

# OS0220 CPG を用いた四足ロボットの歩行制御

## — 脚先の接触センサによる興奮作用を利用した不整地踏破 — Walking Control for Quadruped Robot Using CPG

○新津 貴利 (宇都宮大学大学院)

正 横田 和隆 (宇都宮大学)

Takatashi NIITSU, Utsunomiya University, Graduate School of Engineering  
Kazutaka YOKOTA, Utsunomiya University

The paper proposes a method to steer the legged robot whose gait is controlled by a CPG network, and to stabilize the gait on the uneven terrain. We incorporate reflection on stimulus from the environment into the gait control as in animals. Stimulus generated by the tactile sensor at the tip of the foot is fed to the CPG network, and the gait is temporally modified to adapt to the uneven terrain. We verified the proposed steering control method is effective.

**Key Words :** CPG, reflection, walking control, uneven terrain

### 1. 緒言

近年、ロボットの活躍の場は生産現場のみならず、惑星探査や災害救助、福祉活動など多岐に渡っている。なかでも、自律型移動ロボットの発展は目覚しく、人間の活動範囲内・外においてその活躍に期待が寄せられている。自律型移動ロボットは、センサからの情報をもとに周囲の状況を認識するが、悪路などの歩行時においても頑健に目標地点に辿り着ける必要がある。

整地に比べ、外乱の多い不整地での歩行はロボットにとって不利であり、生物のような自律的な歩行が求められる。本研究では生物のリズミカルな運動に着目した制御手法である CPG に、刺激の伝達方法を模範した興奮作用を用いた制御手法を提案し、脚式ロボットの歩行に適用した。歩行実験により、外乱のある環境での提案手法の有効性を検証する。

### 2. CPG(Central Pattern Generator)による歩行制御

生物は体内リズムを持っており、そのリズムに基づいて歩容生成している。CPG は生物の歩行を規範とする制御手法で、環境適応性に優れることから不整地での歩行制御に適するといわれる<sup>(1)(2)</sup>。一般に、神経振動子を複数組み合わせたものと定義される。以下に神経振動子の数理モデルを示す。

$$\begin{aligned} \tau \dot{u}_{\{e,f\}i} &= -u_{\{e,f\}i} + w_{fe} y_{\{e,f\}i} - \beta v_{\{e,f\}i} + u_{0i} + \\ &\quad \text{Feed}_{\{e,f\}i} + \sum_{j=1}^n w_{ij} y_j \end{aligned} \quad (1)$$

$$y_{\{e,f\}i} = \max(0, u_{\{e,f\}i})$$

$$\tau \dot{v}_{\{e,f\}i} = -v_{\{e,f\}i} + y_{\{e,f\}i}$$

ここで、変数  $u_i$  はニューロンの内部状態、 $v_i$  はニューロン内の疲労状態、 $y_{\{e,f\}i}$  はニューロンの出力、 $u_{0i}$  は操作量、 $\text{Feed}_i$  は外部からのフィードバック信号、 $\beta$  はニューロン疲労状態の係数  $\tau$ 、 $\tau'$  は  $u_i$  と  $v_i$  の時定数、 $w_{fe}$  は神経振動子間の結合の強さを表す係数である。

本研究では、各脚にそれぞれ神経振動子を配置し、計 4 個からなる CPG ネットワークを構成した (Fig.1)。この CPG ネットワークに対して、CPG パラメータを調整することで多様な歩容を実現させることができる。実験で用いる歩行形態としては、歩行速度の速い動歩行の中でも対角の脚を組にして歩行する trot 歩行を採用した。

我々はこれまでに複数の異なる歩容間の遷移<sup>(3)</sup>と、ロボッ

トに搭載された視覚センサを用いて、CPG ネットワークにおけるニューロン間の結合係数を変化させることで目標対象物に追従させた<sup>(4)</sup>。この制御方法は生物が脳レベルで思考し、歩行を変化させていることに相当すると考えることができる。本研究ではこれに加え、外乱による刺激に対する生物の脊髄での反射運動を模範した制御手法を提案し、ロボットの歩行に適用する。

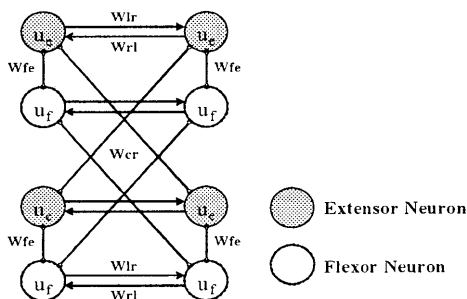


Fig.1 CPG network

### 3. 興奮性を持たせた歩容制御

生物は脳幹・脊椎への感覚フィードバック (刺激) に対する反射系の応答により、筋活動の切り替えや歩容パターンの変化が行われ、規則的な歩容リズムを基にした歩行が実現される。この生物の刺激の伝達法則を模範し、歩行制御に適用することで、これまでに提案した脳レベルでの方向制御に加えて、反射を併用した歩行を実現する。

刺激の検出には、脚底に搭載されたタッチセンサを用い、地面との接地時に生じる乱れから、脚のつまずきを検出することを考えた。一定値以上の刺激を検出した場合、CPG 制御された一定リズムの歩容を変化させる。本研究では、この一連の動作を「興奮作用」と呼ぶことにする。

### 4. 刺激の検出方法

ロボットに搭載された各脚の接地の有無を 1 と 0 で表現するタッチセンサの値とサンプリングタイム 8ms より、歩行中の各脚の接地時間と遊脚時間を算出した。ここでロボットが歩行中につまずいた場合、それまでの一定のリズムが乱れ、つまずいた脚の接地時間が長くなることに注目し、各脚の接地時間に閾値を定め (Fig.2)、この閾値を超えた場合に、生物の興奮の伝達方法を模範して、刺激の大きさに関わらず一定の値を (1) 式  $\text{Feed}_i$  にフィードバックし、一定リズムの振幅運動に興奮を与え、歩容を一時的に変化させる。

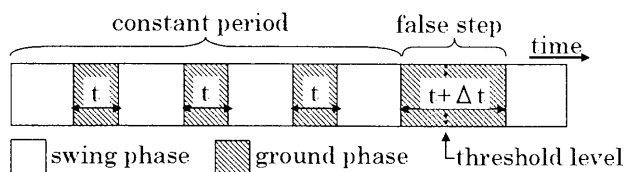


Fig.2 Detection of false step

## 5. 実験

### 5. 1 実験方法

提案手法の有効性を検証するため、小型4脚式ロボット AIBO を使い、人為的な凹凸を接地した環境で歩行実験を行った(Fig.3)。ロボットの正面 2m の位置に目標対象物を設置し、0.5m 間隔に高さ 5mm の凹凸を設置した環境下で、(4) による目標追従制御を適用した歩行を開始する。2 秒毎にロボットの歩行軌跡をプロットし、挙動を観察する。歩行の評価には目標対象物到達までの歩行時間と以下の 2 つの評価関数を用いた。

$$F = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |d(t_i)| \quad G = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |\theta(t_{i+1}) - \theta(t_i)|$$

F は中心線から左右への偏差の絶対値の平均、G は姿勢(進行方向)の偏差の絶対値の平均である。ここで、n はデータ数、d(t) は中心位置と時間 t におけるロボットの位置との偏差である。θ(t) は時間 t におけるロボットの進行角度である(Fig.4)。ロボットの追従制御による歩行軌跡が理想的な歩行軌跡に近いほど、評価値 F、G は低い値となる。

目標追従制御のみで歩行した場合と、目標追従制御に加えて、興奮作用を導入した場合の歩行の違いを比較する。

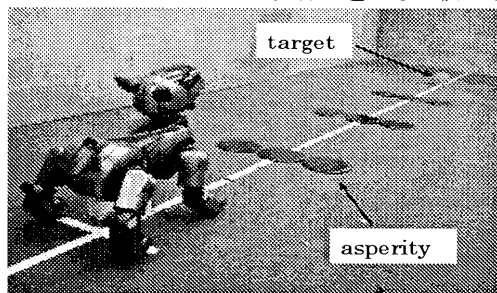


Fig.3 Walking environment

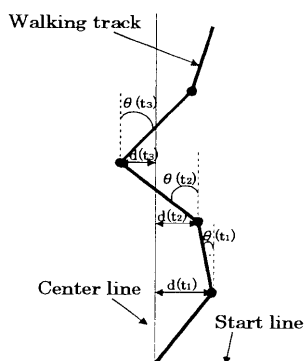


Fig.4 Walking tracks

### 5. 2 実験結果

興奮作用を導入した場合と、していない場合の歩行軌跡の代表的なものを Fig.5 に示す。図中のだ円は人為的に設けた凸部の位置である。いずれの軌跡も目標追従制御により、最終的に目標位置付近に到達しているが、興奮作用を適用した

場合は中心線に沿って歩行しているのに対し、適用していない歩行では、左右に大きく蛇行し、凸部付近(図中 A)でつまずきの発生により一時的に大きく進行方向が乱れ、また前進速度も低下している様子が確認できた。各 5 回の歩行実験結果の平均を Table 1 に示す。興奮作用を適用した歩行は、非適用時に比べ、歩行時間は約 2 秒早く目標に到達し、評価値 F、G は共におよそ半分の優れた値を得ることができた。

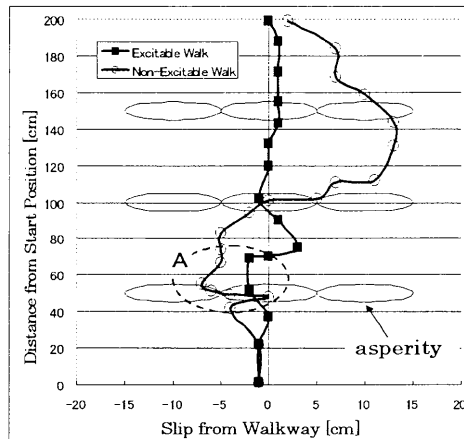


Fig.5 Moving track result

Table 1 Comparison of control abilities

	Excitable	Non-Excitable
walk time [s/2m]	34.4	42.6
F [cm]	2.2	4.2
G [°]	8.6	16.9

### 5. 3 考察

実験により、興奮作用の導入の有効性を示すことができた。歩行中の凹凸によるつまずきを検出し、興奮作用によってつまずき状態から早期に脱し、他の脚へのつまずきの連鎖を防いだことで、非適用時に比べより安定した歩行が可能となった。さらに、興奮作用によって一定リズムの振幅が瞬間的に大きくなるため、非適用時に比べスムーズに凹凸を乗り越えて歩行することを可能にした。このことにより、提案手法によって外乱による歩行への影響を軽減できることが確認できた。

## 6. 結言

本稿では、CPG 制御された 4 脚式ロボットの歩行に、視覚による目標追従に加えて興奮作用を用いた制御手法を導入し、外乱のある歩行環境における有効性を示した。今後は、センサの種類を増やすことで、感知する刺激の種類を増やし、より高精度な自律歩行を目指していきたい。

## 文献

- (1) 木村 浩, “生物規範型歩行ロボットー筋骨格系と神経系のカップリングー”, 計測自動制御学会 40(6) pp. 441-447 20010610
- (2) 竹村 裕, 上田 淳, 松本 吉央, 小笠原 司, “神経振動子経路の左右揺動運動・姿勢反射を用いた 4 脚ロボットの三次元適応歩行”, 日本ロボット学会誌 Vol.22 No.4, pp.528-534.2004
- (3) 神田 高輔, 横田 和隆, 尾崎 功一, 山本 純雄, “四脚式ロボットの CPG による歩行制御及び歩容遷移”, 日本機械学会関東支部総会講演会講演論文集 2007, pp.291-292
- (4) 前田 晃博, 金野 崇史, 横田 和隆, “CPG を用いた四足ロボットの歩行制御と応用ーパラメータ調整による操舵制御ー”, 日本機械学会関東支部総会講演会講演論文集 2008, pp.215-216