

# B-154 リズムの引き込みによる 多体二足歩行ロボットの協調動作

三宅美博(金沢工大 情報工学)・多賀敏太郎(東大 薬学)・  
○大戸康紀(金沢工大 情報工学)・山口陽子・清水博(東大 薬学)

## 1. はじめに

生物は性質の異なる多様な要素からなるシステムであり、要素間の協力性によって複雑な環境の中でも一つの統合されたシステムとして振る舞うことができる。では、これにはどのような情報統合原理が働いているのであろうか?

こうした要素間の協力性は、一般に非線形非平衡システムで見られる現象であり、物理系や化学反応系では、時空間パターンが自己組織的に生成されることが知られている。例えばPrigogineの非線形非平衡系の熱力学<sup>1)</sup>、Hakenのsynergetics<sup>2)</sup>があるが、これらは均質な要素と固定した境界条件のもとでのみ扱われているという問題がある。

一方、マルチエージェントシステムの一例として、Brooksは知能ロボットの制御においてsubsumption algorithm<sup>3)</sup>を提案している。その構成要素は機能分化され、システムが環境に働きかけ応答を得ることで不確定な境界条件に対応している。しかし、その構成要素間の相互作用はアルゴリズム的であり、複雑である。

最近、多賀らは二足歩行ロボットモデルにおいて、構成要素間の引き込みによって環境を含めたシステム全体で安定なダイナミクスを生成させるglobal entrainment<sup>4)</sup>というアイデアを提案した。この相互作用は非アルゴリズム的であり、その自律性によって不整地環境においても容易に安定かつ柔軟な歩行運動を生成することができる。

そこで、本研究ではこの二足歩行ロボットを多体系に拡張し、異なるロボット間のコミュニケーションにおいてもglobal entrainmentが生成する可能性を検討する。このような相互作用の研究は、新しいタイプとしての自己組織的マルチエージェントシステムの実現に向けて重要な知見をもたらすであろう。

## 2. 二足歩行ロボット<sup>4)</sup>

### 2.1. global entrainment

歩行運動は被制御系としての筋骨格系とこれを制御する神経系の2つのサブシステム間の相互作用の結果として生成されると考えられる。筋骨格系はその構造に依存した固有振動モードを持ち、神経系の持つリズムと相互引き込みを行い、システム全体で安定かつ柔軟な歩行運動を生成する。このようにサブシステム間での引き込みによって生じた、システム全体としてのより大域的な安定状態をglobal entrainmentと呼ぶ。

### 2.2. 筋骨格系

ヒトの身体が持つ構造を考力学的な記述をする (Fig. 1) 環境は筋骨格系への作用または拘束条件として扱う。二足歩行ロボットの運動方程式(Newton Euler equation)は以下ようになる。

$$\ddot{x} = P(x)[C(x)P(x)]^{-1} \left[ D(x, \dot{x}) - C(x)Q(x, \dot{x}, Tr(y), Fg(x, \dot{x})) \right] + Q(x, \dot{x}, Tr(y), Fg(x, \dot{x})) \quad (1)$$

ここで、 $x$ は各リンクの重心座標及び角度、 $Tr$ は各関節のトルク、 $Fg$ はankleに作用する床反力を表し、 $P, C$ は係数行列、 $Q, D$ はベクトルを表す。

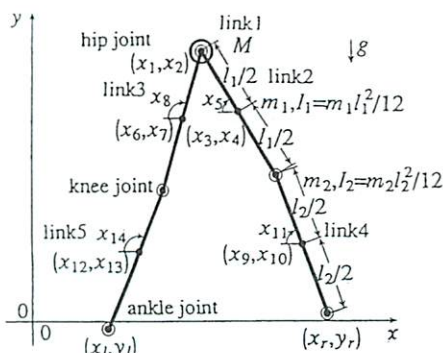


Fig.1 Musculo-Skeletal System.  
(文献4より改変)

## 2.3. 神経系

ニューラルリズムジェネレータ(neural rhythm generator)は神経振動子(neural oscillator)から構成され、歩行運動に必要な振動パターンを自律的に生成する。出力はトルクに変換され各関節に働き (Fig. 2)、筋骨格系の状態は神経系にフィードバックされる (Fig. 3)。これは以下のような微分方程式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \tau_i \dot{u}_i &= -u_i + \sum_{j=1}^{12} w_{i,j} y_j - \beta v_i + u_0 + Feed_i(x, \dot{x}, Fg(x, \dot{x})) \\ \tau_i' \dot{v}_i &= -v_i + y_i \\ y &= f(u_i) \quad (f(u) = \max(0, u)) \quad (i = 1, \dots, 12) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $u_i$ はニューロンの内部状態(膜電位)、 $v_i$ はその自己抑制因子を示す変数、 $y_i$ は出力、 $w_{i,j}$ は結合定数、 $u_0$ は上位中枢からの入力、 $\tau_i, \tau_i'$ は時定数、 $\beta$ は係数を表し、 $Feed_i$ は筋骨格系の運動のフィードバックを表す。

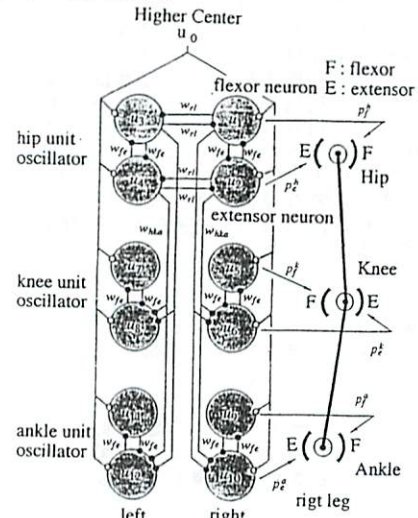


Fig.2 Neural Rhythm Generator.  
(文献4より改変)

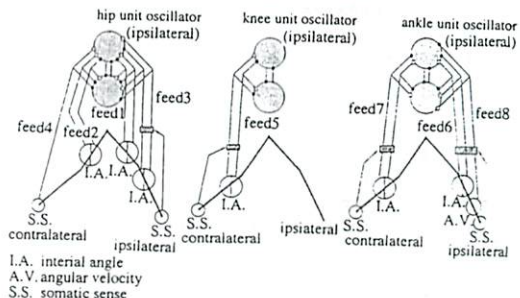


Fig.3 Sensory feedback to Neural Rhythm Generator.  
(文献4より改変)

## 3. ロボット間の相互作用

### 3.1. 方針

hipニューロンへの上位中枢からの入力として、 $u_0$ のバルス変化に対する引き込みにより歩行の周期(period)を、 $u_0$ のオフセットにより歩幅(stride length)を、それぞれ制御可能なことを我々はすでに示した<sup>4)</sup>。そこで、多体ロボット間での協調動作の一例として、2つのロボットが横に並んでそって歩くことを考える。足の接地時間をそろえるために、他のロボットの足の接地タイミングに基づき、バルス成分によって周期を変更する。また、ロボット間の距離と速度をそろえるために、他のロボットとの距離と速度の差に基づき、オフセット成分によって歩幅を変更する。このバルスとオフセットの2成分を、上位中枢を介した知覚情報として、以下のようにhipニューロンへ入力する。

$$u_{01,k} = u_{put,k} + u_{off,k}$$

$$u_{03,k} = -u_{put,k} + u_{off,k} \quad (k = 1, 2) \quad (3)$$

ここで、 $u_{01,k}, u_{03,k}$ はhipニューロンへの相互作用入力、 $u_{put,k}$ はパルス成分、 $u_{off,k}$ はオフセット成分、 $k$ はロボット番号を表す。ただし、ここでは簡単のため、2体間の相互作用に限定する。

3.2. 足の接地タイミングによる相互作用

パルス成分は、以下のように計算される。

$$u_{put,k} = -A \text{ for } x_{r,3-k} < y_g(y_{r,3-k}), T_{r,3-k} < B$$

$$u_{put,k} = A \text{ for } x_{l,3-k} < y_g(y_{l,3-k}), T_{l,3-k} < B$$

$$u_{put,k} = 0 \text{ otherwise} \quad (k = 1, 2) \quad (4)$$

ここで、 $y_g$ は地面の高さ、 $(x_{r,k}, y_{r,k}), (x_{l,k}, y_{l,k})$ はankleの位置、 $T_{r,k}, T_{l,k}$ は足が接地してから時間、 $A$ はパルスの高さ、 $B$ は持続時間を表す。

3.3. ロボット間の距離と速度による相互作用

オフセット成分は、以下のように計算される。

$$\tau \dot{u}_{off,k} = C(x_{l,3-k} - x_{l,k}) + D(\dot{x}_{l,3-k} - \dot{x}_{l,k}) \quad (k = 1, 2) \quad (5)$$

ここで、 $x_{l,k}$ はロボットのhipの水平方向の位置、 $\tau$ は時定数、 $C, D$ は係数を表す。

4.2. 整地において相互作用がない場合<sup>\*)</sup>

上位中枢からの入力をそれぞれ  $u_{0i} = 5.5, 5.0$  に固定した2体のロボット (ROBOT1, 2) を仮定する。Fig. 2aはロボットの歩行状態を1秒毎に表しており、2体のロボット間の距離が徐々に増加していることを示している。Fig. 2b, 2cは歩幅、周期の経時変化を表しており、ROBOT1, 2の歩幅、周期は共に異なったまま変化しなかったことを示している。このことより相互作用がない場合ROBOT1, 2は異なる歩行パターンを持つことがわかる。

4.3. 整地において相互作用がある場合<sup>\*)</sup>

4.2. 節において使用したロボットと同一のものをを用いた。Fig. 4aは相互作用によって2体のロボット間の距離が徐々に減少し、歩行パターンがそろったことを示している。Fig. 4b, 4cより、このときROBOT1, 2の歩幅、周期はそれぞれ同じ値に収束したことがわかる。

4.4. 不整地において相互作用がある場合

ROBOT2の路面の一部に上り坂を設け、ROBOT2にのみ一過的に外乱を加えた場合の歩行パターンの経時変化を調べた。Fig. 5aはROBOT2の歩行パターンが坂の所で変化した、その後2体間の距離が再び減少し、歩行パターンがそろったことを示している。Fig. 5b, 5cより、坂によってROBOT2の歩幅、周期が変化すると、ROBOT1にもその影響が及ぶが、それらは再び同じ値に収束したことがわかる。

5. 考察

以上の結果より、相互引き込みによって2体のロボット間でも安定した協調的歩行運動が形成されること、環境からの外乱に対してもそのような歩行運動が安定化されることが示された。このことは、各ロボットが引き込みを通して情報のやり取りを行ない、それぞれが自律的にダイナミクスを変更し、システム全体として大域的に安定化するglobal entrainmentを形成していることを意味している。

6. おわりに

本研究では、2体のロボットがglobal entrainmentを通してシステム全体として安定した協調的歩行運動を生成しうることを示した。今後はこれを多体系に拡張し、引き込みのような非アルゴリズム的な相互作用が、マルチエージェントシステムにおいても有効であることを示していきたい。

また、前発表のように粘菌の走性における情報統合メカニズムとしても引き込みが用いられていたことは、本モデルの提案するメカニズムが生物系における普遍的な情報統合機構に由来するものであることを強く示唆する。

参考文献

- 1) G. Nicolis, Prigogine, "Self-Organization in Nonequilibrium Systems-From Dissipative Structures to Order through Fluctuations", John Wiley & Sons. (1977)
- 2) H. Haken, "Synergetics, An Introduction, 3rd ed.", Springer. (1983)
- 3) R. A. Brooks, "A Robust Layered Control System for a Mobile Robot", IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. RA-2, no. 1, pp14-23. (1986)
- 4) G. Taga, Y. Yamaguchi, H. Shimizu "Self-Organized Control of Bipedal Locomotion by Neural Oscillators in Unpredictable Environment", Biol. Cybern. 65, pp147-159. (1991)
- 5) 岡山、加藤、釜野、花房、中山、中村、牧野、松田、"ニューラルオシレータによる二足歩行ロボットの自律制御に関する研究", 金沢工業大学, 卒業論文. (1992)
- 6) G. Taga, Y. Miyake, Y. Yamaguchi, H. Shimizu, "Generation and Coordination of Bipedal Locomotion through Global Entrainment", (submitted to International Symposium on Autonomous Decentralized Systems '93)

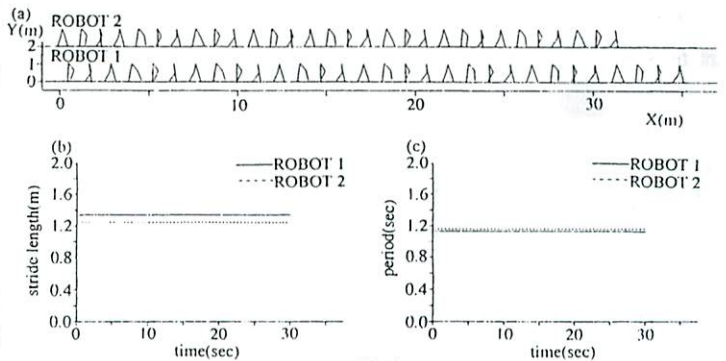


Fig.4

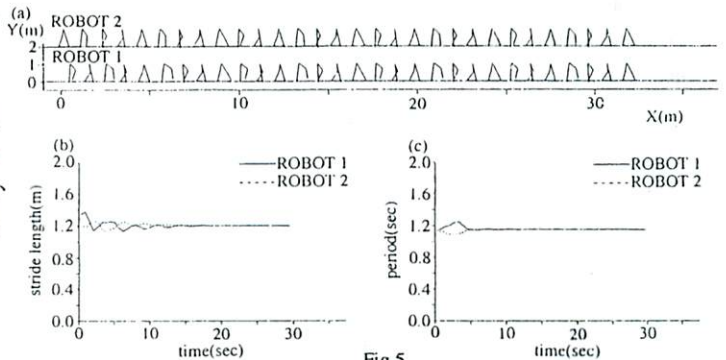


Fig.5

Fig.4,5,6 Time evolution of walking pattern, stride length and period.

Fig.4は地面が整地であり、ロボット間の相互作用がない場合における歩行パターン(a)、歩幅(b)、周期(c)の経時変化を表している。Fig.5は地面が整地であり、ロボット間の相互作用がある場合、Fig.6は実験で示した19mから23mの間の地面がROBOT2のみ上り坂であり、相互作用がある場合、歩幅はロボットの一方の足が接地した座標から、次に同じ足が再度接地するまでの距離として、周期は一方の足が接地した時刻から、次に同じ足が再度接地するまでの時間間隔として求める。

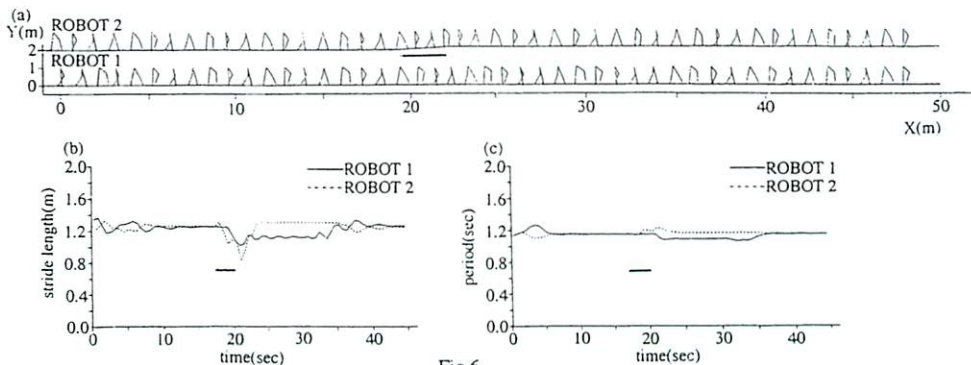


Fig.6