

# 動物が示す生き生きとした振る舞いのからくりを探る

数理科学・生物学・ロボティクスの協働による構成論的理解

石黒章夫<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学 電気通信研究所

<sup>2</sup> JST CREST

## 概要

動物は非構造的で予測不能的に変動する環境下であっても、自身の身体に持つ膨大な自由度を巧みに制御しながら実時間かつ合目的に振る舞う適応的な知を有している。このような知の発現機序が理解できれば、生物学の深化のみならず、既存技術では実現不可能な真に適応的なロボットの構築にもつながると期待される。本講演では特に四脚動物が示す適応的なロコモーション様式を採り上げ、動物が示すいきいきとした振る舞いの発現機序理解に向けたわれわれの取り組みを紹介したい。

## How Animals Exhibit Agile and Adaptive Locomotion?

Synthetic Approach via Cooperation between Biology, Mathematics, and Robotics

Akio Ishiguro<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

<sup>2</sup> JST CREST

## Abstract

Animals exhibit astoundingly agile and adaptive locomotion under unstructured and unpredictable real world constraints by taming their large bodily degrees of freedom. Our objective is to clarify the mechanisms underlying such form of intelligence and to construct truly adaptive robotic agents. In this talk, we will introduce some of our case studies, particularly focusing on quadruped locomotion.

## 1 はじめに

動物は非構造的で予測不能的に変動する環境下であっても、しなやかかつタフに動き回ることができる。このためには、動物は自身の身体に持つ膨大な自由度を巧みに制御する必要があるが、このような大自由度系の制御を中枢神経系からの命令のみで中央集権的に行うことは不可能である。それでは動物は、いかなる制御方策によってこのような驚くべき巧みな振る舞いを発現しているのだろうか。ヤツメウナギや除脳ネコに関する神経生理学的知見 [1][2][3]

などが示唆しているように、動物は、激的な淘汰圧を通して自律分散制御という地方分権的な制御方策を発明することでこの問題を解決したと考えられる。自律分散制御とは、単純な知覚・判断・行動出力の機能を持つ要素（自律個）が多数集まり相互作用することで、大域的に非自明な機能を創発させる、いわば「三人寄れば文殊の知恵」的な制御方策である。しかしながら現段階では、動物が示すロコモーションを司る自律分散制御の原理は明らかではなく、それを説明する理論もアドホックなレベルにとどまっているのが現状である。このような現状を打破し、

動物が示す生き生きとした振る舞いの発現機序を理解するためには、いかに「うまい戦略」を立てて研究を行うかが鍵となる。

筆者は現在、数理科学者の小林亮教授（広島大学）と生物学者の中垣俊之教授（公立はこだて未来大学）らとともに、JST CREST プロジェクト「生物ロコモーションに学ぶ大自由度システム制御の新展開」を立ち上げ、数理科学と生物学そしてロボティクスの密接な協働を通して、生物ロコモーションに内在する自律分散制御則の解明を目指した研究を進めている [4]。このプロジェクトの特筆すべき点は、いわば「急がば回れ」あるいは「原点回帰」というアプローチに基づいている点である。自律分散制御に着目した従来研究（特にロボティクス分野）の多くは、ヒトや四脚動物が示す歩行といったロコモーション様式を研究のターゲットとしてきた<sup>1</sup>。しかしながらわれわれは、このような高次のロコモーション様式を初動段階からターゲットにするとその複雑さから消化不良に陥り、結果としてアドホックなモデリングとなってしまうおそれがあると考えた。このような陥穽にはまらないためには、シンプルベストなモデル生物を起点として攻めていくミニマリストアプローチが肝要である。

そこでわれわれは、原初的な生物である真正粘菌変形体が示すアメーバ運動の発現機序理解から始め、ここから得られた知見をベースとしてさまざまな動物が示すロコモーション様式に通底する発現機序を考察していくというアプローチを採用することにしたのである<sup>2</sup>。真正粘菌変形体は巨大なアメーバ様の単細胞生物で、身体全体にメカノケミカルな振動子が分布しており、その収縮振動に起因して生じた圧力の勾配によって原形質を流動させながら運動している。単細胞生物であるから、当然脳も神経もなく、情報を処理する中枢は一切存在しない。それにもかかわらず、変形体は一つの個体として統合的に振る舞っている。それゆえ変形体は、自律分散制御がもっとも純粋な形で行われているシステムと見なすことができ、われわれはそこから自律分散制御の基本論理を学び取れるはずだと考えたのである。

この戦略によって、われわれはこれまでに真正粘菌変形体から自律分散制御方策に関する多くの知見を得た（詳細は文献 [5] などを参照されたい）。現在

われわれは、真正粘菌変形体のモデリングを通して得た知見をベースに、ミミズやムカデ、ヘビといった動物が示す這行運動や、遊泳、歩行、走行といったさまざまなロコモーション様式に着目した研究を始めている。本講演では、われわれが現在取り組んでいる研究トピックの中でも特に四脚動物が示す巧みな脚間協調（inter-limb coordination）の発現機序に関する事例研究に焦点を当て、生物ロコモーションのモデリングのおもしろさと難しさをお伝えしたいと思う。

## 2 関連研究

### 2.1 生物学的研究

四脚動物は四本の脚を巧みに協調させてさまざまな運動パターン（歩容）を示す。例えば、移動速度に応じて、ウォークやトロット、ペース、ギャロップといった明確に異なる位相関係を持つ歩容を発現することはよく知られている。Hoyt らは、動物がこのようにさまざまな歩容を発現するのは、エネルギー消費量をできるだけ抑えた効率のよい歩容を選択しているからであると説明している [6]。

一方で、動物種によって歩容が異なる場合があることも知られている。例えば、多くの四脚動物は中速領域でトロット歩容を示すが、ラクダはペース歩容を示す。低速領域で発現するウォーク歩容も、霊長類は左前脚→左後脚→右前脚→右後脚の順（diagonal sequence walk と呼ばれる）で脚先を宙に浮かせて前方に振り出す遊脚期が始まるが、他の一般的な四脚動物は左後脚→左前脚→右後脚→右前脚の順（lateral sequence walk と呼ばれる）で遊脚期が始まること知られている [7][8]<sup>3</sup>。人間の発達過程においても、乳幼児の這い這いは lateral sequence walk から成長に伴って diagonal sequence walk へと歩容が変化するという興味深い報告もある [9]<sup>4</sup>。

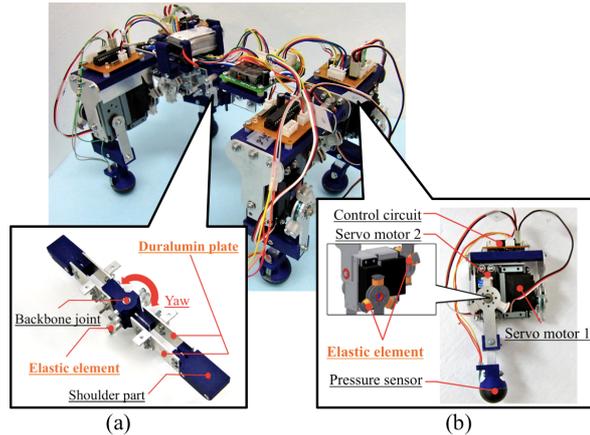
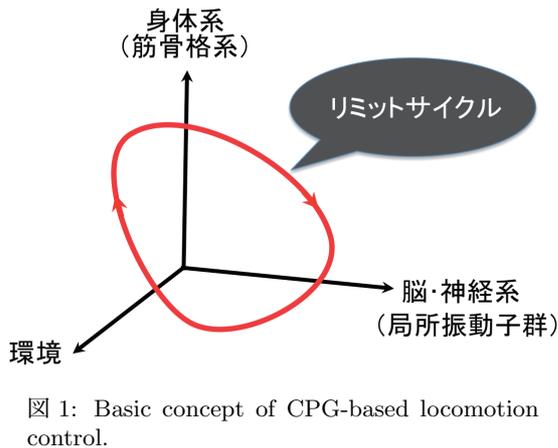
このような巧みな脚間協調は、脊椎動物では中央パターン発生器（CPG: Central Pattern Generator）と呼ばれる脊髄に存在する神経回路が重要な役割を果たしていることが知られている。しかしながら、これらの現象の発現機序の理解には依然として至っていないのが現状である。

<sup>1</sup> ロボット工学者はヒューマノイドロボットが好きなのである。鉄腕アトムやガンダムが与えた影響は計り知れない。

<sup>2</sup> もちろん、種に応じた制御方策の違いについての考察もきわめて興味深いことである。

<sup>3</sup> 今度動物園に行かれたらよく観察してみてください。非常に面白いです。

<sup>4</sup> まさに「個体発生は系統発生を繰り返す」ことを示す現象であり興味深い。



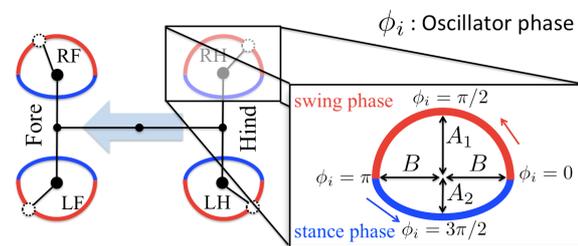
## 2.2 数理科学・ロボット工学的研究

CPG に着想を得た自律分散制御則に基づくロコモーション制御は、多賀らによる先駆的な研究を端緒としている [10]。このアプローチの要諦は、CPG を結合振動子系を基盤とした力学系でモデル化し、脳・神経系（制御系）と身体（機構系）、そして環境から構成される直積空間内に安定したリミットサイクルを生起させることである。身体各関節の動きを逐一明示的に制御しなくても、リミットサイクルが持つ構造安定性を活用することで、環境や身体特性の変化に対する適応性が自己組織的に実現できるところが肝要である。このような描像に基づいて、歩行や這行、遊泳といったロコモーション様式における環境適応的な振り舞い生成の原理の考察が進められてきた [11]–[17]。しかしながら、CPG の設計方針に関して明確な設計論がなく、これまでの研究は事例ごとにアドホックかつテイラーメイドな設計がなされてきた。数理科学的な観点からもモデルが提唱されているが、CPG のネットワークポロジの設計に主たる焦点が当てられており、身体不在の議論がなされていた（例えば [18]）。

## 3 事例研究紹介：四脚動物の自己組織的脚間協調

### 3.1 機構系

実験的検証を行うために筆者らが開発した四脚ロボット OSCILLEX を図 2 に示す。実機の全長は 0.28[m]、幅は 0.19[m]、高さは 0.16[m]、質量は 1.6[kg] である。同図に示すように、各脚先には弾性要素と圧力センサが実装されており、これによって



脚にかかる力を検出することができる。

本研究では、最低限の設定から四脚動物の脚間協調の基本論理を探るというミニマリストアプローチの思想に基づいている。そのため、脚内協調 (intra-limb coordination) に関しては無視している。具体的には、肘や膝、手首、足首などの関節は実装されていない、一本の棒のような構造を持つ脚を考えることにした。しかしながらこのような単純な構造では、遊脚期で転倒しやすくなるという問題が生じる。そのため、脚先の軌道を図 3 に示すように二つの楕円を合わせたものとし、支持脚期では身体内側を通るようにすることで効果的に身体を支持して転倒を防ぐ工夫をしている。以下、この制御に関して詳しく述べる。

各脚には振動子が実装されている。 $i$  番目の脚を制御する振動子の位相を  $\phi_i$  とすると、当該脚の脚先

の軌道は、次式のように制御される (図 3) :

$$\begin{aligned} X_i &= -A\cos\phi_i & (0 \leq \phi_i < 2\pi), \\ Y_i &= B_1\sin\phi_i & (0 \leq \phi_i < \pi), \\ Y_i &= B_2\sin\phi_i & (\pi \leq \phi_i < 2\pi). \end{aligned} \quad (1)$$

ここで,  $A, B_1, B_2$  は正の定数 ( $B_1 > B_2$ ) を表している. また,  $X_i$  と  $Y_i$  はそれぞれ体軸方向の脚先の動き, 体軸に垂直な方向の脚先の動きをそれぞれ示している, このように2つのサーボモータにより図3で示されているような楕円軌道に沿って脚先が駆動される. ここで,  $\sin\phi_i > 0$  の時は支持脚期,  $\sin\phi_i < 0$  の時は遊脚期に対応していることに注意されたい.

### 3.2 制御系 (CPG モデル)

CPG に着想を得た自律分散制御に基づく脚間協調を実現するためには, 各脚が局所的に入手可能な情報を用いて当該振動子の位相を自発的に調節する必要がある. この要請を満たすために本研究では, CPG を構成する  $i$  番目の脚の振動子の位相  $\phi_i$  を以下のように時間発展させることにした:

$$\dot{\phi}_i = \omega - \sigma N_i \cos\phi_i. \quad (2)$$

ここで  $\omega$  は固有角振動数である. 右辺第2項は, 機構系から制御系への局所センサフィードバックを表しており, 本モデルの鍵となる項である.  $N_i$  は接地により脚が地面から受ける力であり,  $\sigma$  は機構系から制御系へのフィードバックの大きさを表す正の定数である.

本モデルで導入した局所センサフィードバック項の物理的意味を以下で説明する. この項は,  $i$  番目の脚が遊脚であれば ( $N_i = 0$ ) 位相修正に影響を及ぼさない. しかし, 支持脚になり床反力が生じると ( $N_i > 0$ ),  $\phi_i = 3\pi/2$  の方向に位相を修正することになる. ここで位相  $\phi_i = 3\pi/2$  は, 図3から明らかなように, 支持脚期の中でも身体をもっとも効果的に支える状態となっていることに注意されたい. すなわちこの項は, 床反力が生じ, そしてそれが強ければ強いほど, 支持脚であり続けようとする方向に位相修正がなされることを意味している. これはごく自然なフィードバックであろう.

ここで一点補足しておきたいことがある. 本CPGモデルでは, 振動子間の「直接的な相互作用」は考慮していない. これは, 制御系主導でねらった歩容を誘導するのではなく, 「身体の声聴く」ことによって適

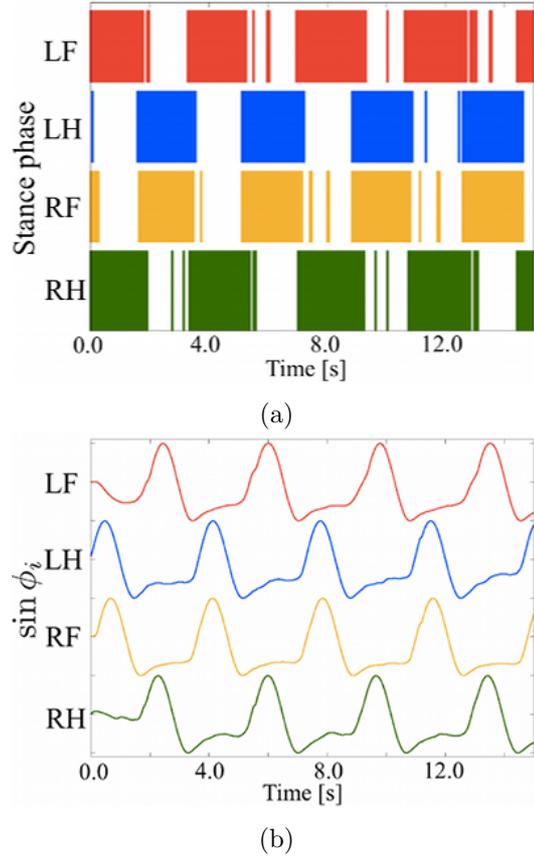
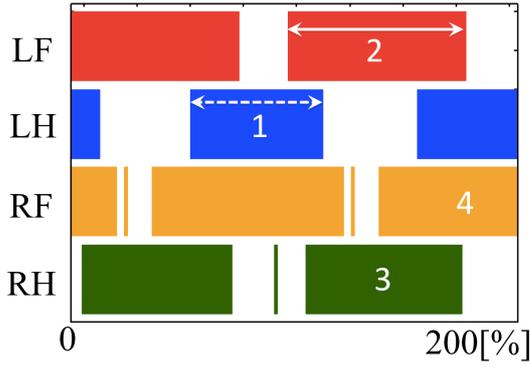


図4: Experimental result in steady walking motion: (a) gait diagram, and (b) phases.

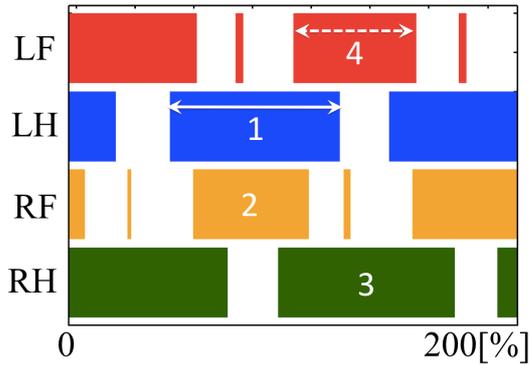
動的な歩容を自発的に発現することを意図したからである. 実際, ある脚が遊脚になり当該脚の床反力が0になれば, 他の支持脚の床反力は瞬時に大きくなるので, これに基づいて振動子間に「間接的な相互作用」を実装することができる. これまでのCPGモデルでは, 構成要素である振動子間のネットワークポロジに工夫を加えることで歩容の生成を試みてきた. しかしながらそもそも生物のロコモーションは, 脳・神経系と身体, そして環境との間の動的な相互作用の中から創発する現象である. このため本モデルでは, 振動子間の“neural communication”よりは“physical communication”の実装を最優先として考慮している.

## 4 実験結果

提案するCPGモデルの妥当性を検証するために, 四脚ロボット OSCILLEX を用いていくつかの実験を行った. 図4に, 静止状態から歩行状態への遷移過



(a)



(b)

図 5: Experimental results of the adaptability to changes in body properties: (a) with a load (0.12 kg) on the fore legs and (b) with a load (0.29 kg) on the hind legs.

程を示す。同図 (a) はゲイトダイアグラムを、(b) は  $\sin \phi_i$  の時間発展である。同図において、LF, LH, RF, RH は左前脚、左後脚、右前脚、右後脚をそれぞれ示している。ゲイトダイアグラムで色のついている部分は支持脚期を、白色の部分は遊脚期を表している。ここで初期条件は、脚の初期位相はすべて  $0.0[\text{rad}]$  ( $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = \phi_4 = 0.0[\text{rad}]$ ) とし、また各脚に実装されている振動子の角周波数  $\omega$  はすべて  $0.0[\text{rad}/\text{sec}]$  とした。時刻 0.0 ですべての脚の  $\omega$  を  $0.4[\text{rad}/\text{sec}]$  とした。同図から、ロボットは素早く定常歩行に移行することが見て取れる。これはきわめて興味深い現象である。なぜならば、結合振動子系をコントローラとして用いると、初期の位相分布から定常運動状態の位相分布に遷移するのに時間がかかることが多いからである。紙面の都合上、ここでは示さないが、本 CPG モデルによって歩行速度の変化に応じた歩容が迅速に発現できることを確認し

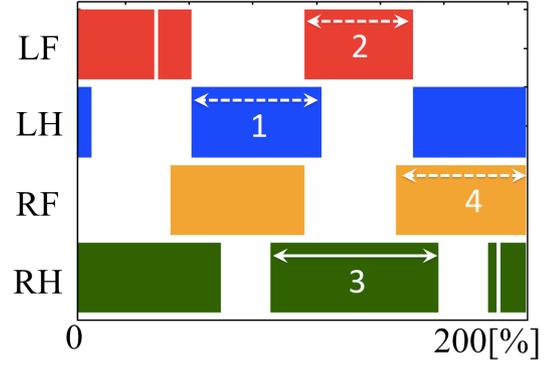


図 6: Experimental results of the asymmetric gait with a load (0.23 kg) on the right hind legs.

ている。このような優れた特性を発現できる理由に関しては次節にて考察する。

次に身体特性変化に対する適応性に関する実験結果を示す。図 5(a) は前脚に 0.12 kg の重りを載せた場合を、同図 (b) は後脚に 0.29 kg の重りを載せた場合の 2 周期分のゲイトダイアグラムをそれぞれ示している。同図から荷重位置に応じて転倒を防ぐような歩容が自己組織的に発現していることが見て取れる。ここで興味深いことは、前荷重の場合にはウマなどの一般的な四脚哺乳類で観察される“lateral sequence walk”が歩容が発現し、後荷重の場合には霊長類と同様のいわゆる“diagonal sequence walk”が発現していることである。これらの歩容が発現する機序は推測の域を出ていなかったが、本 CPG モデルによれば重心位置に起因した現象であることを明確に示唆している。

非対称な歩容を自己組織的に発現することも可能である。図 6 は右後脚の真上に 0.23 kg の重りを載せた場合の実験結果を表している。同図から、転倒を防ぐために右後脚の支持脚期が他と比べて著しく長くなっている歩容となっていることがわかる。本 CPG モデルはきわめて簡単な数式で表されるが、このように四脚動物で観察される多くの現象をうまく再現できている点はきわめて興味深い。

## 5 考察

本節では、提案する CPG モデルの本質を数理的に考察することを試みる。本 CPG モデルの位相の時間発展方程式である式 (2) は、位相振動子の拡張概念である Active Rotator Model とみなすことが

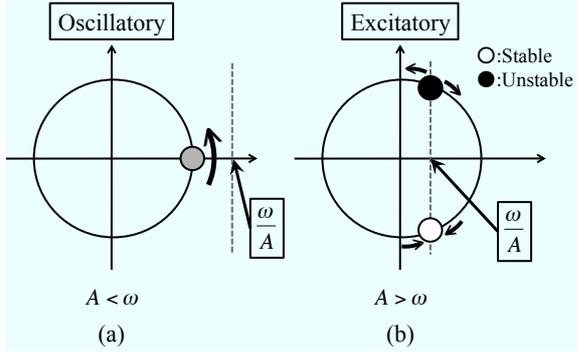


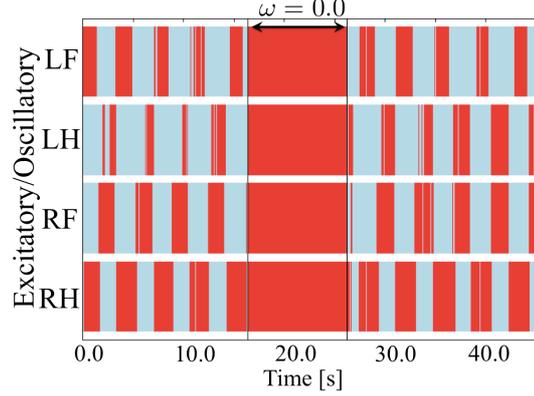
図 7: Active rotator model : (a) oscillatory regime, and (b) excitatory regime.

できる [19]. Active Rotator Model は, Fitzhugh-Nagumo Model をさらに縮約したモデルと捉えることができ, その一般形は次のように記述される:

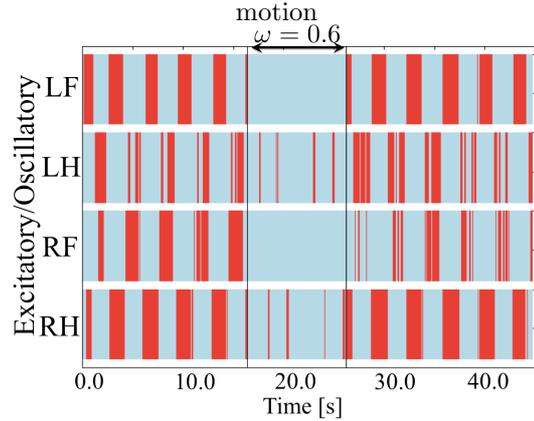
$$\dot{\phi} = \omega - A \cos \phi. \quad (3)$$

ここで  $\omega$  は固有振動数である. 右辺第 2 項の  $A$  は, 系の振る舞いを決定する重要なパラメータである. 図 7 に  $A < \omega$  の場合 (左図) と  $A > \omega$  (右図) の場合の Active Rotator の特性を示す. 同左図の場合は, 角速度  $\omega - A \cos \phi$  で単位円上を回転する振動性の性質を示す. 一方, 同右図の場合は,  $\omega - A \cos \phi = 0$  を満たす安定解と不安定解 (それぞれ図中の白丸と黒丸) が存在し, 外乱などが加わらない場合は安定解の位相に収束する. もし, 外乱などにより不安定解の位相を超えると単位円上を 1 周し, 再び安定解に落ち着く興奮性の性質を示す. このように,  $A$  の値に応じて系は振動性か興奮性かのどちらかの特性を示すのである.

ここで本 CPG モデルでは, Active Rotator Model におけるパラメータ  $A$  の値が床反力  $N_i$  によって規定されることに注意されたい. したがって本 CPG モデルでは, 大きな荷重がかかっている脚の当該振動子は興奮性を示し, 荷重がある程度抜けるまで支持脚であり続けることが保証されることを意味しており, それゆえに定常歩行への素早い遷移が実現されていたわけである. 図 8 に, 歩行速度を変化したときに振動子がどのような特性を示すのかを観察した実験結果を示す. 同図 (a) は歩行状態 ( $\omega = 0.4$ ) と静止状態 ( $\omega = 0.0$ ) の間の遷移を, (b) は速度の異なる歩行状態 ( $\omega = 0.4, 0.6$ ) 間の遷移を示している. 赤色の領域が興奮性を, 青色の領域が振動性を示している. 静止状態では興奮性を示し, 歩行速度



(a) transition between walking and standing



(b) transition during a change in walking velocity

図 8: Spatio-temporal pattern of the excitatory and oscillatory regimes in the proposed CPG model. In these figure, the red and sky blue areas represent the excitatory and oscillatory regimes, respectively.

が大きくなると振動性がドミナントになることが見て取れる.

歩行という一見するとリズム的な運動の背後には, 興奮性と振動性が拮抗的にせめぎ合うメカニズムが内在されており, 両者の関係から状況依存的な歩容が発現していることを本モデルは示唆している. このような解釈はこれまでに報告されておらず, 生物ロコモーションの発現機序理解に新たな視座を与えるものと期待される.

## 6 まとめと今後の課題

本稿では, 非常に簡素な四脚歩行モデルを用いて考察を行い, Active Rotator に基づく CPG モデルを提案した. 脚にかかる荷重に応じて, 振動性・興奮性の時空間的励起が可能な四脚ロボット実機を開

発し、実機実験を行った。実機実験の結果、定常状態での安定的な歩行のみならず、静止状態と歩行状態間のスムーズな遷移や歩行速度の変更が可能となることが確認された。以上から、Active Rotatorに基づくCPGモデルは生物の運動制御をモデル化する新たな素過程として期待できる。今後は、本稿で紹介した四脚ロボット実機を用いて、歩容遷移や外乱や身体特性の変化に対する適応性の検証、ならびに多自由度を有する四脚ロボットを開発し本提案手法の妥当性の検証をさらに行っていく予定である。

## 参考文献

- [1] M.L. Shik, F.V. Severin, and G.N. Orlovskii, *Biophysics*, 11, 756-765 (1966)
- [2] S. Grillner, *Physiol. Rev.*, 55, 247-304 (1975)
- [3] S. Grillner, *Science*, 228, 143-149. (DOI 10.1126/science.3975635.) (1985)
- [4] <http://www.team-kobayashi-crest.jp/>
- [5] T. Umedachi, K. Takeda, T. Nakagaki, R. Kobayashi, and A. Ishiguro, *Biol. Cybern.*, 102, 261-269. (DOI: 10.1007/s00422-010-0367-9) (2010)
- [6] D.F. Hoyt, and C.R. Taylor, *Nature*, vol.292. No.16, pp.239-240 (1981)
- [7] M. Hildebrand, *Science*, 150, 701-708 (1965)
- [8] M. Hildebrand, *American Journal of Physical Anthropology*, 26, 119-130 (1967)
- [9] 岩田浩子, *バイオメカニズム学会誌*, 19(3), 143-147 (1995)
- [10] G. Taga, *Biol Cybern*, 73, 97-111 (1995)
- [11] A.J. Ijspeert, *Neural Networks*, 21, 642-653. (DOI 10.1016/j.neunet.2008.03.014.) (2008)
- [12] H. Yuasa and M. Ito, *Biol. Cybern.*, 63, 177-184. (DOI 10.1007/BF00195856.) (1990)
- [13] S. Ito, H. Yuasa, Z.-W. Luo, M. Ito, and D. Yanagihara, *Biol. Cybern.*, 78, 337-347. (DOI 10.1007/s004220050438.) (1998)
- [14] H. Kimura, S. Akiyama, and K. Sakurama, *Autonomous Robots*, 7, 247-258. (DOI 10.1023/A:1008924521542.) (1999)
- [15] Y. Fukuoka, H. Kimura, and A.H. Cohen, *Int. J. of Robotics Res.*, 22, 187-202. (DOI 10.1177/0278364903022003004.) (2003)
- [16] K. Tsujita, K. Tsuchiya, and A. Onat, , *Artificial Life and Robotics*, 5, 152-158. (DOI 10.1007/BF02481462.) (2003)
- [17] L. Righetti, A.J. Ijspeert, *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 819-824. (DOI 10.1109/ROBOT.2008.4543306) (2008)
- [18] M. Golubitsky, I. Stewart, P.-L. Buono, and J.J. Collins, *Nature*, 401, 693-695. (DOI 10.1038/44416.) (1999)
- [19] S. Shinomoto, and Y. Kuramoto, *Progress of Theoretical Physics*, 75-5, 1105-1110 (1986 )