

周波数と位相の調整が可能な マルチリズムックオシレータモデル 一次元ホッピングロボットの跳躍運動学習への適用

坂井 善行*1, 石田 怜*1, 大脇 大*1, 手老 篤史*2, 石黒 章夫*1*3

Yoshiyuki Sakai*1, Satoshi Ishida*1, Dai Owaki*1, Atsushi Tero*2 and Akio
Ishiguro*1*3

*1東北大学, *2 JST さきがけ, *3 JST CREST

*1 Tohoku University, *2 JST PRESTO, *3 JST CREST

キーワード: 多重リズム性(Multi-rhythmicity), 周波数調整(Frequency adaptation),
位相調整(Phase adaptation)

連絡先: 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-05 電気・情報系1号館 512号室
東北大学大学院 工学研究科 電気・通信工学専攻 石黒研究室 坂井 善行,
Tel.:022-795-3207, Fax.:022-795-3781, E-mail: sakai@cplx.ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

歩行や走行, 遊泳, 飛翔など, ほとんどの動物のロコモーションは周期的な運動パターンに基づいて生成されている. そしてその運動パターンは, 環境や身体の力学的特性に対して柔軟かつ適応的に変化することが知られている. 脊椎動物の場合, このような運動パターン形成は, 脊髄に存在するCPG (Central Pattern Generator)と呼ばれる神経回路網が中心的な役割を担っていると考えられている. 特にヤツメウナギといった原初的な脊椎動物では, そのCPGの構造がほぼ完全に同定されており, リズム的な振る舞いを示すオシレータ(神経振動子)どうしがネットワーク状に結合して構成されていることが明らかになって

いる¹⁾. さらに粘菌などの神経系を持たないような原初的な生物であっても, 化学的なオシレータのネットワークを活用して, CPGと同様にリズム的な運動を創り出している²⁾. このようにCPGは, 生物種によっては物質的基盤こそ違うものの, 生物のロコモーションの発現原理を理解する上で鍵となる重要な概念である.

CPGが持つ重要な特性は, 身体, 環境と密接に関連することで, 発現する運動パターンを状況依存的かつ柔軟に改変できることである. 物理的にはこの現象は相互引き込みとして理解することができ, 多賀らによる先駆的な研究³⁾を端緒として, この特性を工学的に模擬したCPGモデルを用いて, ロボットのロコモーション制御を試みる研究が数多く提案

されている⁴⁾⁵⁾。しかしながら、これらの既存研究の多くは、位相調整のみに着目した運動パターン生成を議論している。一方、柳原らは、特殊なトレッドミル上に除脳ネコを置き、一脚のみを異なる速度で歩行させても、除脳ネコは柔軟に運動パターンを調整するという興味深い実験結果を示している⁶⁾。この実験が示唆するように、位相調整のみならず、周波数調整もCPGが具備すべき重要な特性である。このような背景から、最近、自律的な周波数調整が実現可能なCPGモデルが提案されている⁷⁾。

本研究では、手老らによって提案されたマルチリズムなオシレータモデル⁸⁾をベースとして、位相と周波数の両者を自律的に調整可能なオシレータモデルを提案する。本稿では、一次元ホッピングロボットの跳躍運動学習を事例として採り上げ、提案するモデルの妥当性を検証する。予備的なシミュレーション実験の結果、ロボットの力学的特性（質量、バネ特性など）の変化に応じて発振周波数が自律的に調整され、効率的な跳躍運動が実現されることが確認された。また、外乱として定常状態から強制的に位相ずれを与えた場合に対しても、柔軟に位相調整を行うことで定常状態への復帰が確認されたので報告する。

本稿の構成は以下のとおりである。まず次節にて、本研究で事例問題として採り上げる一次元ホッピングロボットの跳躍運動学習、そして提案するマルチリズムオシレータモデルについて説明する。次に3節ではシミュレーション実験の結果を示し、最後に本研究のまとめと今後の展望を述べる。

2. 提案手法

2.1 一次元ホッピングロボットによる跳躍運動学習

周波数と位相の両者を調整可能なオシレータモデルの妥当性を検証するために、本研究では一次元ホッピングロボットによる跳躍運動学習を採用した。ホッピングは適切な周波数とタイミング(位相)で跳躍力を加えることで実現されるため、本オシレータモデルの検証に適していると考えられる。Fig.1(a)に取り扱うホッピングロボットを示す。同図に示すように、このロボットは胴体と脚の間にバネとダンパを有する単純な構造を持ち、跳躍力を瞬間的かつ周期的に働かせることで、上下方向(x 軸方向)にのみ運動することができる。このロボットの運動方程式を以下に示す：

$$m\ddot{x}_1 + c\dot{x}_1 + k(x_1 - L) = -mg + F_x(t) \quad (1)$$

m は胴体の質量、 c は粘性係数、 k はバネ定数、 L はバネの自然長、 g は重力加速度である。 $F_x(t)$ はロボットが x 軸方向に周期的に発生する跳躍力(力積が一定の撃力)であり、 x_1 は胴体の重心位置である。ここで、脚の質量は無視している。また、上式は脚の接地時のみに適用され、跳躍時には自由落下すると仮定する。

このロボットに与えられたタスクとは、より高く跳躍するように、跳躍力を発生する周波数とタイミング(位相)を学習することである。このように本事例では適切な周波数と位相を生成することが重要であり、本研究ではこれを後述するオシレータによって適応的に生成させる。

2.2 マルチリズムオシレータ

本オシレータモデルは、Fig.1(b)で示されるように、異なる周波数と位相を持つ多数の振

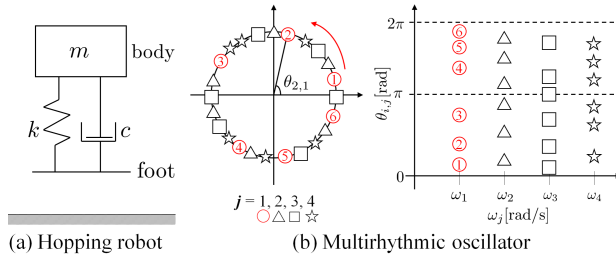


Fig. 1 Mechanical system and control system on learning of hopping locomotion.

動子から構成されているのが特徴である．本オシレータモデルのダイナミクスは，以下の式で記述される：

$$\dot{\theta}_{i,j} = \omega_j + f(\theta_{i,j}) + g(\theta_{i,j}) \quad (2)$$

各振動子の位相は $\theta_{i,j}$ で表わされる．添え字 j は図中の各記号の種類（丸，三角，四角など）に対応しており， j の値に応じて異なる周波数 ω_j で回転している．添え字 i は各周波数ごとの振動子に付けられた固有の番号である．図中の $\theta_{2,1}$ は，周波数 ω_1 （丸）の2番目の振動子の位相を示している． $f(\theta_{i,j})$ と $g(\theta_{i,j})$ は，それぞれ質点に加える力の周波数およびタイミング（位相）を調整する項である．これらの詳細については後述する．

ロボットへの跳躍力の印加は生物のニューロンモデルで広く使われている“Leaky Integrate and Fire”モデルを基に実現している．ここでは，ごく短時間にあらかじめ定められた閾値以上の数の振動子が単位円上の位相 π の点を通り過ぎたとき，ロボットにインパルス的な跳躍力を加えることにする．注意すべきことは，すべての振動子の総和が閾値を超えたときではなく，各周波数ごとに閾値を越える数の振動子が通り過ぎた場合に跳躍力が印加される点である．したがって，本オシレータモデルにおける周波数調整とは，ロボットの運動に適した固有周波数をもつ振動子群をクラスタ化することで，制御出力の周波数を抽出

することになる．この方式において重要となるのが，適切な周波数の振動子群がクラスタを形成し，適切なタイミング（位相）で単位円上の位相 π の点を通り過ぎることである．この要請を満足するために，本オシレータモデルでは，式(2)の $f(\theta_{i,j})$ ， $g(\theta_{i,j})$ でクラスタの形成とタイミング（位相）調整を行っている．以下にその詳細を示す．

2.2.1 周波数調整項 $f(\theta_{i,j})$ の設計

前述のように周波数調整とはクラスタ形成に対応する．そこで，周波数調整項 $f(\theta_{i,j})$ を以下のように設計した．

$$f(\theta_{i,j}) = \alpha H(t) \sin \theta_{i,j} + \xi_{i,j} \omega_j \quad (3)$$

第一項はクラスタを形成する項であり， α は定数である．ここで， $H(t)$ は外部刺激（感覚フィードバック）を表しており，外部刺激を受けると $H(t) = 1$ となり，それ以外の場合は $H(t) = 0$ となる．第二項の $\xi_{i,j}$ はすべての振動子に加えられるランダムノイズであり，クラスタを崩壊させる効果を持つ． $\xi_{i,j}$ に各振動子の固有周波数 $\omega_{i,j}$ を乗じることで，ノイズによる単位時間当たりの位相変化の割合を各周波数で等しくしている．以下に，この式が持つダイナミクスを説明する．

いま，外部刺激が ω_{ext} という周波数で入力されるとする．外部刺激が入力されたときの各振動子の振る舞いは，自身の \sin の符号によってTable.1のように分類される．このとき，分類された両者の間の位相差は外部刺激が入力されると縮められる．そのため，各振動子の \sin の符号が毎周期変化しなければ，外部刺激が入力される度に位相差が縮められ，結果として振動子はクラスタを形成することになる．一方，周期ごとに \sin の符号が異なると，位相差はほとんど縮まらず，ノイズの効果もあり

Table 1 Phase modification of each oscillators when $H(t)$ is input.

	$\sin \theta_{i,j} > 0$	$\sin \theta_{i,j} < 0$
$f(\theta_{i,j})$	⊕ 位相を進めて他の振動子に追いつこうとする	⊖ その場に留まり他の振動子が追いつくのを待つ

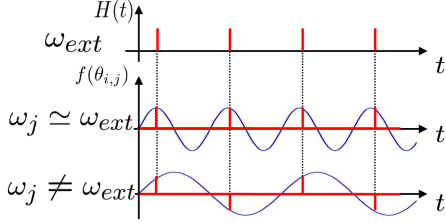


Fig. 2 The meaning of $H(t)$.

クラスタは形成されない．したがって，Fig.2に示されるように，クラスタを形成するのは $\omega_j \simeq \omega_{ext}$ となる振動子群のみとなる．なお，本事例において外部刺激はロボットが下死点に到達したときに入力されるとする．これにより，ロボットの跳躍の周波数とほぼ等しい周波数を持つ振動子群がクラスタを形成することになる．

2.2.2 位相調整項 $g(\theta_{i,j})$ の設計

前述より，クラスタを制御出力として活用することから，位相調整はクラスタに対して選択的に行われるのが妥当である．そこで，位相調整項 $g(\theta_{i,j})$ を以下のように設計した．

$$g(\theta_{i,j}) = \beta \cdot H(t) \cdot \overline{\theta_{i,j}} \quad (4)$$

$$\overline{\theta_{i,j}} = \frac{1}{n} \sum_i^n \sin \theta_{i,j} \quad (5)$$

ここで， β は定数， $H(t)$ は式(3)の第一項と同様の外部入力である． n は同じ固有周波数で運動している振動子群の数である． $\overline{\theta_{i,j}}$ は同じ固有周波数で回転している振動子群の平均位相を表していることに注意されたい．したがって，クラスタを形成している振動子群は $\overline{\theta_{i,j}} \neq 0$ であるために位相調整が行われる．一方，クラスタを形成せずにバラバラな位相で回転しているものは $\overline{\theta_{i,j}}$ の値が常時ほぼゼロとなるため

に位相調整が行われない．ゆえに， $\overline{\theta_{i,j}}$ の値を見ることでクラスタを形成しているかどうかを判別することができ，クラスタを形成している振動子群を選択的に位相調整することが可能となる．

3. シミュレーション実験

3.1 実験設定

提案するマルチリズムオシレータモデルの周波数と位相の自律的調整能力を検証するために，本研究では以下の2種類の実験を行った：

実験1: 胴体の質量変化に応じて，自律的に周波数調整を行って効率的な跳躍運動が獲得できることを検証する（周波数調整能力の検証）．

実験2: 定常状態から外乱として振動子に対し強制的に位相ずれを与えた場合に，適切に位相調整が行われることを検証する（位相調整能力の検証）．

なお，本実験において使用した制御パラメータの値は以下のとおりである： $\alpha = 3.5$ ， $-0.85 < \xi < 0.85$ ．また，本実験で扱う振動要素の固有周波数は30種類 ($\omega_j = 2.0, 2.2, \dots, 7.8, 8.0 [\text{rad/s}]$) とし，1種類のごとの要素の数は20とした．

3.2 実験1

跳躍運動学習の結果をFig.3に示す．一回の跳躍を学習の1ステップとし，1ステップごとの跳躍運動の周波数変化を表している．本実験では合計200回の跳躍を行い，100回目の跳躍後に胴体の質量を1.0[kg]から2.0[kg]へと変化させている．いずれの質量においても，跳躍運動の周波数はロボットの身体特性に応じ

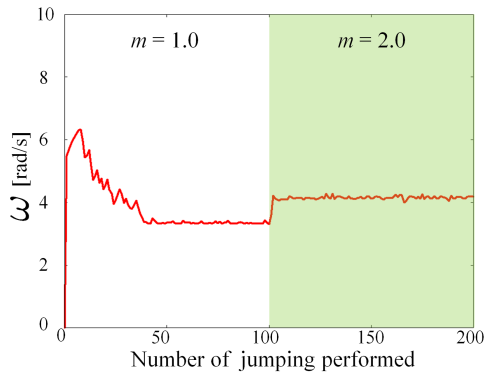


Fig. 3 Frequency adaptability against the change of body's mass.

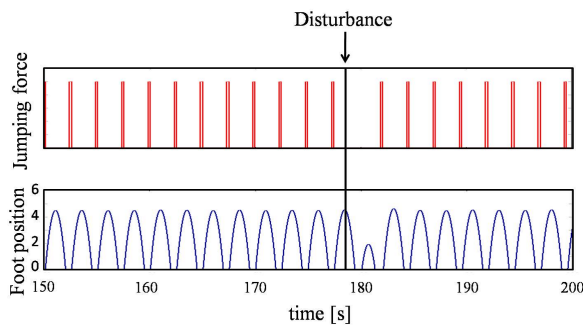


Fig. 4 Phase adaptability against disturbance.

て、適切な固有周波数を持つ振動要素が選択されていることが確認できる。

3.3 実験2

本モデルで設計した位相修正項の効果を検証するために、定常状態から強制的に位相ずれを起こした場合の様子をFig.4に示す。Fig.4上段は振動子からの出力のタイミングを表しており、下段はロボットの脚先の位置を示している。ここで、同図中の黒線部に強制的に位相ずれを起こしている。位相ずれの発生後、柔軟に位相修正を行うことで、定常状態への迅速な復帰が確認できる。

4. まとめと今後の課題

本研究では、周波数と位相の自律的な調整が可能なオシレータモデルとして、多数の異

なる周波数を持つ振動子で構成されるマルチリズムオシレータを提案した。本稿では特に、本オシレータモデルの妥当性を検証するために、一次元ホッピングロボットの跳躍運動学習を事例として採り上げた。その結果、ロボットの身体特性に応じて自律的に周波数調整が行われることを確認した。

CPGの持つ重要な特性に、実時間スケールで行われる運動安定化と個体発生の時間スケールで行われる運動探索という二つの異なる機能、異なる時間スケールが共存していることが挙げられる。本稿で提案したマルチリズムオシレータを用いる最大の効用の一つは、このような異なる時間スケールを持つダイナミクスを階層性を持たせることなく、一つのオシレータに共存させることができる点である。

今後の課題として、実機を用いた実験的検証が挙げられる。また、複数のマルチリズムオシレータをネットワーク状に結合させてCPGを構成し、多脚歩行ロボットの实時間適応制御といった問題に適用可能であると考えられる。

参考文献

- 1) S. Grillner: "Neural networks for vertebrate locomotion", Scientific American, 274, 1, pp.64-69, 1996.
- 2) A. Takamatsu, R. Tanaka, H. Yamada, T. Nakagaki, T. Fujii, and I. Endo: "Spatio-temporal symmetry in rings of coupled biological oscillators of Physarum plasmodium", Phys. Rev. Lett., 87, 078102, 2001.
- 3) G. Taga; "Emergence of bipedal locomotion through entrainment among the neuro-musculo-skeletal system and the en-

- environment”, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 75, 1-3, pp.190-208, 1994.
- 4) Y. Fukuoka, H. Kimura, and A. Cohen: “Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on irregular terrain based on biological concepts”, *The International Journal of Robotics Research*, 3-4, pp.187-202, 2003.
 - 5) S. Aoi and K. Tsuchiya: “Locomotion control of a biped robot using nonlinear oscillators”, *Autonomous Robots*, 19, pp.219-232, 2005.
 - 6) S. Ito, H. Yuasa, Z. Luo, M. Ito and D. Yanagihara: “A mathematical model of adaptive behavior in quadruped locomotion”, *Biological Cybernetics*, 78, pp.337-347, 1998.
 - 7) J. Buchli, L. Righetti, and A. J. Ijspeert: “A dynamical systems approach to learning: a frequency-adaptive hopper robot”, *Proceedings of the VIIIth European Conference on Artificial Life ECAL 2005*, pp.210-220, 2005.
 - 8) T. Saigusa, A. Tero, T. Nakagaki and Y. Kuramoto: “Amoebae Anticipate Periodic Events”, *Physical Review Letters*, 100, 1, pp.018101-018105, 2008.