

# 四脚ロボットの生物規範型運動・行動生成

電気通信大学 情報システム学研究科  
木村 浩 福岡 泰宏 安田 憲人 平田 紗織

## Biologically Inspired Motion and Behavior Generation for a Quadruped Robot

H. Kimura Y. Fukuoka N. Yasuda S. Hirata

Univ. of Electro-Communications

**Abstract:** We have been trying to induce a quadruped robot to walk with medium walking speed on outdoor irregular terrain based on biological concepts. In this paper, we show the neural system consisting of a central pattern generator(CPG), responses and reflexes used for Tekken1&2. We also show the first system for the behavior generation based on vision.

**Key Words:** Quadruped Robot, Central Pattern Generator (CPG), Reflexes, Motion and Behavior

### 1 はじめに

筆者らはこれまでに、生物を規範とした歩行生成・制御を行う四脚ロボット「鉄犬1」を用いて、屋内に無作為に段差・坂などを設置した不測の不整地路面での自律歩行、および整地走行を実現していた [1, 2]。また最近、電源、PC、モータドライバなどを搭載した完全自立型の四脚ロボット「鉄犬2」を新たに開発し、屋外での歩行を実現した [3]。本稿では、鉄犬1&2 で用いられた生物規範型運動生成手法の概略について述べ、次に視覚情報などに基づいて適切な行動を生成する手法のための取り組みについて述べる。ここでは、視覚などの情報から (どこへ)(どのように) 歩行する・起き上がる・座るなどの指令を生成することを「行動生成」と呼び、上位から与えられた行動指令を受けて関節や脚を適切に動かすことを「運動生成」と呼ぶ。

### 2 生物規範型歩行運動生成

熱流体系や生物でのパターン生成を非平衡開放系、すなわち複雑系の振舞いと捉える研究の進展に影響されて、ロボットの自律適応を「力学特性を持つ要素」と「要素間の力学的相互作用」という非線形力学システムの中での創発として実現する考えは、歩行運動制御の分野 [4, 5, 6, 7, 8] だけでなく、認知と行動生成 [9, 10] や情報処理 [11] の分野でも繰り返し述べられてきた。また、歩行に関与する神経システムについては、動物の歩行は主に「パターン発生器 (Central Pattern Generator: CPG)」と抹消からの感覚などによって発生する「反射」の組み合わせにより生成されていること、これら CPG や反射の機構は主に脊髄に存在し脳幹・小脳・大脳など上位中枢からの調節を受けていることは、事実として広く受け入れられている [12, 13]。

このような創発的な歩行生成・適応の考えや神経生理の知見を参考にして、著者らは Fig. 1 に示すような鉄犬の神経系モデルを構成した。なお、センサーフィ

ドバックについて本稿では、PD 制御系でトルクの調節を行うものを「反射 (reflex)」と呼び、CPG の周期や位相の調節を行うものを「反応 (response)」と呼ぶ。

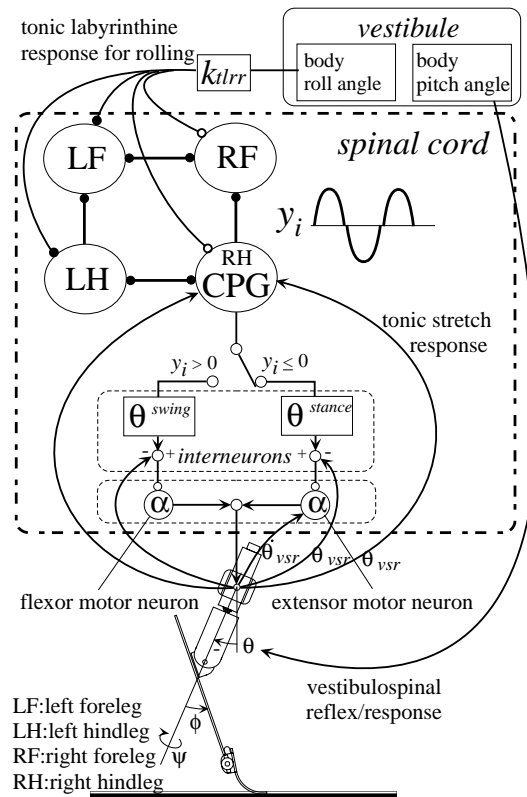


Fig. 1: 鉄犬の運動生成・適応システム。

#### 2.1 ピッチ運動の生成と制御

Fig. 1 の神経系モデルは大きく「各脚の位相 (支持脚/遊脚) 情報を与える CPG 部」と「筋粘弾性を与え

る伸張反射部 (関節の PD 制御部)」に分かれる。

### 2.1.1 CPG によるリズムと歩容の生成

CPG のモデルとして、多賀 [5] が二足歩行のシミュレーションに用いた神経振動子を用いる。神経振動子は相互抑制された 2 つのニューロン (伸筋ニューロン: 添字  $e$ , 屈筋ニューロン: 添字  $f$ ) で構成されており、それぞれ式 (1) の非線形一階連立微分方程式で表される。

$$\begin{aligned}\tau \dot{u}_{\{e,f\}i} &= -u_{\{e,f\}i} + w_{fe}y_{\{f,e\}i} - \beta v_{\{e,f\}i} \\ &\quad + u_0 + Feed_{\{e,f\}i} + \sum_{j=1}^n w_{ij}y_{\{e,f\}j} \\ \tau' \dot{v}_{\{e,f\}i} &= -v_{\{e,f\}i} + y_{\{e,f\}i} \\ y_{\{e,f\}i} &= \max(u_{\{e,f\}i}, 0) \\ y_i &= -y_{ei} + y_{fi}\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、一個の神経振動子の出力は  $y_i$  であり、CPG として一本の脚の支持脚相 ( $y_i \leq 0$ ) または遊脚相 ( $y_i > 0$ ) への移行指令を出力する (Fig. 1)。

また、CPG への基本的なセンサ入力として次式で表される「伸張反応」と呼ばれる関節角フィードバックと「前庭脊髄反応」と呼ばれるピッチ面内胴体傾斜角度フィードバックを用いる。

$$\theta_{vsr} = \theta - (\text{body pitch angle}) \quad (2)$$

$$Feed_{\{e,f\} \cdot tsr \cdot vsr} = \pm k_{tsr}(\theta_{vsr} - \theta_0).$$

$$Feed_{\{e,f\}} = Feed_{\{e,f\} \cdot tsr \cdot vsr} \quad (3)$$

ここで  $\theta$  は計測されたピッチ軸まわりの腰関節角度、 $\theta_0$  は立脚静止時の原点、 $k_{tsr}$  はゲインであり、単独の CPG の場合は添字  $i$  を省略している。

このネガティブフィードバックにより、CPG はピッチ平面内における脚の周期的な運動に引き込まれる。また、各脚の CPG を抑制的に結合することにより CPG ネットワークを構成すると (Fig. 1)、各脚の CPG は相互に引き込まれ、位相差、すなわち、歩容を生成する。

### 2.1.2 仮想バネ・ダンパ系

鉄犬においては、遊脚振り上げ (A)、遊脚振り出し (B)、支持脚復帰 (C) の各運動を生成するために、歩行中の各関節は Fig. 2 に破線で示されるような三つの状態 (A,B,C) の目標角度に PD 制御される。各状態への切替え条件は、以下である。また、関節の剛性 (P ゲイン) は支持脚相で高く遊脚相で低く設定されている。

ここで、鉄犬の関節の減速比は小さい (16 ~ 28 程度) ので、結果としてこのような PD 制御系は機構と組み合わせさせて比較的剛性の低い仮想バネ・ダンパ系 (バネの剛性と中立点が可変) を構成する。このようなコンプライアンスのある脚関節は、不整地での受動的な適応性を向上させる。また、仮想バネ・ダンパ系は各脚が従う力学の一部を指定しているだけで、実際の脚の運動 (歩幅、速度、着地・離地のタイミングなど) は、負荷、CPG の出力、路面の凹凸などによって変化する。

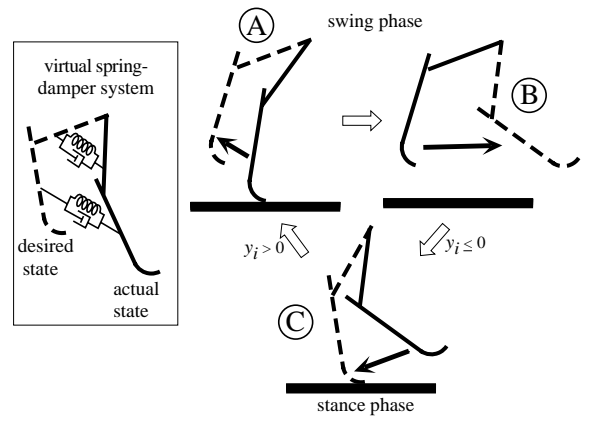


Fig. 2: 仮想バネ・ダンパ系と遊脚・支持脚間での状態遷移。

## 2.2 不整地適応の必要条件

著者らは、一般に不整地で安定なリットサイクルを構成するための「必要条件」として、不整地による外乱にもかかわらず以下が成り立つことを挙げている [1]。

- (a) 遊脚期の前半に遊脚の前方運動が阻害されないこと
- (b) 遊脚期の後半に遊脚が確実に着地すること
- (c) 移動速度の平均が一定に保たれること
- (d) 胴体のロール運動と脚のピッチ運動間の位相差が一定に保たれること
- (e) 不整地からの外乱を受けたある脚のピッチ運動の遅れにもかかわらず、脚間の位相差が一定に保たれること

一方、生物においても、これらの条件に対応するメカニズムが存在することが神経生理学の実験などから知られている。そこで、本研究では、CPG と PD 制御系から構成される運動生成系に、(a) ~ (d) の必要条件が満たされるためのセンサ・フィードバックを導入し、生物で観察される反射を参考にしてそれぞれを「屈曲反応/反射」、「伸張反射」、「前庭脊髄反応/反射」および「ピッチ踏み出し反射」、「ロール緊張性迷路反応」と呼び [2]、また (e) は CPG の相互抑制ネットワーク上で自律的に満たされるとした。CPG とこれらの反応/反射を用いた鉄犬 1 の不整地自律歩行実験の写真を Fig. 3 に示す。

以下では最新新たに鉄犬に導入された「ヨー軸まわりの踏み出し反射」と「ピッチ軸まわりの再踏み出し反射」について述べる。

## 2.3 横方向の環境変化、および外乱に対する適応

例えば、左に傾いた坂を歩き続けるような状況において、ロール緊張性迷路反応を導入しておけば Fig. 4(a) のような状態で左右脚の位相差を適切に保ちながら歩き続けるが、左右の重力負荷の差のため次第に坂なり



Fig. 3: 鉄犬 1 の (a)4cm 段差と (b) 小石路面での歩行写真．移動速度は 0.5~0.6[m/s] ．

に落ちていく傾向がみられる．また，右から摂動を加えた時，左に転倒する可能性が高い．なぜなら，ロール平面内における，足先と重心の鉛直投影点間の最短距離を表す広域安定余裕 (*WSM*) [2](Fig. 4) が小さいからである．そこで，横に傾斜した坂でも広域安定余裕を大きく保って歩行できるようにヨー軸まわりの踏み出し反射を導入する．

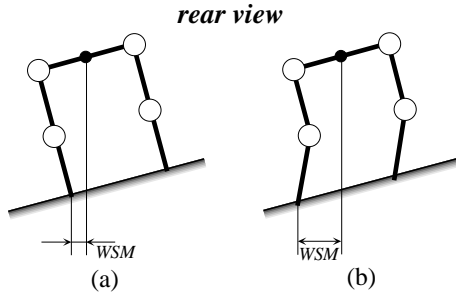


Fig. 4: 坂を歩行時の広域安定余裕 (*WSM*) ．ヨー軸まわりの踏み出し反射の無い場合 (a) とある場合 (b) ．

踏み出し反射 (stepping reflex) とは，Fig. 4(b) のように，傾いた方に足を振り出す．具体的には，腰 (ヨー軸) 関節  $\psi$  の P 制御の目標値を 0[rad] から式 (4) の  $P\text{-angle}_\psi$  に変更することによって実装される ( $G_{10}$  はゲイン) ．

$$P\text{-angle}_\psi = \delta(\text{leg}) G_{10} \times (\text{body roll angle}) \quad (4)$$

$$\delta(\text{leg}) = \begin{cases} 1, & \text{if leg is a right leg;} \\ -1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

屋外では，たとえ舗装路であっても 1~3 度程度の微妙な坂は随所に存在する．式 (4) を導入しない場合，鉄犬 2 は坂なりに次第に落ちていき進行方向が定まらなかったが，式 (4) を導入すると，横方向に傾斜する坂においても直進することが可能になり，また，大きい広域安定余裕を確保できているので，横方向の外乱に対してロバストであった．Fig. 5 は鉄犬 2 の屋外歩行時の写真である．舗装路ではあるが，多方向への 2 度

以内の傾斜，1cm 以内の不定型の段差，砂利などは随所に存在する不規則な環境である．ラジコン用送信器による旋回，速度変更を行いながら 30[m] 程度の距離を踏破している．



Fig. 5: 屋外 (大学構内) 歩行写真．移動速度は 0.5~0.6[m/s] ．

## 2.4 着地が得られなかった場合の適応

幅の狭い溝をまたぐ場合や段差を下りる場合には，通常のタイミングでは着地情報が得られないことがある．猫ではこのような場合，遊脚を再度前方に振り出す反射 (再踏み出し反射: resteping reflex) が発生する [14] ．この反射は，幅の狭い溝の場合であれば着地可能な地点を探索することに相当し，段差を下りる場合であれば「ピッチ踏み出し反射」と同様に重力による移動速度の増加を抑制する効果を持つ (Fig. 6) ．

## 3 視覚を利用した運動・行動の生成

### 3.1 歩行運動・行動の生成

2 で述べたように鉄犬は視覚を用いることなくある程度の不整地を自律的に踏破することができるが，当然，視覚を用いることにより不整地適応能力の向上を期待できる．現在，鉄犬 1 に搭載したステレオカメラを用いて段差までの距離と高さの計測を行い，屈曲反射 (昇るとき) と再踏み出し反射 (下るとき) に相当する運動を路面との接触情報ではなく視覚情報により前もって起動することで性能の向上を図っている [15] ．今後，特に屋外環境においては歩行可能領域を視覚により抽出する機能が強く望まれる．

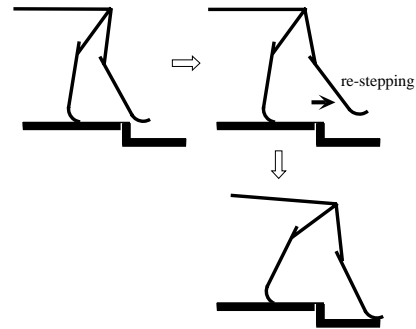


Fig. 6: 再踏み出し反射 ．

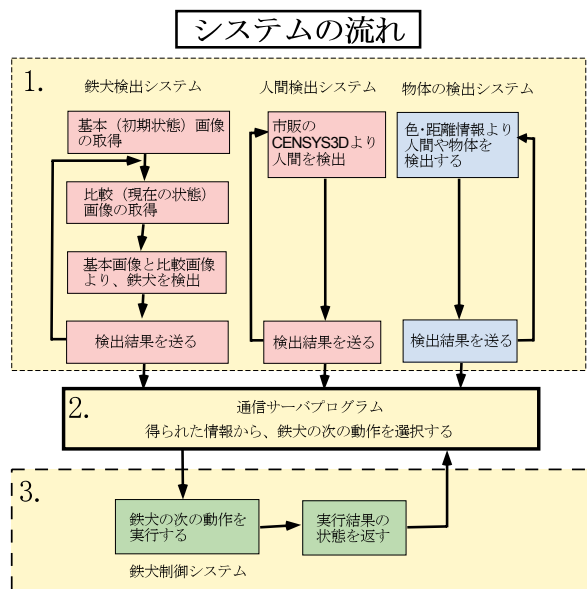


Fig. 7: 人-鉄犬 1 インタラクションシステム .



Fig. 8: 人-鉄犬 1 インタラクション実験：手元に呼ぶ .

### 3.2 人とのインタラクション行動の生成

鉄犬のアプリケーションとして例えば「介助犬ロボット」を考えたとき、人からの指令に基づいて行動を生成する機能は重要である . Fig. 7 と Fig. 8 に、天井に取り付けたステレオカメラと鉄犬 1 に搭載したステレオカメラを用いた人との鉄犬 1 のインタラクションシステムの概要と基礎実験の様子を示す [16] . 人の指示からいかにして指令を読みとり、状況に応じてどのような行動を生成するかについては、多くの課題が残されている .

## 4 おわりに

生物規範型の運動生成手法では、CPG・センサ入力・反射・歩行機械間の関係のみが簡潔に定義され、運動は神経系と機械系がカップリングされた力学系と環境との相互作用により創発的に生成された . 結果として現

在、鉄犬は屋内・屋外不整地をある程度自律的に中速移動することが可能となっている . 不整地適応能力をさらに向上させるとともに、より随意的な運動や行動を自律的に生成することが今後の課題となっている .

## 参考文献

- [1] Y. Fukuoka, H. Kimura, A.H. Cohen, Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Irregular Terrain based on Biological Concepts, Int. J. of Robotics Research, 22-3, 187/202 (2003)
- [2] 福岡, 木村: 四足ロボットの生物規範型不整地適応歩行 – 神経-機械カップリング系構成法の提案とビッチ運動・CPG・ロール運動間相互引き込みの評価 –, 日本ロボット学会誌, 21-5, 569/580 (2003)
- [3] 福岡, 木村, 高瀬: 自立型四脚ロボット「鉄犬 2」による屋外歩行, 第 9 回ロボティクス・シンポジウム予稿集, (accepted) (2004)
- [4] 矢野: 生物的自律分散システムの設計原理, 日本ロボット学会誌, 10-4, 468/473 (1992)
- [5] 多賀: 歩行の創発, 日本ロボット学会誌, 15-5, 680/683 (1997)
- [6] 木村 浩: 生物を規範とした脚式ロボットの不整地適応, 計測と制御, 42-9, 705/711 (2003)
- [7] 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, 20-3, 243/246 (2002)
- [8] Tomita, N., Yano, M. : A Model of Learning Free Bipedal Walking in Indefinite Environment - Constraints Self-Emergence/Self-Satisfaction Paradigm -, Prof. of SICE Annual Conf., 3176/3181 (2003)
- [9] 中村: 非線形力学系として結合されたロボットの情報処理と制御 –運動の制御理論から知能の制御理論へ, 計測と制御, 40-6, 426/432 (2001)
- [10] 國吉: ロボットの知能 –創発実体主義の挑戦–, 計測と制御, vol.42, no.6, pp.497-503 (2003)
- [11] 土屋: 複雑系の構成原理, 計測と制御, 38-10, 605/611 (1999)
- [12] Grillner, S. : 脊椎動物の移動の神経ネットワーク, 日経サイエンス 1996 年 3 月号, 76/83 (1996)
- [13] 佐藤: 脳・神経と行動:運動プログラムと行動出力, 岩波書店, 159/178 (1996)
- [14] Hiebert, G., Gorassini, M., Jiang, W., Prochazka, A., and Pearson, K. : Corrective responses to loss of ground support during walking II, comparison of intact and chronic spinal cats, Journal of Neurophys., 71, 611/622 (1994)
- [15] 安田, 三村, 福岡, 木村: 視覚情報を用いた生物規範型四足ロボットの不整地適応歩行, 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3I17 (2003)
- [16] 平田, 羽田, 木村: 介助犬の歩行動作機能を有する四足ロボットの開発, SICE-SI2004 予稿集, 177/178 (2003)