件に関しても調べてみた。具体的には、個々のロボットを歩行パターンの違いとして多様化し機能分散することの有効性を検討した。そこでは、個々のロボットの拘束条件を人為的に設定し、その組み合わせに対する機能評価としてマルチロボットが運べる荷物の重さの上限を調べた。その結果、図13のように、マルチロボットが多様化する方がより重い荷物を運べることが明らかになった。このことより、本モデルにおいて外部場を内部場が解釈し、拘束条件を自己生成

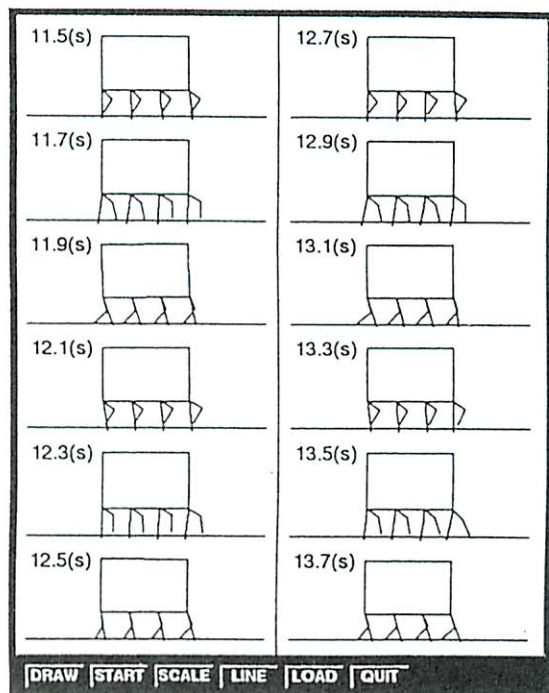


図 1 0

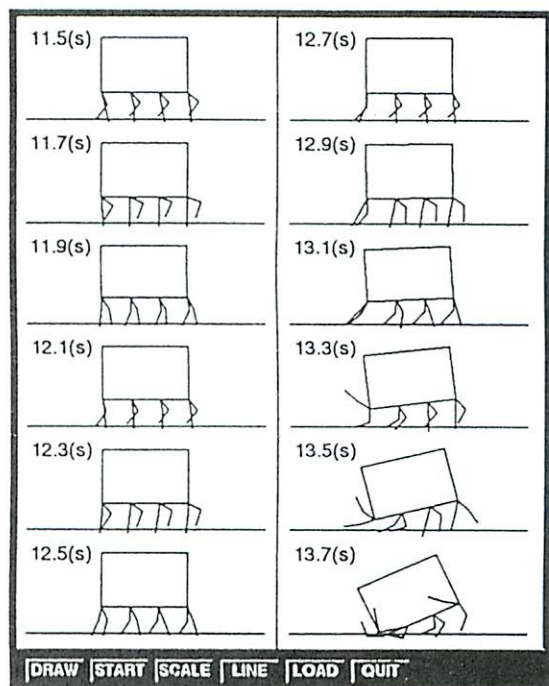


図 1 1

することで個々のロボットが状況に応じて自発的に多様化し柔軟に機能創発できる可能性が示唆される。なお、このモデルにおける状況依存的な機能分散やその相互補償性に関する問題は現在検討中である。

5. まとめ

本研究では、自他非分離的なシステム制御方法の一つとして「場」的制御に関する提案を行なった。このようなシステムのモデル化としては、自己組織と自己言及という2つのアプローチが考えられる。自己組織では、システムが観察者の視点から構築されており、拘束条件の生成の問題を扱うことはできない。例えば、行動ベースA1[4]やグローバルエンタインメント[3]が相当する。そこでは、システムと環境の間での情報の循環性は問題にするが、その統合性を自己組織モデルの範疇で扱うことはできない。その意味では1中心モデルである。一方、自己言及系は、自己組織系に拘束条件生成のメタダイナミクスをつけた2中心モデルであり、システム自身にとっての視点からシステム的设计と制御を扱うことができる。ただ、人工システムとしては未だ実現された例はなく、実在する自己言及システムの例として生命系が挙げられる。

本レポートでは、生命システム、特に粘菌の走化性に着目し、マルチロボットシステムにおける自己言及的制御モデルの構築を試みた。ただし、人工的に構築するモデルであるから完全な意味での自己言及を実現することは不可能である。特に、コンテキスト系としての内部場をどのように構築するかということが重大な問題となる。まず、何を場の情報とするか、それからどのように拘束条件を作るか、という問題である。これには普遍的な解はないと思われる。むしろ生命システムの主体性が関与する領域であり意味論の領域である。結果的に、現状では人間が設計者として関与せざるをえない状態にある。その意味でも、完全な意味での自己言及系を構築することは不可能である。むしろ、システム設計をメタレベル化するという方がより実体に近いと考えられる。その意味でも、生命システムから学ぶことの重要性がある。また多くの構築例から一般的ルールを発見することも重要であろう。

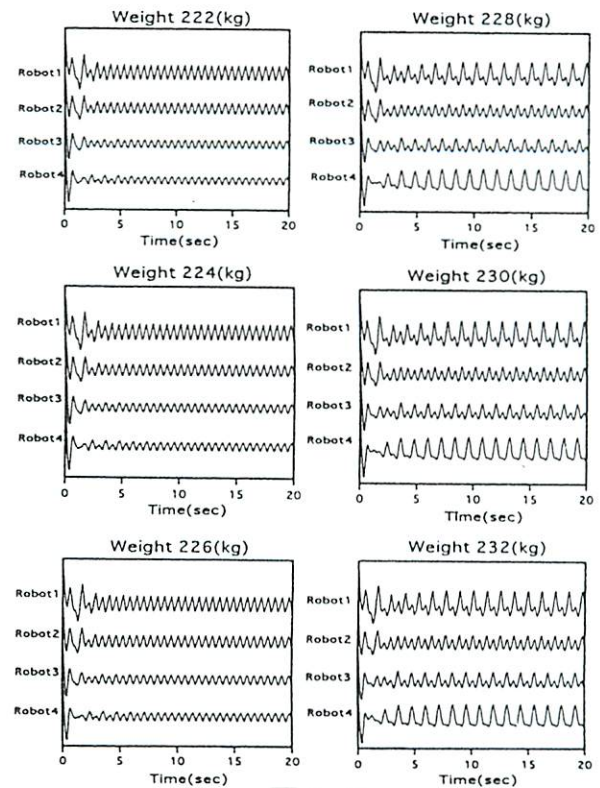


図 1 2

Pattern \ Weight (kg)	190	200	210	220	230	240
190	○	○	○	○	○	○
200	○	○	○	○	○	○
210			○	○	○	○
220				○		
230				○		
240						

図 1 3

参考文献

- [1] Y. Miyake, S. Tabata, H. Murakami, M. Yano and H. Shimizu (1995), Environment-dependent self-organization of positional information field in chemotaxis of *Physarum plasmodium*. *J. Theor. Biol.* (in press)
- [2] Y. Miyake, G. Taga, Y. Ohto, Y. Yamaguchi and H. Shimizu (1994), Mutual-entrainment-based communication field in distributed autonomous robotic system. In: *Distributed autonomous robotic systems* (Asama H., eds). Springer-Verlag, pp. 310-321.
- [3] G. Taga, Y. Yamaguchi and H. Shimizu, "Self-organization control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment," *Biol. Cybern.*, vol. 65, pp. 147-159, 1991.
- [4] R. A. Brooks, "A robust layered control system for a mobile robot," *IEEE J. Robotics Automat.*, vol. RA-2, no. 1, pp. 14-23, Mar. 1986.