

情報の自律生成

矢野雅文

東北大学・電気通信研究所

生物における情報処理の特長はその柔軟性とリアルタイム性にある。柔軟性とは生物が予測不可能に変化する環境との間に目的を果たすような適切な関係的秩序を即時的かつ自律的に作り出すことである。歩行の場合は目的である速度、方向等を制御しながら変化する環境下で歩行パターンをリアルタイムで自律的に生成する。本研究では環境が予測不可能に変化するだけではなく、システム自身に予測できない事故や、故障が生じたときに補償作用により、制御する情報を自ら作り出すシステムの構築を行った。

時々刻々変化する環境の変化に対してリアルタイムに対応できる運動パターンの生成や、認識システムはまだ可能になっていない。これは変化に対してアルゴリズムックに対応する従来の方法ではリアルタイム制御が出来ないことを意味している。つまり、これまでの方法はさまざまな状況を想定して、軌道計算をし、学習をすることによって歩行パターンを作り出すという中央制御方式である。このやり方は学習のために用意する状況が増えれば増えるほど必要なメモリーが爆発的に増大する。このことは検索問題一つを取り上げてもしリアルタイムの制御が困難になるし、そもそも予測出来ない変化には原理的に対応出来ない。

我々は変化に応じて情報を生成出来るシステムでなければ、予測不可能な環境変化に対応できる運動制御システムは構築できないという立場から、新しい運動制御システムを構成した。そのために次の3つの段階が必要であることを指摘した。

- 1) システム構成の要素を何にとるか。
- 2) この要素からなるシステムの構造をどのようにして決めるのか。
- 3) システムが情報を生成するルール何か。

要素に関しては、環境と運動システムが調和的な関係を作るという立場から、神経細胞の機能を数学的に表現でき、しかもよりシンプルな方程式が必要となる。神経細胞の興奮の定量的記述に成功した例として Hodgkin - Huxley 方程式 (H - H 方程式) がよく知られている。この研究は神経細胞の軸索の興奮の動的性質を分子レベルから説明出来たと言う意味で高い評価を得ている。この方程式は、しかしながら、4次の連立方程式であり、これをシステムの要素として用いるには複雑すぎる。そこで H - H 方程式の単純形として用いられている Fitzhugh - Nagumo、van der Pole、Mathieu、Duffing 等の振動子も振動数変化などの点で、H - H 方程式ほど柔軟でないので、神経細胞を記述する方程式としては適当ではない。そこで我々はこれらの条件を満足する新しい非線形方程式次の非線形振動子が適当であることを発見した。

$$d^2X/dt^2 + (a_1X^2 + b_1X + c_1) dX/dt + (a_2X^2 + b_2X + c_2) X + d = 0$$

これらの振動子からなる神経回路網の構造と、それに支配される筋肉の構造が重

要である。昆虫の中樞神経系は左右対照な梯状の神経節よりなっている。このうち、肢の動きを制御する神経節はそれぞれ、前肢を制御する前胸神経節、中肢を制御する中胸神経節、後肢を制御する後胸神経節の3つからなっており、各々一対あり、互いに連絡している。さらにこれらの上位の神経節である脳神経節と連絡している。肢を動かす筋肉の状態が感覚神経を介して得られる情報は筋肉が発生する力と伸張状態（位置）及び接触に関する情報である。

自律分散型システムで最も重要なことは「システムが情報を生成するルール何か？」ということである。つまり、重要なことは振舞いを決める関係生成ルールである。運動を支配する神経系の働きを理想化して考えると、各肢を動かす神経系は個体全体の要求、すなわちどの方向にどの位の速度で移動するかといったことを満足しながら、しかも変化する環境のもとで最もエネルギー変換効率の良い動きを生み出すことである。よく知られているように筋肉にはエネルギー効率が最も高い力と速度が存在し、それ以下でも以上でも効率が悪くなる。目的速度を実現するという条件の下で、各筋肉が最適効率で働くように、協調的あるいは競合的に相互作用することによって制御情報を生成するのが神経回路網の機能である。即ち、各肢が目的速度を達成するように、これを支配する神経回路の活動を個々の足にかかる負荷を回路内部の結合定数にフィードバックして、負荷を全体に分配させる様に変化させる様に調節することである。この関係生成ルールを我々は「最大多数の最少不満足」則と呼ぶ。なお、ここでは筋肉は簡単のために各肢を動かすために一対の拮抗筋（関節を伸ばす extensor と関節を縮める flexor）だけを考えて。

歩行パターンの自律生成の特徴の一つに、歩行速度に依存してそのパターンが変化することが実験的に知られている。このモデルでも図1に示すように歩行パターンは速度を上げていったときに Gait 2 から Gait 1 に変化する。中肢と前あるいは中肢と後肢は逆位相で動く。Gait 1 と Gait 2 の違いは前肢と後肢の位相関係で

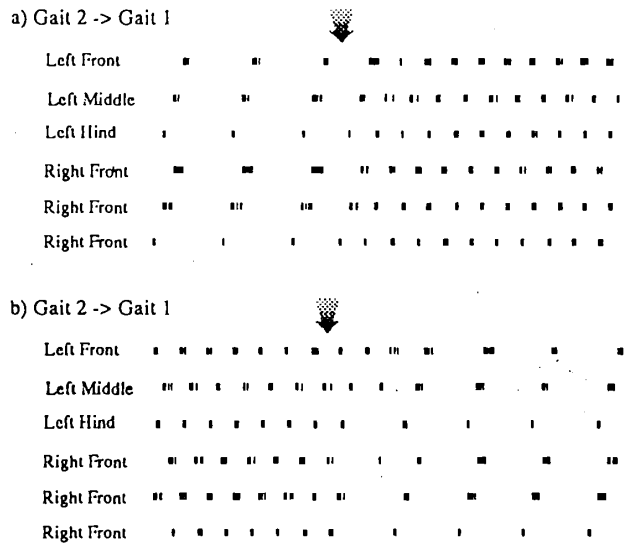


図1. Walking patterns and their phase transitions: walking velocity is gradually increased (a), and walking velocity is gradually decreased (b). In both cases, the walking pattern changes at the arrowed point

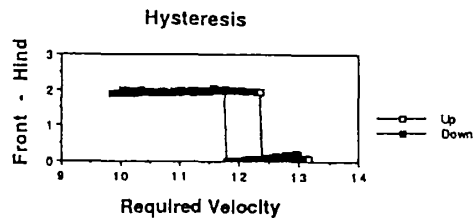


図2 Time difference between front and hind legs when walking velocity gradually increases or decreases. Filled squares and open circles represent time differences at increasing and decreasing velocities, respectively. This hysteretic phenomenon suggests that pattern organization of this model system occurs due to synergy of the subsystems

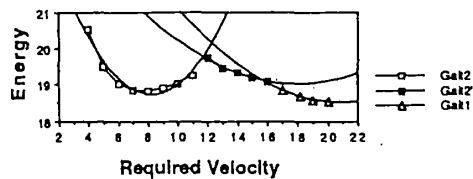


図3 Energy consumption of muscle contraction using muscle properties. The open squares, open circles, and filled triangles represent gait 2, gait 2', and gait 1, respectively. The parabolic curves are fitted with simulation data by the least squares method. The curves intersect at the phase transition point, and the lower energy pattern is realized at a certain walking velocity.

ある。このモデルでは実験とよく合う結果が得られるし、摂動にも非常に強い安定したパターンである。この変化は速度を上げていった時と下げていった時ではパターン変化の起きる速度が異なる、一種のヒステリシスを示す(図2)。これらの変化が競合と協調によって起きる相転移現象であることを示している。さらにエネルギー変換効率を計算してみると単位距離当りの消費エネルギーは殆ど変わらない(図3)。これは馬の歩行実験で得られている実験結果と良く合う。

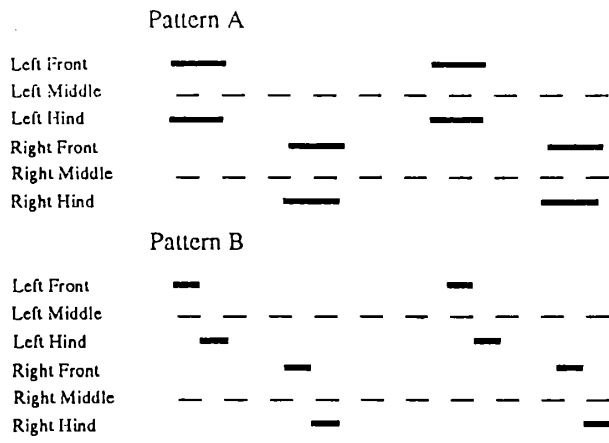


図4 The walking patterns when the middle legs on both sides are femorally amputated. Pattern A is observed at a higher velocity than pattern B

次にこのシステムの普遍的な性質を研究する目的で、システムが歩行速度だけではなく、システムにかかる負荷が変化する場合や、突然足がもぎ取られるという重大な故障が起きたときに、学習無しにその状況でも適切な歩行パターンを生成出来るかどうかを研究した。つまり生物の持つ補償作用が含まれているかどうかである。

- 1) Load Effect: 進行方向に平行な加重を与えた場合、その加重の増加に伴って歩行パターンの間の相転移点が低速度側にシフトするのが観察される。加重が増加するにしたがって、肢相互の位相関係の揺らぎも又増大したが、生成するパターンには変化がみられなかった。この結果は実験事実に対応している。
- 2) Amputation: 対応する肢の力の寄与及び力のFeedbackのみを無効にする tibial amputee (下腿部切除) と、位置の制御及び位置のFeedbackまで無効にする femoral amputee (上腿部切除) の二種類についてシミュレーションを試みた。tibial amputeeでは正常時の同様のパターンを生成したが、その相転移点は低速度側にシフトするのが観察された。また femoral amputeeでは、肢の位置に関するFeedbackによるローカルな拘束条件が変化するため、位相関係の組替えが起こり、主として2種類のパターンに収束し、4足動物と同じ様な歩き方を作り出すことが出来る。これらの現象は共に昆虫を用いた実験に非常に良く対応している(図4)。ここで分かるように、これまで歩行パターンの研究がキネマティックな方法論にとどまっていたのとは対照的に、負荷や故障に即時に対応できるダイナミックなモデルになっているのが特長である。

このモデルが成功した理由は、個々の足の情報は各足が速度依存的に変化するローカルな評価関数を満たすように、時定数が小さいローカルなフィードバックと全部の足との関係を取る時定数の大きなグローバルなフィードバックが競合、協調することで、全体と個がつじつまの合うような制御情報が作れることによる。

文献

1. Kimura S., Yano M. & Shimizu H. A self-organizing model of walking patterns of insects. Biol. Cybern. 69: 183-193(1993)
2. Kimura S., Yano M. & Shimizu H. A self-Organizing model of Walking Patterns of Insect II. The loading effect and leg amputation (1994) Biol. Cybernetics vol. 70, 505-512