

生物を規範とした脚式ロボットの不整地適応制御

木村 浩*

* 電気通信大学情報システム学研究科 調布市調布ヶ丘 1-5-1

* Graduate School of Information Systems, Univ. of

Electro-Communications, Chofu-ga-oka 1-5-1, Chofu, Tokyo

* E-mail: hiroshi@kimura.is.uec.ac.jp

キーワード：生物規範型設計・制御 (biologically inspired design & control), CPG(central pattern generator), 反射 (reflex), 自律適応 (autonomous adaptation)

1. はじめに

これまでに一脚、二脚、四脚ロボットを用いた不整地走行・動歩行もある程度は実現されており、あらかじめ路面などの環境情報が完全に分かっているならば、それに対応できる歩行制御プログラムを用意することは可能である。しかし、多様な不整地への自律適応は非常に困難な問題と従来は考えられていた。

一方、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 [1, 2, 3, 4] だけでなく、認知と行動生成 [5, 6] や情報処理 [7] の分野でも繰り返し述べられてきた。また、非常に多様な不整地を自律適応的に高速移動可能な脚式ロボットの研究は近年いくつかのグループにより始められ [8, 9, 10]、そこでは生物を規範として、力学的な特性を考慮した機械設計の重要性が指摘されている。本稿では、このような研究の流れの中で、脚式ロボットの不整地適応について、生物を規範とした機械設計と制御の観点から解説する。

なお、創発においてアトラクタと分岐は興味深く重要な現象であり、四脚ロボットにおいても自律歩容生成・移行問題 [11, 12, 4] として取り上げられているが、本稿では割愛させて頂く。

2. 生物に学ぶ脚式移動の機械設計と制御手法

2.1 仮説

生物のしくみをそのままロボットにコピーすることは適切でなく、そのしくみの原理を工学的に解明した上で優れた機能としてロボットに適用することが重要である [13]。また、ロボティクスでは工学的センスでのアイデアが重要で、必ずしも生物の「マネ」をする必要は無いという意見もある [14]。ここで、なぜ生物に学ぶかを説明するために、脚式歩行・走行の機構と運動原理についての筆者の仮説 (図 1) を述べたい。低速移動では力学的な制約 (時間やエネルギーなど) が少ないために選択肢が多く、ロボットにおいて生物と共通な原理は必ずしも多くない。一方、高速移動では力学が支配的であるために選択肢が少なく、ロボットにおける機構や運動の原理は大部分生物と共通にならざるを得ない。すなわち、高速移動では力学が強い拘束

として働き、関節自由度やアクチュエータの冗長性などの違いの影響が小さくなるために、機構と運動の原理について生物に学ぶ意義は十分にあると考えられる。

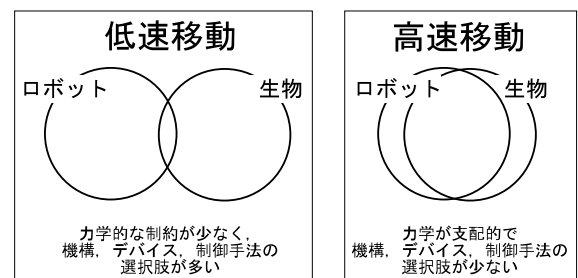


図 1 脚式移動の機構と運動原理についての仮説

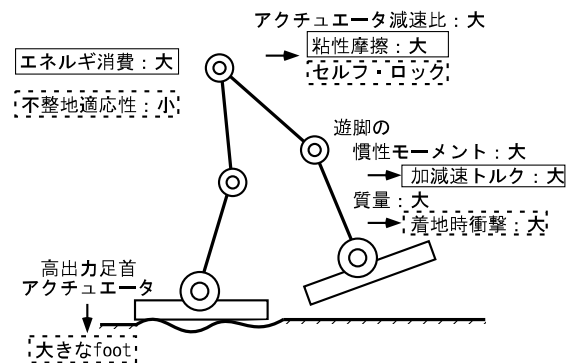


図 2 脚数に関係なく、エネルギー消費と不整地適応性の観点から適切でない脚式ロボットの設計例

2.2 機械設計

脚数に関係なくエネルギー消費と不整地適応性の観点から適切でない脚式ロボットの設計例を図 2 に示す。特に大きな足底 (foot) を持つ場合、局所的な路面形状の影響を大きく受けるために、着地点の選択や着地後の制御手法が複雑になり、不整地適応が難しくなる。また、遊脚の質量・慣性モーメントが大きいために遊脚関節において高ゲイン・フィードバックを行うことが多いが、これは関節のセルフ・ロックと同様に、着地時の衝撃の問題から不整地適応性を小さくする。

表 1 移動速度に応じて適切な制御手法

	ZMP を指標とする手法 (大脳, 小脳など)	リミットサイクルを構成する手法	
		CPG と反射 (脊髄, 脳幹など)	バネ - ダンパ機構 (筋骨格系)
運動	姿勢制御と低速歩行	中速歩行	高速走行
主要な制御部	上位神経システム (筋張力調節の学習)	下位神経システム (リズムと筋張力の調節)	受動機構 (自己安定化)
センサーフィードバックの役割	大	中	小

一方, 生物は図 2 とは反対の構成をとっている. すなわち,

- (a) 関節の剛性・粘性が可変 (遊脚の剛性・粘性を小さくすることができる)
- (b) 支持脚に機械的なコンプライアンスがある
- (c) 胴体の慣性モーメントが大きく, 遊脚, 特に膝下リンクの慣性モーメントが小さい
- (d) 地面と衝突するリンクの質量が小さい
- (e) 接地部面積が小さい¹

自立化のための自重・可搬重量を考慮し, 転倒しないことを優先した関節トルク設計の結果, 現在の多くの脚式ロボットの設計は図 2 で示したものになりがちである. しかし, 不整地を高速移動可能な脚式ロボットの開発を目指すのであれば, 現在の要素技術の制約のなかで可能な限り生物を規範とした力学的特性を持つ脚式ロボットを設計すべきである.

2.3 制御手法

脚式移動の制御手法は, ゼロ・モーメント・ポイント (ZMP) を指標とする手法と, リミットサイクルを構成する手法に大別される (表 1). ZMP は重力や慣性力などの合力の床面への投影点であり, ZMP が foot の作る多角形内に維持されるように体幹や脚を制御する手法の有効性が二脚ロボットなどの姿勢制御や低速歩行で示されている. しかし, 各歩行周期で大きな質量を持つ上体をアクチュエータにより加減速する必要があるため, エネルギー効率の観点から中高速の移動には適さない. 一方, リミットサイクルを構成する手法はエネルギー効率においては優れているが, 歩行・走行周期に上限が存在する [15].

一般に動物の高速移動においては力学エネルギーが支配的であるためバネ - ダンパ系でモデル化される筋骨格系での自己安定性が重要であり, 中速移動では神経システムによる調節が支配的であることが指摘されている (表 1) [16]. 高速移動においてセンサーフィードバックの役割が小さくなり, 筋肉の受動的な粘弾性の役割が大きくなる理由として以下が考えられる.

¹ 昆虫や中型の四脚哺乳類の接地部は非常に小さい. 大型四脚哺乳類 (熊や象) や人間の foot は大きい, 体の大きさと比較するとその長さ・幅はともに小さい.

- [a] 運動エネルギーをバネのポテンシャルエネルギーに蓄え, 再度, 運動エネルギーに変換する方法が効率的である.
- [b] 大きな運動エネルギーを持つ対象に対して短い周期内にアクチュエータで有効な影響を及ぼすことはエネルギー的に難しい.
- [c] 短い周期内でのエラーの蓄積は小さいので, 支持脚相と遊脚相の切換えにより安定化を行うことが出来る.

一方, 中速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 [17, 18].

2.4 移動速度の安定化と遊脚着地角制御

2.3. で述べた [b],[c] について, 重力を利用することにより効率良く移動速度を安定化する方法が知られている. ここでは, 高速移動においてもリミットサイクルを構成可能な方法を取り上げ, 機械設計, 制御手法, 生物に学ぶことの有効性について再度具体的に述べる.

ピッチ平面内で移動速度 V の平均を一定に保つ制御を考える. 最も分かり易い方法は, 支持脚足首アクチュエータにより支持脚接地点まわりの角速度を操作することであるが, 接地点まわりの系の慣性モーメントは非常に大きいため大きなトルクが必要なため効率的でなく, また, 大きな foot が必要になるという問題点がある (図 3-(a)).

一方, 遊脚着地角を制御することにより, 現在ではなく次の支持脚期の接地点まわりの角速度を操作することが可能である (図 3-(b)). すなわち, 相の切換え後の支持脚の倒立振り子としての初期値を操作することにより, 重力を利用した接地点まわりの角速度の操作が可能となる. この場合, 遊脚の慣性モーメントは小さいために小さなトルクで十分であるため効率的であり, また, 大きな foot を必要としないという利点がある.

この遊脚着地角制御 (Touchdown Angle Control) は, 最初下山と三浦により竹馬型の二足歩行ロボットの安定化 [19] において提案され, Raibert の跳躍ロボットにおい

で中立着地点アリゴリズム [20] として用いられた²。筆者らの四脚ロボット「鉄犬 1」においても、移動速度に応じて遊脚の P ゲインを調節する形で、同様な制御が導入されている [10]。さらに、同様な制御が人において「踏み換え反射 (stepping reflex)」として知られている³。

また、Buehler らは受動的な SLIP (Spring Loaded Inverted Pendulum) 機構において、離散システムをつなぐ行列の固有値の大きさを調べることで遊脚着地角を固定したままでも受動機構が自己安定性を持つことを示し、さらに、移動速度が収束する遊脚着地角を各移動速度に対して求めている [22]。さらに、生物の四脚走行において、移動速度に応じて遊脚着地角が変化することが知られている [23]。

このように力学が支配的な運動において、効率的な制御手法や受動機構の自己安定性が生物とロボットの両方で用いられていること [16] は、2.1. で述べた仮説を支持する一例となっている。

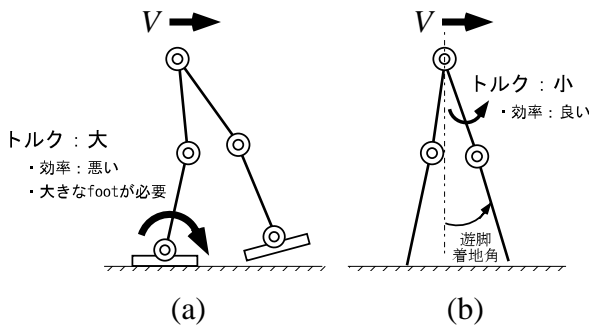


図 3 (a) 接地点まわり角速度制御, (b) 遊脚着地角制御

2.5 脚式ロボットの紹介と性能比較

2.2. で述べたエネルギー消費と不整地適応性の観点から適切な機械設計と、2.3. で述べた移動速度に応じた適切な制御手法を採用している脚式ロボットをいくつか紹介したい (図 4)。

有名な Raibert の一脚跳躍ロボット [20] は、空気圧バネと油圧アクチュエータを用い、2.4. で述べた遊脚着地角制御を中心とした簡便な制御則を用いてリミットサイクルを構成し、自律的ではないが不整地走行も実現している。

バネ-ダンパ系でモデル化される筋骨格系での自己安定性を六脚ロボットに応用した例として、脚の適切な機械的コンプライアンスを利用してほぼオープンループで不整地を高速に移動可能な RHex [8] や Sprawlita [9] が挙げられる。また、直動受動膝関節を持つ四脚ロボット Scout-II において、移動速度をフィードバックすることなく、

² ホンダのヒューマノイドがどのような制御を行っているか [21] について著者には詳細は不明であるが、テレビで放映されたコメントを聞いた限りでは同様な制御を併用しているらしい。

³ 直立状態で例えば後ろから押されたときに前に足を踏み出す。

2.4. で述べた受動機構の持つ自己安定性を利用することで Bound, Half-Bound, Rotary Gallop 歩容での平地走行が実現されている [22]。これらの一、四、六脚ロボットは機械設計に関しては、2.2. で述べた (b) ~ (e) を満たしており、特に脚先はほぼ点接地と見なすことができる。

筆者らの鉄犬 1 は 2.2. で述べた設計条件を満たすように設計されており⁴、CPG と反射から構成される神経モデルを用いて、自律的な不整地歩行と Bound 歩容での平地走行を実現している。

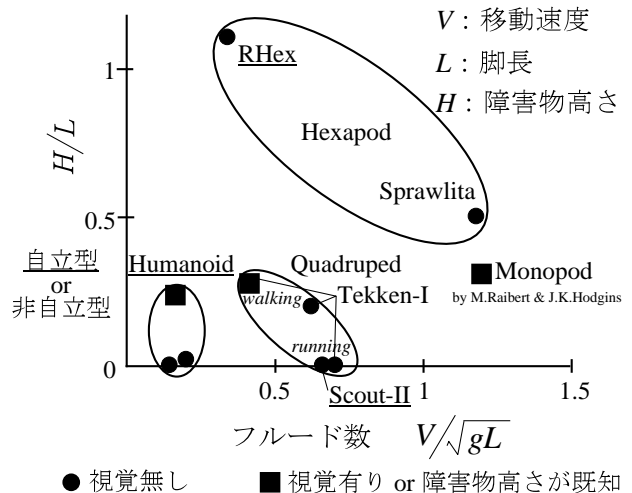


図 4 移動速度と障害物高さの無次元化による脚式ロボットの移動性能の比較 (2002 年 3 月までのデータを用いた)

図 4 より、生物規範型の機械設計と制御手法を用いた脚式ロボットが比較的高い不整地自律踏破性を有していることが分かる。ただし、非自立型のロボットについては今後どのようにして 2.2. で述べた設計条件を満たしながら自立化を図るかという課題が残っている。

3. CPG と反射・反応を用いた不整地自律適応

歩行周期が十分短ければ (0.3 秒程度)、センサーフィードバックのない CPG、すなわち、単なる周期固定のクロックと脚関節の PD 制御の組み合わせだけでも、鉄犬 1 は平地を簡単に歩行することが出来る。しかし、六脚ロボット [8, 9] とは異なり四脚ロボットでは脚の受動的なコンプライアンスだけで不整地自律適応を実現することは困難である。従って、どのようなセンサー情報をどのように (例えば、正か負か) CPG や PD 制御系にフィードバックすることにより不整地自律適応が可能になるかを明らかにすることが、本研究の目的であった。

⁴ ただし支持脚のコンプライアンスは PD 制御により実現されているので、特に走行時のエネルギー効率は悪い。

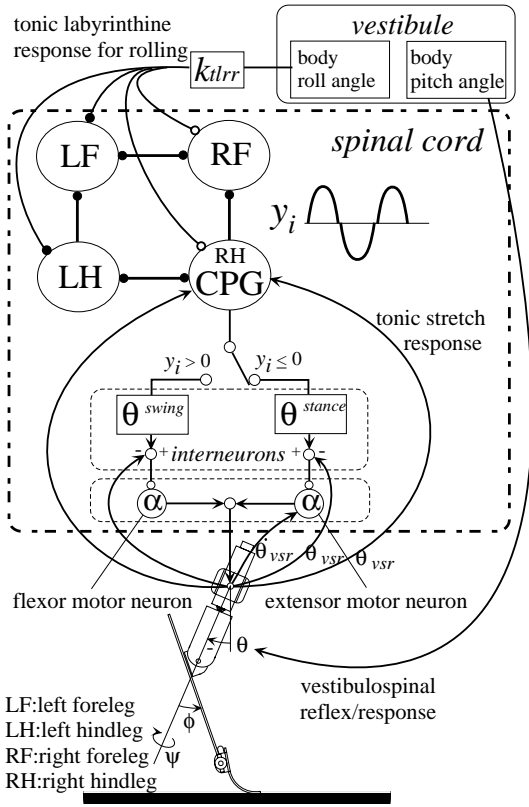


図 5 鉄犬 1 の運動生成・適応システム

なお、センサーフィー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」と呼び、CPG の周期や位相の調節を行うものを「反応」と呼ぶ。

3.1 ピッチ運動の生成と制御

鉄犬 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 (図 5)。

3.1.1 CPG によるリズムと歩容の生成

CPG のモデルとして、多賀 [2] 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 (図 5)。

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。

$$\begin{aligned} \theta_{vsr} &= \theta - (\text{body pitch angle}) \\ Feed_{\{e,f\} \cdot tsr \cdot vsr} &= \pm k_{tsr}(\theta_{vsr} - \theta_0). \end{aligned} \quad (2)$$

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

ここで θ は計測されたピッチ軸まわりの腰関節角度、 θ_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 (図 5)、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。

3.1.2 仮想バネ・ダンパ系

鉄犬 1 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、歩行中の各関節は図 6 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 [24]。

- A \rightarrow B: 腰関節が状態 A の目標角度に達した
- B \rightarrow C: CPG の伸筋ニューロンが活性 ($y_i \leq 0$) になった
- C \rightarrow A: CPG の屈筋ニューロンが活性 ($y_i > 0$) になった

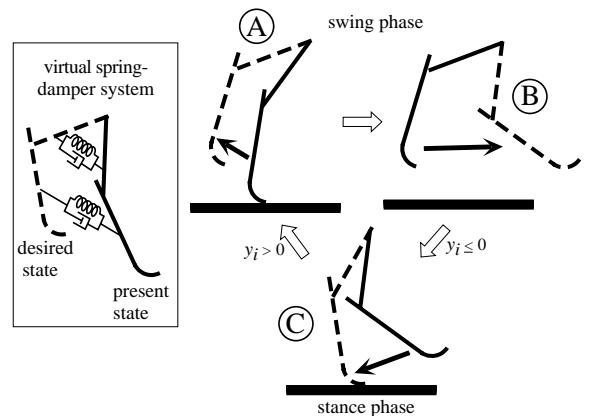


図 6 仮想バネ・ダンパ系と遊脚・支持脚間での状態遷移

ここで、鉄犬 1 の関節の減速比は小さい (16 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ることで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。2.2. で述べたように、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。

3.2 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 [10]。

- (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⁵、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「踏み換え反射」、「緊張性迷路反応」と呼び、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。本稿では詳細は他文献 [10, 25] に譲り、ロール運動との関係で重要な緊張性迷路反応についてのみ簡単に紹介する。

3.3 緊張性迷路反応の導入によるピッチ・ロール運動間の引き込み

鉄犬 1 はロール軸まわりの関節を持っていないが、三次元歩行においては二脚支持期において倒立振り子が現れ、結果としてロール運動が自然に発生する。ロール運動とピッチ運動間の位相差の変化は歩行運動において外乱として働く。3.1.1. で導入した CPG はロール運動に対する直接的なフィードバックを持たないので、二つの運動間の位相差を調節するのは困難である。

従って、ここでは、緊張性迷路反応 (tonic labyrinthine response) の定義⁶に基づき、歩行中のロール面内胴体傾斜角度 body roll angle を検出し、式 (4) を CPG のフィードバック項に加えることにより (式 (5)、図 5: 左上部)、

⁵ 鉄犬 1 の屈曲反射と伸張反射の一部は、応答を高速にするために足首関節の受動機構に置き換えられている。

⁶ 頭部が左右および前後に傾いたとき、傾いた側の腿が伸展し、反対側の腿が屈曲する

ピッチ運動とロール運動を同期させる。以後、本稿では式 (4) をロール運動・緊張性迷路反応と呼ぶ。

$$\begin{aligned} Feed_{e.tlrr} &= \delta(leg) k_{tlrr} \times (\text{body roll angle}) \\ Feed_{f.tlrr} &= -Feed_{e.tlrr} \end{aligned} \quad (4)$$

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

$$\begin{aligned} Feed_e &= Feed_{e.tsr.vsr} + Feed_{e.tlrr} \\ Feed_f &= Feed_{f.tsr.vsr} + Feed_{f.tlrr} \end{aligned} \quad (5)$$

結果として、四脚間位相差、つまり歩容が適切に調節されることによって過剰な胴体ロール揺動とロール運動位相の変化を抑制し、不整地での適応性を向上させることが出来る。

3.4 不整地歩行実験

これまでに述べた鉄犬 1 の運動生成・適応システム (図 5) において、CPG や反射・反応のパラメータを固定したまま、あらかじめ予測されていない中程度の不整地に対する自律適応が可能となっている (図 7)[10, 25]。

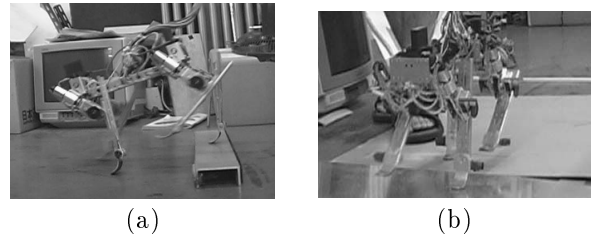


図 7 鉄犬 1 の (a)4cm 段差と (b) 横方向の坂の歩行写真

3.5 創発的な歩行生成・適応

図 5 において、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 (図 8-(a))。多賀 [2] は「環境を外乱とみなすのではなく、環境と身体との間の相互作用によって創発的に生み出される運動が歩行である」と定義している。そこでは、機械システムと神経システムはそれぞれ独自の非線形ダイナミクスを持っており、これら二つの系がカップリングされて構成される動的システムは常に自身のダイナミクスに従い、変化する環境との相互作用を通して適応的な運動を創発的に生成する。従って、ロボット自身や環境のモデル化、自律的な運動計画、計画された運動と実際の運動との矛盾といった従来のロボティクスにおける困難な問題を避けることが可能である。

特に、我々はロール運動を CPG にフィードバックすることにより CPG・ピッチ運動・ロール運動の間に引き込みを発生させ (図 8-(b))、多賀が提案した創発的な歩行がピッチ運動とロール運動からなる 3 次元的な歩行にも適用可能であることを示した。

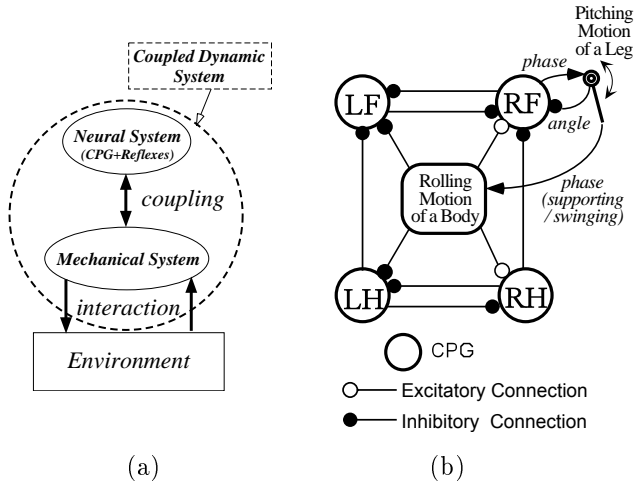


図 8 (a) 創発的な歩行生成・適応, (b)CPG, 脚のピッチ運動, 胴体のロール運動間の引き込み

4. 考察

4.1 不整地適応のための条件

土屋 [7] は, 要素の状態をその状態変数とする力学系 (要素ダイナミクス) と, 要素間の相互作用を特徴付けるパラメータを状態変数とする力学系 (ルールダイナミクス) の二つの力学系からなる「二重力学系」のパターン創発として, 自律行動システムの情報処理・運動制御系を構成することを提案している. また, 矢野 [1] は, 運動創発系もしくは生命システムにおいて, 目的, 境界条件, 内部要素間の関係が系に秩序を与える「拘束条件」であると述べている. 特に系をとりまく環境が複雑な時空間構造を持ち, かつその変化が予測不可能な場合を「無限定問題」と呼び, この不良設定問題を取り扱うにはシステムは不完結であることが必要である. すなわち, 不良設定問題を良設定問題にするための「必要条件」は

- (1) 情報を処理できる能動的な要素からなるシステムであること
- (2) 要素間の関係と, 個と全体との関係を統合できる関係生成ルールを持っていること

であるとしている.

3.2. で述べた著者らの不整地安定の条件 (a) ~ (e) を上で述べた土屋や矢野の定義に当てはめると, 要素間の相互作用を規定している点, 十分条件ではなく必要条件として規定している点で, 創発型自律適応系構成法に沿ったものであることが分かる. このことは, 生物学や神経生理学の知見を適用する「生物規範型制御」において, これまでの「創発システム研究」や「生命システム工学」と共通する重要な特徴点と考えられる.

一方, 現在の二足歩行ロボット制御で多く用いられている「ZMP を着地点が作る多角形内に置く」手法 (ZMP 拘束) は, 倒れないことを保証するという点で安定のための「十分条件」である. 従って, プログラム作成者や実験担

当者に安心感を与えることは出来ても, 拘束として強過ぎるために 3.5. で述べたように創発的な自律適応の実現には不向きであると考えられる.

4.2 生物規範型制御の再定義と問題点

著者は [3] において脚式ロボットの「生物規範型制御」を多賀 [2] の提案を参考にして「運動生成・制御一体型」と定義したが, ここでは Full [16], 土屋 [7], 矢野 [1] の提案も考慮して, 以下のように再定義したい.

- システム (制御系と筋骨格系) と環境との相互作用の中で運動が創発的に生成・適応する.
- 高速移動においてはバネ-ダンパ系でモデル化される筋骨格系での「自己安定性」が重要であり, 中速移動では「神経システムによる調節」が重要である.
- 不整地適応をはじめとする「無限定問題」に対応するためにシステムは不完結であることが必要であり, 創発力学系の「拘束条件」は常に「必要条件」で記述される.

今後の問題として, 例えば不整地適応のために最終的に「何個の必要条件」を導入する必要があるのか不明な点, 数多くの必要条件を導入したときの相互干渉や相互矛盾などが残されている.

5. おわりに

六脚ロボットは比較的安定であるために, 脚の適切な機械的コンプライアンスを利用してオープンループで不整地を高速に移動可能であることが示された. 一方, 直立した脚を持つ哺乳類型の二・四脚ロボットではセンサ情報に基づく適応が重要であり, 自律不整地適応を実現可能な唯一の手法は, 創発的な歩行生成・適応であると著者は現時点で考えている. もちろん, 創発的な歩行生成・適応実現のためには, それを可能とする力学的特性を考慮した機械設計の重要性を忘れてはならない.

従来, 脚式ロボットの制御手法は脚数によって大きく異なると考えられがちであった. しかし, 非線形力学システムの中での創発として実現する観点から言えば, 脚数による違いは意外と小さく, むしろ移動速度に応じて適切な制御手法を選択することが本質的であるという印象を本稿で紹介した多くの研究について学ぶ過程で著者は持つに至った.

2.1. で述べた仮説や上で述べた考え・印象は生物学やロボティクスの一部のグループで漠然と共有されているが [26], 多くの人達に納得して頂けるほどにはまだ実証されていない. 今後二脚ロボットの不整地自律適応歩行・走行の実現などを通して徐々に理解されて行くことを期待している. 最後に, 富田らはシミュレーションではあるが CPG-筋骨格モデルを用いて平地二足歩行を実現している [27]. 富田らのモデルでは足首は受動関節となっており, 2.2. で述べた機械設計に関して二脚ロボットで特に問題となる大きな足首アクチュエータと大きな foot を必要としないロボットの開発につながると期待される.

参 考 文 献

- 1) 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)
- 2) 多賀：歩行の創発, 日本ロボット学会誌, 15-5, 680/683 (1997)
- 3) 木村：生物規範型歩行ロボット制御 - 筋骨格系と神経系のカップリング -, 計測と制御, 40-6, 441/447 (2001)
- 4) 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)
- 5) 國吉, ベルトウーズ：身体性に基づく相互作用の創発に向けて, 日本ロボット学会誌, 17-1, 29/33 (1999)
- 6) 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, 30-6, 426/432 (2001)
- 7) 土屋：複雑系の構成原理, 計測と制御, 38-10, 605/611, (1999)
- 8) U. Saranli, M. Buehler, and D.E. Koditschek, RHex: a simple and highly mobile hexapod robot. Int. J. of Robotics Research, 20-7, 616/631 (2001)
- 9) J.G. Cham, S.A. Bailey, J.E. Clark, R.J. Full, M.R. Cutkosky, Fast and Robust: Hexapedal Robots via Shape Deposition Manufacturing, Int. J. of Robotics Research, 21-10, 869/882 (2002)
- 10) 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)
- 11) 湯浅, 伊藤：自律分散システムとその歩行パターン発生器への応用, 計測自動制御学会論文集, 25-2, 180/187 (1989)
- 12) J.J. Collins and S.A. Richmond：Hard-wired central pattern generators for quadrupedal locomotion, Biolog. Cybern., 71, 375/385 (1994)
- 13) R.J. Full：Biological inspiration: lessons from many-legged locomotors, Robotics Research 9, Springer London. 337/341 (2000)
- 14) 広瀬：ヒューマノイドから機械知能発現型ロボットへ, 日本ロボット学会誌, 16-5, 31/35 (1998)
- 15) 木村, 下山, 三浦：四足動歩行ロボットの力学的解析, 日本ロボット学会誌, 6-5, 367/379 (1988)
- 16) R.J. Full and D.E. Koditschek：Templates and anchors: neuromechanical hypotheses of legged locomotion on land, J. Exp. Biol., 202, 3325/3332 (1999)
- 17) S. Grillner：Control of locomotion in bipeds, tetrapods and fish, In Handbook of Physiology, volume II, American Physiol. Society, Bethesda, MD, 1179/1236 (1981)
- 18) 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)
- 19) 下山, 三浦：竹馬型二足歩行ロボットの動的歩行, 機論 C, 48-433, 1445/1454 (1982)
- 20) M. H. Raibert：Legged Robots That Balance, The MIT Press, Cambridge, MA (1986)
- 21) 古荘：2足歩行のダイナミクスと制御, 生物型システムのダイナミクスと制御, 養賢堂, 105/154 (2002)
- 22) I. Poulakakis, J.A. Smith and M. Buehler: On the Dynamics of Bounding and Extensions Towards the Half-Bound and the Gallop Gaits, Proc. of Int. Symp. on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM2003), ThA-I-2 (2003)
- 23) R. Hackert, H. Witte and M.S. Fischer: Interaction between Motions of the Trunk and the Limbs and the Angle of Attack during Synchronous Gaits of the Pika (*Ochotona Rufescens*), Proc. of AMAM2000, ThA-I-5 (2000)
- 24) 赤澤: 運動制御と筋特性, 計測と制御, 33-4, 304/309 (1994)
- 25) 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ピッチ運動・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, (掲載予定) (2003)
- 26) H. Kimura, Briefing of AMAM2003, Proc. of AMAM2003 (2003)
- 27) 富田, 矢野：拘束条件生成と拘束充足による二脚歩行のリアルタイム制御, 第15回自律分散システムシンポジウム, 27/32 (2003)