

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題	運動学習プリミティブを用いた2足歩行ロボットの学習および適応
Title	
著者	中西淳, 森本淳, 遠藤玄, チェンゴードン, シャール ステファン
Author	Jun Nakanishi, Jun Morimoto, Gen Endo, Gordon Cheng, Stefan Shaal
掲載誌/書名	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04講演論文集, Vol. , No. , pp. 1A1-L1-56
Journal/Book name	, Vol. , No. , pp. 1A1-L1-56
発行日 / Issue date	2004,
URL	<a href="http://www.jsme.or.jp/publish/transact/index.html">http://www.jsme.or.jp/publish/transact/index.html</a>
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本機械学会に帰属します。
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

# 運動学習プリミティブを用いた2足歩行の学習および適応

Learning and Adaptation of Biped Locomotion with Dynamical Movement Primitives

中西 淳 (ATR, ICORP/JST)

遠藤 玄 (SONY, ATR)

ステファン シャール (南カリフォルニア大, ATR)

森本 淳 (ATR)

ゴードン チェン (ATR)

Jun NAKANISHI ATR CNS, ICORP JST, Kyoto Japan  
Jun MORIMOTO ATR CNS, Kyoto Japan  
Gen ENDO Sony Corporation, Tokyo, Japan, ATR CNS, Kyoto, Japan  
Gordon CHENG ATR CNS, Kyoto Japan  
Stefan SCHAAL USC, Los Angeles, USA, ATR CNS, Kyoto Japan

In this paper, we present a framework for learning biped locomotion using dynamical movement primitives based on nonlinear oscillators. Our ultimate goal is to establish a design principle of a controller in order to achieve natural human-like locomotion. We suggest dynamical movement primitives as a central pattern generator (CPG) of a biped robot, an approach we have previously proposed for learning and encoding complex human movements. Demonstrated trajectories are learned through movement primitives by locally weighted regression, and the frequency of the learned trajectories is adjusted automatically by a frequency adaptation algorithm based on phase resetting and entrainment of coupled oscillators. Numerical simulations and experimental implementation on a physical robot demonstrate that robust biped walking against external perturbations and environmental changes can be achieved with the proposed algorithm.

Key Words : Biped Locomotion, Learning from Demonstration, Dynamical Movement Primitives, Locally Weighted Regression, Phase Resetting

## 1. はじめに

本論文では、運動学習プリミティブを用いた2足歩行の学習および適応について述べる。著者らは、ロボットの運動学習・生成手法として見まね運動学習法に注目し、非線形力学系と統計的学習に基づく運動記述および学習手法である運動学習プリミティブを提案してきている<sup>(1)</sup>。文献<sup>(2)</sup>では、位相振動子に基づく周期運動学習プリミティブをロボットの2足歩行におけるCPG (Central Pattern Generator) モデルとして用い、人間の歩行動作の学習およびロボットでの歩行運動生成を行う基本的な枠組みを提案した。さらに、環境からのフィードバックによる位相リセット<sup>(3)</sup>および位相振動子の引き込みを利用した歩行周期の自律的な適応則の提案を行い、数値シミュレーションにより、その有効性の基礎的な検討を行った。

近年、生物規範型の歩行制御手法として神経振動子を用いたCPGによる自律的な適応機構を持った歩行運動生成の試みがなされてきている<sup>(4)</sup>。CPGとしては、松岡によって提案された伸筋と屈筋の駆動をモデル化した非線形の連立微分方程式による神経振動子<sup>(5)</sup>が広く用いられ、環境との相互作用を伴う引き込み現象を利用した様々な周期運動の制御に応用されている。しかしながら、各振動子の相互結合の設計をどのように行うかという点や、目的とする動作を実現する振動子のパラメータの調整が困難であるという問題点があり、制御系の設計手法としての課題が残されている。

これに対し、位相振動子は神経振動子と比較して、各振動子の位相関係の記述が明確であるという利点があり、結合振動子の位相関係の制御<sup>(6)</sup>、多足歩行ロボットの歩容生成<sup>(7, 8)</sup>、2足歩行制御への応用<sup>(9)</sup>などの研究がなされてきている。位相振動子に基づく周期運動プリミティブをCPGとして用いる利点は、振動子間の相互結合や環境からのフィードバックを用いた位相リセットなどによる各振動子の位相の制御が陽に行えるだけでなく、模範となる運動が与えられたときに、それらを高速に学習す

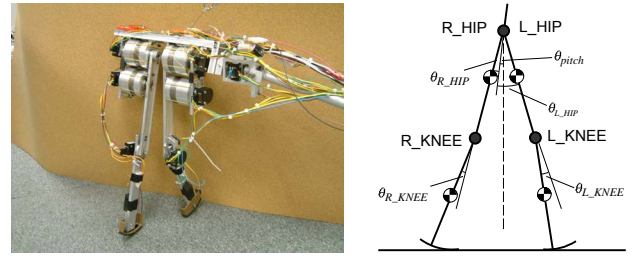


Fig. 1 Left: Physical system. Right: Five-link model of the robot.

ることが可能であることや、学習した周期運動のスケーリングが容易であることなどが挙げられる。

以下、本論文では、まず、著者らが提案する周期運動学習プリミティブおよび本運動学習プリミティブを用いた2足歩行制御系の設計について述べる。本論文では各振動子間に相互結合を持たせ、各関節間の位相差の制御を行うことを考える。次に位相リセットおよび歩行周期適応則について説明する。最後に外乱および環境変化に対する歩行のロバスト性の検証を数値シミュレーションと Fig. 1 に示す2足歩行ロボットを用いた実験により検証する。

## 2. 非線形力学系を用いた運動学習プリミティブ

見まね学習は効率のよいロボットの運動学習法として近年注目されてきており、自律型ヒューマノイドロボットの感覚運動制御への応用が期待されている<sup>(10)</sup>。著者らは、見まね運動学習の対象として、運動の基本動作となる到達運動および周期運動を考え、ロボットの運動を非線形力学系を用いて記述し、統計的学習により模範軌道を高速に学習する運動学習プリミティブを提案した<sup>(1)</sup>。以下、本節では本研究で用いる周期運動学習プリミティブの定式化について簡単に述べる。

## 2.1 周期運動学習プリミティブ

周期運動では，基本的な周期運動パターン生成器として以下のような極座標系  $(\phi, r)$  で表した位相振動子系を考える．

$$\dot{\phi} = \omega, \quad \tau \dot{r} = -\mu(r - r_0) \quad (1)$$

ここで， $(\phi, r)$  はそれぞれ振動子の位相，振幅を表す． $\omega$  は固有振動数， $\tau = 1/\omega$  は時定数， $r_0$  は（相対的な）目標振幅， $\mu$  は正の定数である．運動プリミティブの出力  $y$  は位相振動子の状態  $(\phi, r)$  およびその座標変換したものの  $\tilde{v} = [r \cos \phi, r \sin \phi]^T$  を入力とした 2 次系のダイナミクスである以下の式で表される．

$$\tau \dot{z} = \alpha_z(\beta_z(y_m - y) - z) \quad \tau \dot{y} = z + f(\tilde{v}, \phi) \quad (2)$$

ここで， $\alpha_z, \beta_z$  は正の定数， $y_m$  は出力のオフセットである． $(y, \dot{y})$  は運動プリミティブの出力であり，ロボットの目標関節軌道として用いる． $f$  は局所線形モデル<sup>(11)</sup> を用いた非線形関数近似器

$$f(\tilde{v}, \phi) = \frac{\sum_{i=1}^N \Psi_i \mathbf{w}_i^T \tilde{v}}{\sum_{i=1}^N \Psi_i} \quad (3)$$

であり，局所モデルはガウシアンカーネル

$$\Psi_i = \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_i^2}(\text{mod}(\phi, 2\pi) - c_i)^2\right) \quad (4)$$

により重み付けられ，出力は各局所モデルの荷重平均を取ることにより求められる． $\mathbf{w}_i$  は局所線形モデルのパラメータであり，目標となる模範軌道が与えられたときに Locally weighted regression<sup>(11)</sup> により決定される<sup>(1)</sup>．提案する運動プリミティブでは，学習した運動の空間的，時間的スケールが容易であるという特長が挙げられる．例えば周期運動においては  $r_0, \omega, y_m$  を変更することによって運動の振幅，周期，オフセットを任意に設定することが可能である．

## 3. 運動学習プリミティブを用いた 2 足歩行制御系

Fig. 2 に提案するロボット制御系の概念図を示す．CPG モデルとして，2.1 節で述べた周期運動学習プリミティブを用い，その出力をロボットの目標関節軌道  $\theta_{des}$  とする．ここでは各関節にそれぞれの目標軌道を生成する運動学習プリミティブを用いる ( $i = 1 \sim 4$ )．ここでは左腰関節を  $i = 1$ ，左膝関節を  $i = 2$ ，右腰関節を  $i = 3$ ，右膝関節を  $i = 4$  と定義する．ロボットの関節角度制御には局所 PD コントローラを用いる．文献<sup>(2)</sup> では，各振動子間の結合は考慮せず，環境から CPG へのフィードバックとしては接地情報による位相リセットを直接各振動子に行ったが，本論文では，参照振動子 (reference oscillator,  $\phi_{ref}$ ) を追加し，位相リセットは参照振動子のみについて行い，各振動子間の相互結合により望ましい位相関係を実現する．これにより，関節目標軌道が不連続になるという問題を防止することができる．

### 3.1 結合振動子系による各関節間の位相関係の制御

ここでは，各関節間の位相関係を制御するため，以下の相互結合を考える．

$$\dot{\phi}_i = \omega_i + \kappa \sum_{j=1}^N C_{ij} \sin(\phi_j - \phi_i) \quad (5)$$

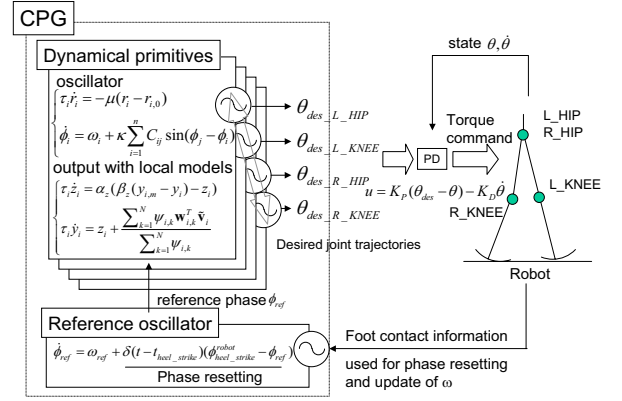


Fig. 2 Proposed control architecture for biped locomotion with dynamical movement primitives.

ここで  $\kappa$  は正の定数， $C_{ij}$  は結合行列  $C$  の各要素である．このような形式の位相振動子の結合は様々な結合振動子系の研究やその応用に広く用いられている．本論文では，望ましい位相関係を実現するための相互結合の設計手法として，文献<sup>(6)</sup> で提案された手法を用いる．本研究では，2 足歩行ロボットのそれぞれの脚のリンク間の位相は同位相，左右の脚のリンクの位相関係は逆位相になるように ( $\phi_1 - \phi_2 = 0, \phi_3 - \phi_4 = 0, \phi_1 - \phi_3 = \pi, \phi_2 - \phi_4 = \pi$ ) 結合行列  $C$  を

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

のように決定する．

### 3.2 位相リセットおよび歩行周期適応則

本節で述べる位相リセットおよび歩行周期適応則<sup>(2)</sup> は，結合位相振動子の引き込みのメカニズムを CPG とロボットの歩行運動との同期および歩行周期の自律的な適応に応用したものである．また，生物学的に位相リセットは生物におけるリズム運動の安定性に関係することも知られており<sup>(3)</sup>，位相リセットが外乱に対するロバストな歩行運動の実現に有効であると考えられる．文献<sup>(12)</sup> では数値シミュレーションにより，位相リセットが歩行運動に及ぼす影響について検討している．また，文献<sup>(9)</sup> では 2 足歩行ロボットの歩行制御に位相リセットを導入した制御系を提案している．ただし，本研究では，各関節の目標軌道は模範軌道から学習して獲得するのに対して，文献<sup>(9)</sup> では，設計者がある足先目標軌道を与え，逆運動学により各関節の目標軌道を決定している．

ここでは参照振動子  $\phi_{ref}$  に対し，以下の位相リセットおよび振動子の固有振動数の更新則を考える．

$$\dot{\phi}_{ref} = \hat{\omega}_{ref}^n + \delta(t - t_{heel\ strike}) (\phi_{heel\ strike}^{robot} - \phi_{ref}) \quad (7)$$

$$\hat{\omega}_{ref}^{n+1} = \hat{\omega}_{ref}^n + K(\omega_{measured}^n - \hat{\omega}_{ref}^n) \quad (8)$$

ただし  $n$  は歩数， $\phi_{heel\ strike}^{robot}$  は接地時における機械系振動子 (ロボット) の位相であり，左足の接地時には  $\phi_{heel\ strike}^{robot} = 0$ ，右足接地時には  $\phi_{heel\ strike}^{robot} = \pi$  と定義する．また，

$$\omega_{measured}^n = \frac{\pi}{T_{measured}^n} \quad (9)$$

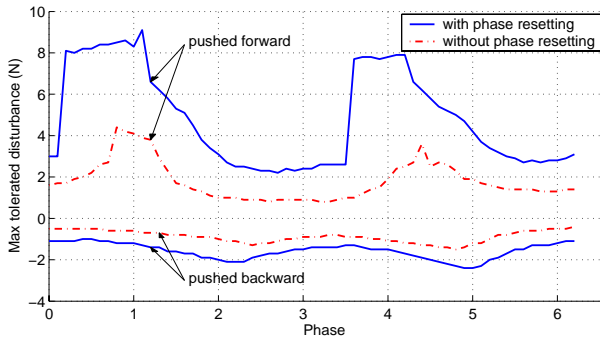


Fig. 3 Numerical evaluation of the robustness of walking against external perturbations. The plot shows the magnitude of the maximum external forces which the robot tolerated.

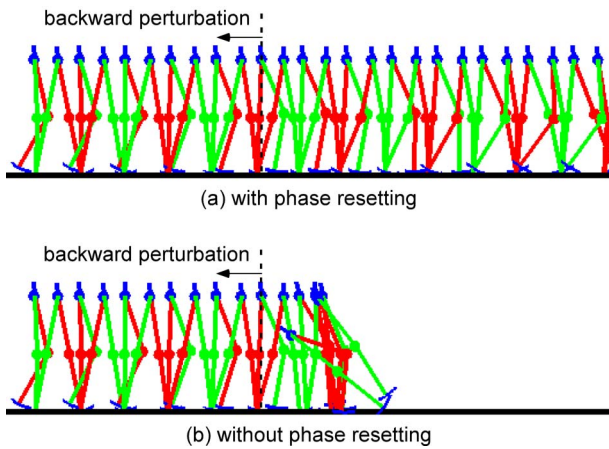


Fig. 4 An example of the response against backward perturbations. The robot is pushed backward by a perturbation force of  $-2.0$  N for a duration of  $0.1$  sec at  $\phi = 2.0$ . (a) with phase resetting. (b) without phase resetting.

であり,  $T_{measured}^n$  は  $n$  歩目においてロボットが一歩に要する時間(振動子に関しては半周期)と定義する. 式(7)では遊脚接地時に離散的に参照振動子の位相がリセットされる. 式(8)では一歩に要する時間の実測値により参照振動子の固有振動数を更新する. 各関節の振動子の固有振動数は接地時に  $\omega_i = \hat{\omega}_{ref}^{n+1}$  とし, 参照振動子と各関節の振動子との位相差は  $\phi_1 = \phi_2 = \phi_{ref}$ ,  $\phi_3 = \phi_4 = \phi_{ref} + \pi$  となるように参照振動子と各関節の振動子を結合係数を決定する.

#### 4. 数値シミュレーション

著者らの従来研究<sup>(2)</sup>では, 提案する基本的な枠組みを用いて, 人間の歩行データを模範軌道とした学習による定常歩行および歩行周期の自律的な適応が実現できることを数値シミュレーションにより示した. 本論文では, さらに提案する手法による歩行の外乱に対するロバスト性について検証する. 本節では, 外乱に対してロバストな歩行の実現に位相リセットが有効であることを数値シミュレーションにより示す. 数値シミュレーションではロボットの運動は矢状面上に拘束されているものとする.

本シミュレーションでは, 外乱として, 歩行中に様々なタイミングでロボットを前向きあるいは後ろ向きに押

すような外力を  $0.1$ sec 間加え, どれだけの大きさまでの外力に対してロボットが転倒せず歩行をを継続できるかを検証した. 具体的には, 歩行中の位相  $\phi$  が  $0 \sim 2\pi$  の間で各位相 ( $0.1$ rad 毎) に対し, ロボットが歩行継続可能な最大の外乱の大きさを調べた. 位相リセットがある場合とない場合とを比較した結果を Fig. 3 に示す. また, Fig. 4 に  $\phi = 2.0$  rad において, 外乱として  $-2.0$ N の外力が  $0.1$ sec 間加えられた場合 ( $2.0$ N の力で後ろ向きに押された場合) の応答の例を示す. Fig. 4(a) は位相リセットありの場合, Fig. 4(b) は位相リセットなしの場合を示す. これらの結果により, 位相リセットが歩行の外乱に対するロバスト性に貢献していることが分かる.

#### 5. 実験

本節では Fig. 1 に示す 2 足歩行ロボットに提案する制御系を適用し, 実験によりその有効性および環境変化に対する歩行のロバスト性について示す. ロボットの全長は  $40$ cm, 重さは約  $3.4$ kg である. ロボットの運動はブームにより矢状面上に拘束されている. ロボットは足首関節を持たず, 足裏は円弧形状をしている. このため, システムは劣駆動 (underactuated) な系となり, 転倒せずに歩行を継続することは平面の足裏形状および足首関節を持った一般的な歩行ロボットと比較して困難であると考えられる. まず初めに, シミュレーションに用いたものと同じ人間の歩行軌道に基づく実験を行ったが, シミュレーションと比較して, 実験では脚の床 (カーペット) との衝突および足裏のこがり摩擦におけるエネルギーロスが大きいと考えられ, 前方への推進力が得られず, 歩行の実現には至らなかった. これは人間の歩行は足首関節による push-off により推進力を得て, 衝突におけるエネルギー減少分を補っているが, 本ロボットでは足首関節がないため, 腰および膝関節のみの運動ではこのような推進力が得られなかったものと考察される. そこで, 本実験では, state-machine に基づく歩行コントローラによって実際に実現された歩行軌道を模範軌道として, 提案する手法で学習を行い, ロボットの歩行実験を行った.

Fig. 5 にロボットの歩行の様子を示す. ここでは初期固有振動数を  $\omega = 5.71$ rad/s (周期  $1.1$ sec) とし, 提案する歩行周期の適応則を用いて振動数の更新を行った. また, 位相リセットに

$$\dot{\phi}_{ref} = \hat{\omega}^n + \delta(t - t_{heel\ strike})(\phi_{heel\ strike}^{robot} - \phi_{ref} + \alpha) \quad (10)$$

のようにオフセット  $\alpha = 0.8$ rad を持たせ, 脚接地時におけるタイミングの調整を経験的に行った.

また, 環境変化に対する歩行のロバスト性の検証として, 摩擦係数の異なる床の上およびシーソー状におかれた板の上を歩行させる実験を行った. Fig. 6 に摩擦係数の異なる床の上 (カーペット, コルクシート, アルミ板) の歩行実験の様子を示す. また, Fig. 7 に摩擦係数の異なる床の上 (カーペット, コルクシート) およびシーソー状に傾きが変化するように配置されたアルミ板の上を歩行させた実験の様子を示す. これらの結果より, 環境変化に対し, ロバストな歩行が実現できていることが分かる.

ここで, 本実験では state-machine コントローラによる実際のロボットの歩行軌道を模範軌道として学習し, 提案する手法で 2 足歩行を実現したが, 位相リセットを用いない場合には歩行を行うことができなかった. したがって, 環境からのフィードバックによる位相リセットが歩行の実現に重要な役割を果たしていると考えられる.

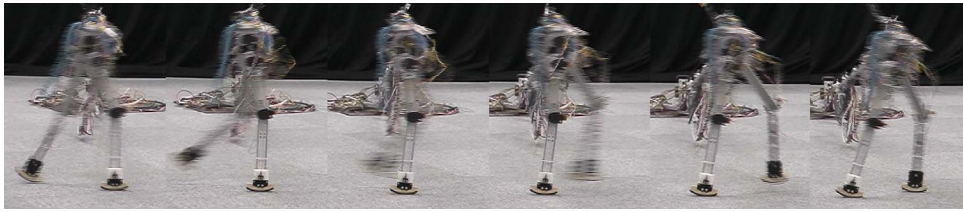


Fig. 5 Snapshots of a walking experiment on a flat surface (carpet) for a single step at 15 frames/sec (1 frame  $\approx$  66 msec)



Fig. 6 Snapshots of a walking experiment over surfaces with different friction properties.



Fig. 7 Snapshots of a walking experiment over surfaces with different friction properties and a seesaw-like metal plate with a slight change in the slope.

## 6. まとめ

本論文では、著者らが提案している周期運動プリミティブを2足歩行ロボットのCPGモデルとして用い、模範軌道より歩行運動を学習し、ロボットの運動生成を行う手法について述べた。数値シミュレーションにより外乱に対する位相リセットの有効性を示し、さらに、提案手法を用いて環境変化に対しロバストな2足歩行が実現できることを実験により示した。本論文では、位相リセットは脚接地時のみに行っているが、今後は、外乱が加えられた時点で、位相リセットを行い、転倒を防止するような手法を検討したいと考えている。また、本手法の多自由度系への拡張も検討する予定である。

## 謝辞

本研究の一部は通信総合研究所の委託研究、National Science Foundation grants (ECS-0325383, IIS-0312802, IIS-0082995, ECS-0326095, ANI-0224419)、NASA grant (AC#98-516)、AFOSR grant on Intelligent Control により実施したものである。

## 参考文献

- (1) Auke Ijspeert, Jun Nakanishi, and Stefan Schaal. Learning attractor landscapes for learning motor primitives. In S. Becker, S. Thrun, and K. Obermayer, editors, *Advances in Neural Information Processing Systems 15*, pp. 1547–1554. MIT-Press, 2003.
- (2) 中西淳, Auke Ijspeert, Stefan Schaal, Gordon Cheng. 運動学習プリミティブを用いたロボットの見える学習. 子情報通信学会技術研究報告, PRMU2003-136 NC2003-67, pp. 49–54, 2003.
- (3) 川人光男. 生体におけるリズム現象の工学的研究. 医用電子と生体工学, Vol. 19, No. 3, pp. 171–178, 1981.
- (4) 木村浩. 生物規範型歩行ロボット制御—筋骨格系と神経系とのカップリング—. 計測と制御, Vol. 40, No. 6, pp. 441–447, 2001.
- (5) Kiyoshi Matsuoka. Sustained oscillations generated by mutually inhibiting neurons with adaptation. *Biological Cybernetics*, Vol. 52, pp. 367–376, 1985.
- (6) E. Klavins and D. E. Koditschek. Phase regulation of decentralized cyclic robotic systems. *International Journal of Robotics Research*, Vol. 21, pp. 257–275, 2002.
- (7) Katsuyoshi Tsujita, Kazuo Tsuchiya, and Ahmet Onat. Adaptive gait pattern control of a quadruped locomotion robot. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2318–2325, 2001.
- (8) 伊藤聡, 湯浅秀男, 羅志偉, 伊藤正美, 柳原大. 環境の変化に適応する四足歩行ロボットシステム. 日本ロボット学会誌, Vol. 17, pp. 595–603, 1999.
- (9) Kazuo Tsuchiya, Shinya Aoi, and Katsuyoshi Tsujita. Locomotion control of a biped locomotion robot using nonlinear oscillators. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1745–1750, 2003.
- (10) Stefan Schaal. Is imitation learning the route to humanoid robots? *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 3, No. 6, pp. 233–242, 1999.
- (11) S. Schaal and C. G. Atkeson. Constructive incremental learning from only local information. *Neural Computation*, Vol. 10, No. 8, pp. 2047–2084, 1998.
- (12) Taiga Yamasaki, Taishin Nomura, and Shunsuke Sato. Possible functional roles of phase resetting during walking. *Biological Cybernetics*, Vol. 88, No. 6, pp. 468–496, 2003.