

床反力情報に基づいた平衡制御と歩行パターン生成器の オンラインリズム学習

伊藤 聡^{†,††a)} 阪 圭央[†] 川崎 晴久[†] 佐々木 実[†]

Balance Control and On-Line Learning of Rhythm Pattern Generator
in Biped Locomotion Based on Ground Reaction Forces

Satoshi ITO^{†,††a)}, Yoshihisa SAKA[†], Haruhisa KAWASAKI[†], and Minoru SASAKI[†]

あらまし 不確かな環境で歩行を行うためには、感覚情報のフィードバックにより運動を適応的に変化させ、その環境に合った運動パターンを生成しなければならない。しかし、運動生理学で発見された CPG (Central Pattern Generator) は、歩行リズムの生成が感覚情報なしでも行われることを示唆している。そこで本研究では歩行運動のパターン獲得に対し以下のようなシナリオを考えた。未知な環境で歩行を行うとき、感覚情報を利用する。しかし、環境が定常である場合、歩行を繰り返すことにより未知要因が既知となる。その結果、歩行運動は感覚情報に依存する割合が減少し、適切な運動パターンが内部に記憶される。最終的には、歩行リズム生成はフィードフォワード的に行われるようになる。本研究ではこのシナリオに基づいた歩行パターン内の形成の数理モデルを提案し、その挙動確認のシミュレーション結果を報告する。

キーワード 二足歩行系、平衡制御、床反力、歩行パターン生成器、学習

1. ま え が き

近年のロボット技術の発達で、ロボットは人間の日常生活に進出しようとしている。人間の生活環境は工場とは異なり、ロボットのために環境が整備されることはない。したがって、これまでのようにあらかじめ規定された環境条件ではなく、不確かさを含んだ環境条件での動作を考える必要が出てくる。不確かさを含む環境と相互作用を通じて情報のやり取りをし、ロボットの内部に必要な情報を知識として生成することで、環境に適した運動のパターンを獲得していく能力は、ロボットにおける知能の重要な一側面である [1], [2]。本論文では、このような運動における知能の一形態について、二足歩行運動を例題に考察する。

二足歩行系において平衡の維持は運動の制御上重要な課題である。不確かな環境で平衡を維持するには、感覚情報のフィードバックが必要である。もし環境条件が既知であれば、その環境に合った運動のパターンを計画することができる。しかし、環境に未知な要因が含まれる場合、環境からの情報を取り込み、それを解釈することによって運動を調節する必要が出てくる。動物の歩行運動の場合、伸張反射、屈曲反射、交叉性伸張反射などの反射系 [3] が、フィードバック情報による平衡維持を担当している。

一方、動物の歩行では、下位レベルの神経系に中枢パターン生成器 (Central Pattern Generator: CPG) [4] が存在し、その内因的な振動により歩行運動のリズムが生成される。もちろん、環境条件が変われば生成される歩行パターンも変化し、その過程には感覚情報のフィードバックが重要である。しかし、ある決まった定常的環境条件では動物は一定の歩行パターンを学習する [5]。この現象では、パターン生成器にリズムが記憶され、それを想起することでパターンが生まれると考えるのが自然である。想起されるパターンの選択にはフィードバック情報が必要かも知れないが、パ

[†] 岐阜大学工学部, 岐阜市

Faculty of Engineering, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu-shi, 501-1193 Japan

^{††} 理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター, 名古屋

Bio-mimetic control research center, RIKEN, Anagahora, Shimo-shidami, Moriyama-ku, Nagoya-shi, 463-0003 Japan

a) E-mail: satoshi@cc.gifu-u.ac.jp

ターンの生成 (fictive locomotion [3]) そのものは単なる記憶の想起過程となり、その意味でリズム生成がフィードフォワード的に行われると仮定できる。

それでは、フィードフォワード的に生成されるリズムはどのように学習され記憶されるのであろうか。この問題に対し、我々は以下のような一つのシナリオを考えた。不確かな環境で移動するには、最初は感覚情報のフィードバックが必要となるはずである。しかし、環境が不確かではあるが定常であるとき、その環境で歩行運動を行ううちに未知な定常的要因が既知となる。その結果、未知環境で平衡を維持して歩行する場合に必須であった感覚情報が不要となり、最終的には内因的な振動のみで生成されるリズムに従って歩行が行われるようになる^(注1)。本論文では、床反力のフィードバックに頼った平衡制御から歩行パターン生成器によるフィードフォワード的なリズムパターン生成への移行が学習による知能形成の一例と考える。

現在、歩行ロボットの分野では、運動パターンはZMP (Zero Moment Point) [6] を利用した軌道の計画によりあらかじめ計算しておく。つまり歩行パターンは事前に計画されるため、計算時に仮定した環境条件に不確かさや変化があった場合、用意した歩行パターンが適切でなくなることがある。そこで、ZMPを計測して運動を修正する方法 [7], [8]、時々刻々と路面状態を計測し各ステップごとに軌道を計画する方法 [9], [10] が提案されている。この場合、歩行パターンは記憶されるものではなく、その場限りで失われてしまう。したがって、環境条件に基づいた知識としてロボットの内部に蓄えられることはなく、その意味では知能が形成されているわけではない。

別のアプローチとして、CPG に対応する神経振動子をコントローラに埋め込み、ロボット本体の力学的ダイナミクスと神経振動子の振動リズムとの間の引込現象を利用する方法が提案されている [11], [12]。生成されるリミットサイクルの安定性は環境変化や不確かさを吸収するための有効な一方法である。しかし、コントローラに相当する神経振動子の結合重みは、設計者が試行錯誤的に設計する必要がある。環境との相互作用によって起こる内的な変化で表現されるものを知能と考えた場合、設計者が試行錯誤で決定した結合重みは知能として獲得されたものではない。CPG を構成する神経振動子ネットワークの重み決定に関しては、解析的な手法を導入して神経振動子の結合重みの決定を系統立てて行う試み [13] をはじめ、CPG 出力

を感覚情報へ指定位相で同期させるための学習 [14] や、Genetic Algorithm [15], [16]、べき級数展開に基づく摂動 [17]、見まね学習 [18]、強化学習 [19], [20] などを利用する様々な方法が提案されている。それぞれ安定な二足歩行を実現し、またそれらが直接設計者の手が入らない形で獲得されている点で、本論文で考える知能形成の一形態であると思なせる。しかし、CPG を利用した歩行運動でも ZMP 条件は必ず満たす必要がある、この情報を利用することが、二足歩行の運動パターンを効率的に獲得する一つの有効的な手法であると考ええる。

本論文では、上記のシナリオに従い、平衡を保ちながら歩行するために必要なリズムの学習に関する一モデルを提案する。このとき後述するように足部の2点接地を仮定し、その2点での床反力垂直成分の差を制御することで平衡維持を行う。その差を制御することは、床反力垂直成分の合力の変化が小さい場合、ZMP と等価な CoP (Center of Pressure: 床反力中心) [21] をフィードバック制御していることと等しい。すなわち、提案する手法は ZMP のフィードバックコントローラの出力を CPG にトルクパターンとして記憶させる一種の教師なし学習の枠組みであり、この点で上述の CPG 学習の研究 [14] ~ [20] と一線を画する。なお、着目するのは学習の過程であって、学習したパターンを環境に合わせてどう切り換えるか、その選択については考えない。

2. 平衡制御とトルクパターン学習の数理

環境に未知な要因が含まれる場合、その情報を何らかの形で検出する必要がある。立位姿勢維持の場合、有用な情報の一つは床反力である。例えばその作用中心 CoP は、歩行ロボットの分野での平衡制御に一般的に用いられる ZMP と一致し [21]、平衡に関する有効な指標となっている [22]。

このような観点から、我々は床反力の情報に基づいた足関節による立位姿勢の制御について考察してきた [24], [25]。本論文ではそれらの方法をリズムの学習に応用し、平衡を保ちながら歩行できる歩行パターンをトルクパターンとしてパターン生成器に記憶させることを考える。そのため、本章の残りでは、この制御法・学習法に関して述べることにする。

(注1): CPG の生成するリズムは感覚情報の修飾を受けるため、実際の動物の歩行では内因的な振動のみで歩行が行われるという本論文での仮説には、解釈に飛躍があることを述べておく。

2.1 一定外力下での平衡制御 [24]

環境条件の不確かさとして、大きさや方向が未知の一定外力がかかる状況を考える．この設定は、傾斜角度が未知の斜面での平衡制御と同じ枠組みで扱える．

立位平衡制御のモデルとして、図 1(a) に示す足部と胴部からなる 2 リンク系を考える．足部は、足関節の位置が十分低く、前後に対称な形状をもち、爪先と踵の 2 点で接地すると仮定する．転倒しない場合は足部は運動しないとみなせ、唯一運動ができる胴部の運動方程式は

$$\begin{aligned} I\ddot{\theta} &= MLg \sin \theta + F_x L \cos \theta - F_y L \sin \theta + \tau, \\ &= AL \sin(\theta - \theta_f) + \tau \end{aligned} \quad (1)$$

のように表せる．ここで、 M は胴部の質量、 I は足関節回りの胴部の慣性モーメント、 L は足関節から胴部重心間の距離、 θ は胴部の鉛直方向からの変位、 τ は足関節トルク、 g は重力加速度、 F_x 及び F_y は未知外力を表し、 A 、 θ_f は以下の式を満たす変数である．

$$A = \sqrt{(Mg - F_y)^2 + F_x^2} \quad (2)$$

$$\sin \theta_f = -\frac{F_x}{A}, \quad \cos \theta_f = \frac{Mg - F_y}{A} \quad (3)$$

また、足関節トルクと二つの接地点における床反力の垂直成分 F_H 、 F_T との関係は、

$$F_H = \frac{1}{2\ell} \tau + \frac{1}{2} mg + \frac{1}{2} f_y \quad (4)$$

$$F_T = -\frac{1}{2\ell} \tau + \frac{1}{2} mg + \frac{1}{2} f_y \quad (5)$$

で与えられる． ℓ は足関節から足部先端までの距離、

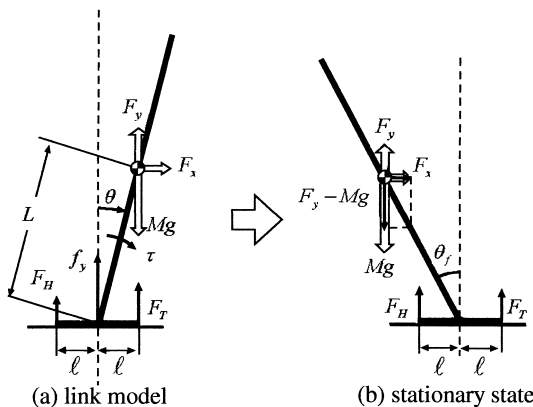


図 1 立位平衡の 2 リンクモデルと式 (7) による平衡状態

Fig. 1 Model for standing posture control and stationary state by control law (7).

m は足部の質量、 f_y は上体から作用する力で

$$f_y = -ML\ddot{\theta} \sin \theta - ML\dot{\theta}^2 \cos \theta + Mg - F_y \quad (6)$$

である．

ここで、胴部に働く外力 F_x 、 F_y は一定であると仮定する．以上のような条件に対し、自重が踵と爪先に均等にかかる $F_H = F_T$ となる状態を実現するよう足関節トルク τ を以下の式で与える^(注2)．

$$\tau = -K_d \dot{\theta} - K_p \theta + K_f \int (F_H - F_T) dt \quad (7)$$

このとき、図 1(b) のように外力と重力が釣り合うような姿勢、すなわち $\theta = \theta_f$ が定常状態となり、その安定性は条件

$$K_p > AL > 0 \quad (8)$$

$$\frac{\ell}{I} K_d > K_f > 0 \quad (9)$$

$$(K_d \ell - K_f I) K_p > K_d \ell AL \quad (10)$$

が満たされるようにフィードバックゲイン K_d 、 K_p 及び K_f を選ぶことで局所的に保証される．

2.2 未知周期外力に対する平衡制御とトルクパターン学習 [25]

前節では、環境の定常性条件として一定の外力を考えた．次に、同じ定常性でもダイナミクスをもつ周期的な外力に環境条件を拡張することを考える．ここでは更に簡単な場合として、周期的外力の周期は既知であることを仮定する．

前節の制御の特徴は以下の 3 点にまとめられる．

- 定常状態では重力と外力の作るモーメント同士が釣り合うため、足関節のトルクは零となる．これは定常状態の姿勢が外力に合わせて変化することを暗に意味する．
- 床反力が制御の本質的な情報である．

(注2): 文献 [24] 及び関連の文献 [25] では、(7) を $\tau = -K_d \dot{\theta} - K_p(\theta - \theta_d) + K_f \int (F_H - F_T) dt$ としているが、本論文ではこの式で $\theta_d = 0$ として話を進める． θ_d は実現されるダイナミクスの過渡特性には影響を与えるが、定常状態には影響を与えない．以下では定常状態を議論するので、数式展開を簡単にするため、直接関係のパラメータ θ_d は 0 とおいた．もちろん、過渡特性も考慮すれば、 θ_d を適切に選ぶことが望ましい．しかし、 θ_d の設定には環境条件が分かっていることが難しいこと、また、通常の条件として考える平地での平衡制御の場合には足関節角度 θ がおおよそ 0 である場合が多く、その場合に過渡特性を良くするには $\theta_d = 0$ とすべきであること、また歩行運動に対してもその運動の対称性 [23] を考えても、以下での $\theta_d = 0$ とおくことは無理な仮定ではないと考える．また、 $\theta_d = 0$ が特別な条件ではなく、この仮定により一般性が失われることもない．

• 最初は未知であった環境条件すなわち外力の大きさが、定常状態での足関節角度を計測することで既知となる。

定常な環境下で繰返し運動を行うと、未知であった情報が既知となる。環境に変化がなければ、次に同じ運動をする場合にはこの情報が利用できる。定常な外力下での立位平衡制御の場合、不確かな環境条件下で平衡をとるためには欠かせなかった床反力情報を用いることなく転倒しにくい姿勢が実現できることになる。前節の場合では、外力と重力が釣り合う姿勢を最初からとれることに対応する。

そこで、周期外力下においても、運動を通し未知な環境条件を既知にすることで、床反力フィードバックを用いることなく平衡維持ができるようになる状況を実現する。そのため、足関節トルクを周期的外力に対するフィードフォワード的な補償項と前節に示した床反力情報を含むフィードバック項の和として、

$$\tau = [F.F] + \left[-K_d \dot{\theta} - K_p \theta + K_f \int (F_H - F_T) dt \right] \quad (11)$$

のように構成し、(11)の第2項が零となるように第1項を学習する手法をとる。フィードフォワード的な補償項は、未知な周期外力を推定することによって構成していく。本論文では、外力の周期 T_e は既知と仮定している。この仮定のもとでは、外力はその周期を基本周期とする三角関数でフーリエ級数展開できる。

$$F_x = \sum_k^n \left(\alpha_k^{(x)} S_k + \beta_k^{(x)} C_k \right) \quad (12)$$

$$F_y = \sum_k^n \left(\alpha_k^{(y)} S_k + \beta_k^{(y)} C_k \right) \quad (13)$$

ここで、 $S_k = \sin k\omega_e t$, $C_k = \cos k\omega_e t$, $\omega_e = 2\pi/T_e$ である。(12), (13)を(1)に代入すると

$$\begin{aligned} I\ddot{\theta} - MLgS - \sum_k^n \left(\alpha_k^{(x)} S_k + \beta_k^{(x)} C_k \right) LC \\ + \sum_k^n \left(\alpha_k^{(y)} S_k + \beta_k^{(y)} C_k \right) LS \\ = \tau \end{aligned} \quad (14)$$

となる。ここで $C = \cos \theta$, $S = \sin \theta$ である。左辺は

$$Y\sigma = \tau \quad (15)$$

$$Y = \left[\ddot{\theta}, S, S_0C, C_0C, S_0S, C_0S, \dots, S_nC, C_nC, S_nS, C_nS \right] \quad (16)$$

$$\sigma = \left[I, -Mg, -L\alpha_0^{(x)}, -L\beta_0^{(x)}, L\alpha_0^{(y)}, L\beta_0^{(y)}, \dots, -L\alpha_n^{(x)}, -L\beta_n^{(x)}, L\alpha_n^{(y)}, L\beta_n^{(y)} \right]^T \quad (17)$$

のように未知パラメータ σ に関し線形で記述できる。上式に対し、 σ より新たに未知パラメータ ϕ を

$$\phi = K_I \sigma \quad (18)$$

$$K_I = \frac{K_d \ell}{K_d \ell - K_f I} \quad (19)$$

のように定義し、その推定値 $\hat{\phi}$ を用いて以下のように制御法を与える。

$$\tau = Y_r \hat{\phi} - K_d s \quad (20)$$

$$Y_r = \left[\dot{\theta}_r, S, S_0C, C_0C, S_0S, C_0S, \dots, S_nC, C_nC, S_nS, C_nS \right] \quad (21)$$

$$\dot{\theta}_r = -\frac{K_p}{K_d} \theta \quad (22)$$

$$s = \dot{\theta} - \dot{\theta}_r - \frac{K_f}{K_d} \tau_f \quad (23)$$

$$\tau_f = \int (F_H - F_T) dt \quad (24)$$

また、未知パラメータ ϕ の推定に相当する学習のダイナミクスを

$$\dot{\hat{\phi}} = -\Gamma Y_r^T s \quad (25)$$

と定義する。ここで Γ は正定な対角行列である。(20)の右辺第1項は床反力のフィードバックを含んでいないこと、また第2項 $-K_d s$ は(11)の右辺と等しいことに注意する。

以上の定式化において、以下のような仮定を設ける。

A1: 周期外力は有界で微分可能である。

A2: 初期状態において $\hat{\phi}(0) = 0$ である。

A3: 学習なしで制御法を適用したとき、周期外力により転倒すなわち足部の回転が起きない。

A4: 仮定 A3のもとで学習を加えても転倒は起きない。

これらの仮定のもとで、以下の命題が示せる。

P1: 床反力のフィードバックを含む第2項の大きさが、学習により0に減少する。

P2: 学習がない場合とそれが収束した場合とにおいて、周期外力に対する足関節のトルク軌道が、 $K_f \gg \ell$

で同一とみなせる．

前者は $V = \frac{1}{2}K_I s^2 + \frac{1}{2}\bar{\phi}^T \Gamma^{-1} \bar{\phi}$ ($\bar{\phi} = \hat{\phi} - \phi$) をリヤプノフ関数の候補として Lyapunov like lemma [26] を適用することにより，また後者は直立状態近傍で線形化し外力から足関節トルクまでの伝達関数を考えることにより示せる．

これにより以下のような過程が実現される．仮定 A2 より，最初は足関節トルクは第 2 項のみで生成されている．転倒が起きず学習が進む場合，命題 P1 によりその第 2 項は零に収束していく．しかし，全体としてのトルク出力は命題 P2 により変化しない．したがって，学習前に第 2 項で生成されていたトルクパターンが学習によりそのまま第 1 項にコピーされることになる．第 1 項は，床反力情報を含んでいない．よって，足関節トルクの生成原理が，床反力フィードバックに基づいたものから，床反力の情報を用いないという意味でフィードフォワード的なものに質的に移行することになる．

3. 運動を通した歩行パターンの学習

前章では，未知外力に対する立位平衡制御とトルクパターンの学習に関してレビューした．本章ではこれを応用し，歩行パターンの学習を目指す．

3.1 構 想

歩行においては，2 種類の制御が重要と考える．それは軌道追従制御と平衡制御である．軌道追従は，上体の姿勢や遊脚の接地場所など目標位置が定められる自由度に対する制御である．一方，平衡制御は ZMP が足底内部に納まり足部が回転しないという意味での動的平衡の維持である．

軌道追従制御を行う運動自由度に関し，その目標軌道，例えば上体の姿勢や遊脚位置などは，事前に計画されていると仮定する．これらの軌道が実現された場合に生じる慣性力は，歩行系の平衡を乱す力として働く．慣性力は軌道が分かれば運動方程式より計算することができ，その情報をもとに平衡維持を達成するのが現在の歩行ロボット制御で用いられている ZMP 規範である．

しかし，ここでは動力学に基づいて慣性力を計算するのではなく，それを未知外力とみなすアプローチをとる．軌道が与えられているわけであるからその慣性力が働く期間は既知であり，それらは歩行周期ごとに繰り返される．したがって，周期が既知の未知周期外力として扱え，平衡制御に関しては前章の枠組みが利

用できる．このとき平衡維持を達成するトルク軌道を歩行パターンとして学習する．なお，歩行運動の周期性に着目し，軌道をフーリエ級数展開して表現する手法は，文献 [27], [28] でも見られる．

3.2 制御系の構成

前節の手法に従い，足関節トルクを平衡制御に利用する．図 2(b) に示すように，運動による足関節周りの慣性モーメントの変化は少ないと仮定して，支持脚と上体をまとめて 1 リンクとみなしたものを図 1 の胴部と考える．

歩行系の内部には歩行パターン生成器を構成する振動子 (CPG) を仮定する．これは (16) の正弦・余弦関数に相当する．その生成する周期パターンの重み付け和により足関節のトルクパターンが運動を通して内的に生成される．学習はその重みを運動しながら獲得することにほかならない．

制御はリンク系ダイナミクスの力学的性質の違いに基づき，図 3 に示すように，脚を前方に振り出す相 (以降，脚振り出し相と呼ぶ)，転倒相，両脚支持相の三つの相に分けて行う．

脚振り出し相では，遊脚・支持脚それぞれの股関節・膝関節は，軌道追従制御を行う．単脚支持期開始の姿勢及び脚を前方に振り出した姿勢をあらかじめ設定し，それらの間を決められた時間間隔 T_e で補間することにより目標軌道を作成する．その間支持脚の足関節で平衡制御を行う．

T_e 時間後，転倒相に移行する．前相の制御により，全体重心は足関節より前方にくる．その状態で，姿勢を維持しながら足関節トルクを零にすると前方に転倒を起こす．遊脚が接地すると両脚支持期に移行する．

両脚支持期間では一定の時間 T_D の間，股・膝関節

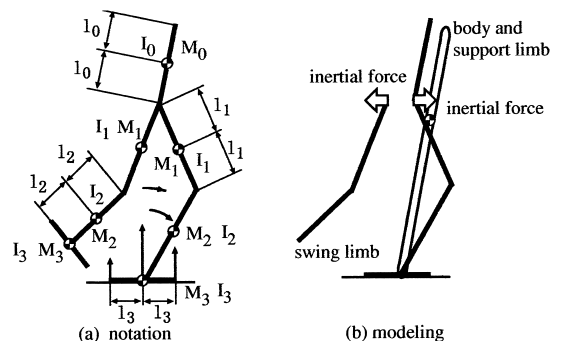


図 2 二足歩行系のリンクモデル
Fig. 2 A link model for biped locomotion.

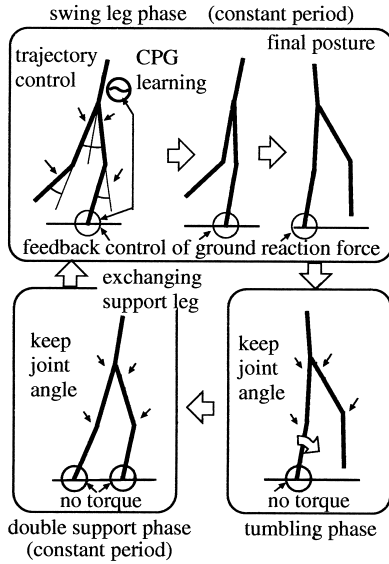


図3 制御方法
Fig. 3 Control scheme.

を固定し姿勢を整える。しかし、多くの場合、転倒の勢いで後脚が地面から離れる。その場合、そのまま支持脚を交換し、脚振出し相に戻って、再び同じ動作を繰り返す。

3.3 トルクパターンの学習

歩行時に重要な軌道への追従と平衡の維持のうち、環境の変化により歩行系の振舞いに重要な影響を受けるのは平衡の維持である。確かに地形の変化により遊脚の次の接地場所を適応的に選ぶ必要がある。しかし、それには視覚などの事前情報が必要であり、今回のような視覚系を仮定しないモデルでは対処できない。したがって、本論文では軌道追従制御の目標軌道を環境条件に合わせて調節することは考えない。ここで問題とするのは、平衡制御における環境適応に限定する。平衡制御は足関節の自由度で行っているため、足関節のトルクパターンを学習することが目的となる。

足関節トルクは転倒相及び両脚支持相では零としている。したがって、脚振出し相のトルク軌道が分かれば、歩行1周期ひいては歩行運動全体にわたり、その出力パターンが分かることになる。脚振出し相は、その時間が T_e と確定しており、平衡制御には 2.2 の床反力フィードバックを用いる方法を採用しているため、同じ方法でその出力パターンが学習できる。学習結果は歩行パターン生成器を構成する振動子の結合重みとして記憶される。

4. シミュレーション

4.1 条件設定

水平な床面での歩行を考える。歩行系は上体1リンクと各脚3リンクの7リンクモデルとする(図2(a))。しかし、数値計算を簡単にするため、足部の質量はほかに比べて軽く無視できると仮定し、実質5リンクモデルでシミュレーションを行う。各部のパラメータは左右対称でそれぞれ $M_0 = 2.5$, $M_1 = 1.5$, $M_2 = 1.0$, $M_3 = 0.0$, $l_0 = 0.06$, $l_1 = 0.08$, $l_2 = 0.08$, $l_3 = 0.05$, $I_i = M_i l_i^2 / 3$ である。これらのパラメータは研究室で設計した歩行ロボットのパラメータに基づいている。

以下のシミュレーションでは、脚振出し相の時間 $T_e = 1.0$ とした。股・膝関節制御の関節位置・速度フィードバックゲインはそれぞれ $K = 100$, $D = 10$ とした。また、足関節の制御では各ゲインはそれぞれ $K_d = 14$, $K_p = 80$, $K_f = 0.12$, CPGは周期 T_e の正弦波とその高調波 $\sin(2n\pi t/T_e)$, $\cos(2n\pi t/T_e)$, ($n = 0, \dots, 25$) で構成し、学習速度を調節するパラメータは $\Gamma = \text{diag}[50, \dots, 50]$ とした。床との接触は、床をばね-ダンパモデルで記述することによって表現する。床の粘性・弾性係数はそれぞれ $D_g = 500$, $K_g = 50000$ とした。数値計算には、ステップサイズ 0.001 の四次のルンゲ・クッタ法を用いる。

本論文では、定常的な環境条件に対して、それに合った運動パターンが学習されると考えてきた。定常性を表現できる環境条件として、ここでは一定の大きさの未知外力が加わる場合を考える。外力は各リンクの重心に

$$F_x = -M_i g \sin \alpha \quad (26)$$

$$F_y = M_i g (1 - \cos \alpha) \quad (27)$$

の力をそれぞれ水平、鉛直方向に与える。この外力は、傾斜角度 α の斜面で作用する重力の作用と等価である。

シミュレーションの初期値として、各リンクの鉛直方向からの傾斜を胴部 $q_0(0) = 0.18$, 支持脚大腿部 $q_1^{(sp)}(0) = -0.02$, 支持脚小腿部 $q_2^{(sp)}(0) = 0.18$, 遊脚大腿部 $q_1^{(sw)}(0) = 0.28$, 遊脚小腿部 $q_2^{(sw)}(0) = 0.38$ (リンク上部が前方に傾斜する方向が正), 未知パラメータ $\hat{\phi}(0) = 0$, CPGを構成する振動子の位相は脚振出し相の開始時ごとに0にリセットした。なお、リンクモデルの初期値は、転倒相及び両脚支持相での

姿勢を与えている。

4.2 床反力フィードバックの効果

外力が働かないとき ($\alpha = 0$) と一定未知外力が定期的に作用するとき ($\alpha = 0.053$) を設定し、それぞれについて床反力フィードバックがある場合 $K_f = 0.12$ とない場合 $K_f = 0$ を比較する。腰・膝関節の軌道が

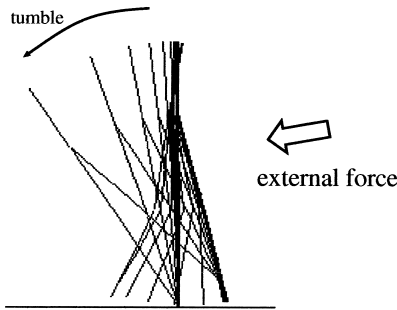


図 4 外力による転倒の様子
Fig. 4 Tumbling by external force.

適切に設定されると、 $\alpha = 0$ では両者とも歩行を継続できる。ところが $\alpha = 0.053$ というわずかな外乱でさえ、床反力フィードバックがない場合は、前方からの外力の影響で重心が足関節のちょうど真上に存在する不安定平衡点を越えられず、後方に転倒する (図 4)。もちろん足関節も軌道計画を行えば転倒を防ぐことができる。しかし、その場合は環境条件が変化すると軌道計画を強いられることになる。一方、床反力フィードバックを導入すると、外力に抗するように足関節トルクが働き、重心が不安定平衡点を越え前方に転倒し歩行が継続される (次節参照)。

4.3 歩行パターンの学習

まず、外力が働かない水平な床面でのシミュレーションを行った。時刻 $t < 0.1$ で姿勢を一定に保ち平衡を維持した後、あらかじめ設定した軌道に従い脚を動かす。図 5 に示すように、1 歩目は先行する転倒相が存在しないため、そこで得られる運動量を利用することができず定常状態とは多少異なる動きを示し、2 歩目

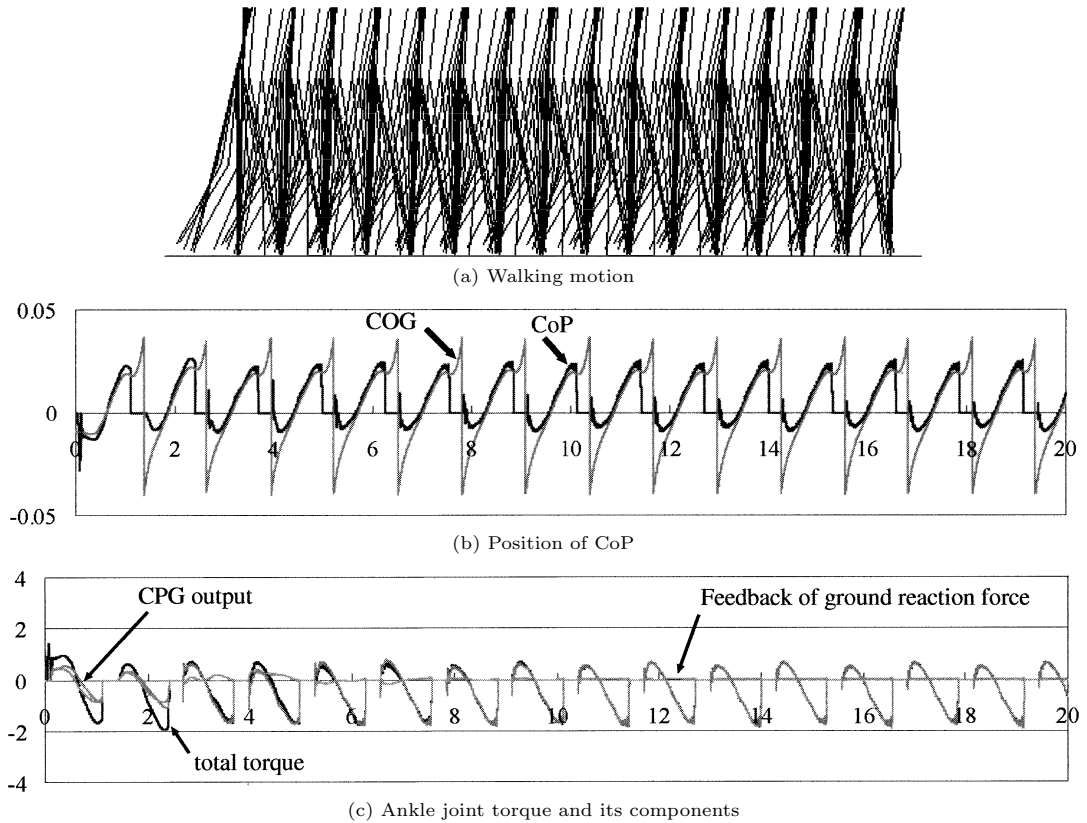


図 5 外力が働かない状況での歩行運動のシミュレーション
Fig. 5 Simulation of walking motion without external force.

もその影響がわずかに残るが、3歩目以降からはほぼ定常的な歩行が観察できる。図5(a)に歩行の様子を示す。図5(b)はCoPすなわちZMPの位置の変化を示す。足部の大きさは前後に長さ $l_3 = 0.05$ であり、CoPはその範囲内に収まり転倒が起きないことが分かる。図5(c)は、そのときの支持脚足関節トルクとその成分を示す。歩行が進むにつれて床反力フィードバックの成分が減少し、CPG出力で足関節トルクが構成されていくことが分かる。

次に、歩行を開始して3.0後に α を0から0.053に変化させて定常的な外力を働かせた。その結果を図6に示す。定常的な外力が加わるまでに1歩目が終わるため、初期状態から最初の定常状態への過渡状態は同じである。外力が定常的に働きだしてからは、3歩ほどで定常的な歩行に移行する。図5と同様、歩行の様子を(a)に、CoPの変化を(b)に、支持脚足関節トルクとその成分を(c)に示す。定常的な外力の影響で転倒相にかかる時間が変化し、その影響で歩行周期が

変わるため、同じシミュレーション時間内での歩数は図5(a)より減少している。CoPの軌道は ± 0.05 内に収まり、転倒が起きていないことが分かる。図6(c)の足関節トルクパターンは、外力の影響で図5(c)と異なったものとなる。しかし、図5のシミュレーションと同じパラメータ設定にもかかわらず、異なったトルクパターンが歩行パターン生成器に学習されていくことが分かる。

本シミュレーションでは、 $K_f = 0.12$ 、足部の長さ $l_3 = 0.05$ であるため、2.2のP2を満たすべき仮定($K_f \gg l$)が成り立たない。よって、図5(c)でも分かるように、学習の前後により足関節のトルクパターンに変化が生じてしまった。したがって、2.2で述べたように床反力フィードバックコントローラの出力がCPGにそのままコピーされることは実現できなかったが、CPGの出力のみでの歩行には成功した。

なお、以上の結果は実現された歩行が静歩行であることを意味している。しかし、CoPの軌道を見ると足

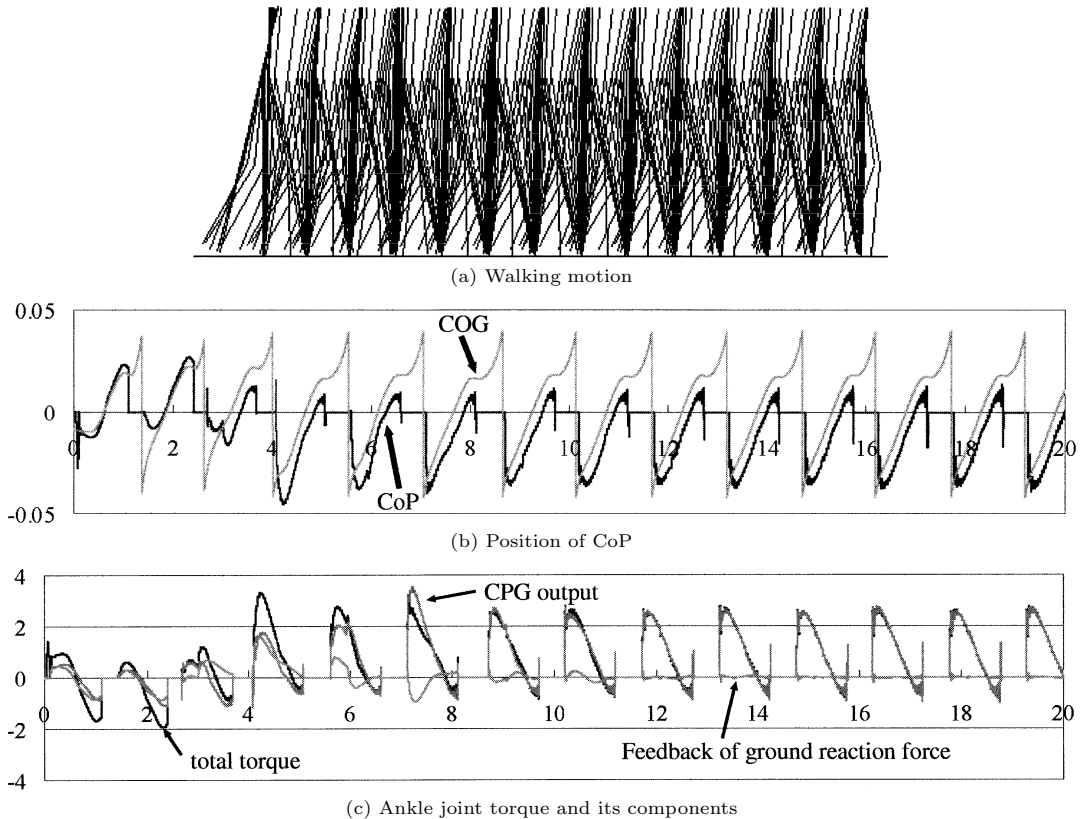


図6 一定外力下での歩行運動のシミュレーション
Fig. 6 Simulation of walking motion with constant external force.

部の長さをもう少し短くすることができ、その長さ次第では歩行 [6], [29] となり得る。

5. む す び

平衡制御を行いながら、歩行パターンすなわち平衡維持を可能とするトルク軌道を学習する方法について検討してきた。未知周期外力に対する平衡制御法で提案した方法をそのまま応用したため、平衡の制御に足関節トルクを利用した。しかし、足関節トルクには生成できるトルクに上限があり、上体や遊脚などの軌道の調節でしか補償できない状況もある。今後は足関節以外の自由度での定式化を試みていきたい。また、シミュレーションでは実機のパラメータを使用しているが、実機を使った実験は三次元空間で行われることもあり、まだ行っていない。今後、実験的検証を目指すとともに、CPG に基づいた歩行制御の本来の利点である引込現象を取り入れる方法についても検討していきたい。

謝辞 本研究の一部は平成 15 年度岐阜大学活性化研究費、小川科学技術財団の補助を受けた。

文 献

- [1] R. Pfeifer, C. Scheier (著) 石黒章夫, 小林 宏, 細田耕 (監訳), 知の創成, 身体性認知科学への招待, 共立出版, 2001.
- [2] 浅間 一, 矢野雅文, 土屋和雄, 伊藤宏司, 高草木薫, 神崎亮平, 青沼仁志, 太田 順, 石黒章夫, 移動知発現のシステム原理, 第 16 回自律分散システム・シンポジウム資料, 計測自動制御学会, pp.1-4, 2004.
- [3] 西野仁雄, 柳原 大, 運動の神経生理学, NAP, 2000.
- [4] S. Grillner, "Locomotion in vertebrates," *Phys. Rev.*, vol.55, no.2 pp.247-304, 1975.
- [5] D. Yanagihara, M. Udo, I. Kondo, and T. Yoshida, "A new learning paradigm: Adaptive changes in inter limb coordination during perturbed locomotion in decerebrate cats," *Neuroscience Research*, vol.18, pp.241-244, 1993.
- [6] M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla, and D. Stokic, *Biped Locomotion, Scientific Fundamentals of Robotics 7*, Springer-Verlag, 1989.
- [7] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka, "The development of Honda humanoid robot," *Proc. 1998 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1321-1326, 1998.
- [8] Q. Huang, K. Kaneko, K. Yokoi, S. Kajita, T. Kotoku, N. Koyachi, H. Arai, N. Inamura, K. Komoriya, and K. Tanie, "Balance control of a biped robot combining off-line pattern with realtime modification," *Proc. 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.3346-3352, 2000.
- [9] 梶田秀司, 谷 和男, "凹凸路面における動的 2 足歩行の制御について," 計測自動制御学会論文集, vol.27, no.2, pp.177-184, 1991.
- [10] K. Nishiwaki, S. Kagami, Y. Kuniyoshi, M. Inaba, and H. Inoue, "Online generation of humanoid walking motion based on a fast generation method of motion pattern that follows desired ZMP," *Proc. 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.2684-2689, 2002.
- [11] G. Taga, "A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion," *Biol. Cybern.*, vol.73, pp.97-111, 1995.
- [12] 宮腰清一, 多賀蔵太郎, 國吉康夫, 長久保晶彦, "神経振動子を用いた三次元 2 足足踏みシミュレーション," *日本ロボット学会誌*, vol.18, no.1, pp.87-93, 2000.
- [13] 片山 修, 北村新三, "神経振動子を用いた 2 足歩行運動生成への記述関数法の適用," 計測自動制御学会論文集, vol.34, no.7, pp.830-835, 1998.
- [14] K. Doya and S. Yoshizawa, "Adaptive synchronization of neural and physical oscillators," *Advanced in Neural Information Processing Systems*, vol.4, pp.109-116, Morgan, Kaufmann Pub., 1992.
- [15] 長谷和徳, 山崎信寿, "神経振動子と遺伝的アルゴリズムを用いた実 2 足歩行類似運動の生成," 計測自動制御学会論文集, vol.33, no.5, pp.448-454, 1997.
- [16] N. Ogihara and N. Yamazaki, "Generation of human bipedal locomotion by a bio-mimetic neuro-musculo-skeletal model," *Biol. Cybern.*, vol.84, pp.1-11, 2001.
- [17] F. Nagashima, "A motion learning method using CPG/NP," *Proc. 2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, ThP-II-3 (CD-ROM)*, 2003.
- [18] 中西 淳, A.J. Ijspeert, S. Schaal, and G. Cheng, "運動学習プリミティブを用いたロボットの見まね学習," *日本ロボット学会誌*, vol.22, no.2, pp.165-170, 2004.
- [19] 中村 泰, 佐藤雅昭, 石井 信, "神経振動子ネットワークを用いたリズム運動に対する強化学習法," *信学論 (D-II)*, vol.J87-D-II, no.3, pp.893-902, March 2004.
- [20] 松原崇充, 森本 淳, 中西 淳, 佐藤雅昭, 銅谷賢治, "2 足歩行運動のための動的行動則の獲得," *日本機械学会ロボットクス・メカトロニクス講演会*, 1A1-L1-51 (CD-ROM), 2004.
- [21] A. Goswami, "Postural stability of biped robots and the foot-rotation indicator (FRI) point," *Int. J. Robot. Res.*, vol.18, no.6, pp.523-533, 1999.
- [22] 日本平衡神経科学会 (編), 平衡機能検査の手引, 南山堂, 1976.
- [23] M.H. Raibert, *Legged lobot that balance*, MIT Press, 1986.
- [24] 伊藤 聡, 西垣智啓, 川崎晴久, "床反力に基づいた一定外力場での起立姿勢に対する制御法," 計測自動制御学会論文集, vol.38, no.1, pp.79-86, 2002.
- [25] 伊藤 聡, 川崎晴久, "周期外力下の立位平衡制御におけるトルクパターンの内的生成," 計測自動制御学会論文集, vol.40, no.3, pp.346-352, 2004.
- [26] J.-J.E. Slotine and W.P. Li, *Applied Nonlinear Con-*

trol, Prentice Hall, 1991.

- [27] 高西淳夫, “上体の運動によりモーメントを補償する 2 足歩行ロボット,” 日本ロボット学会誌, vol.11, no.3, pp.348–353, 1993.
- [28] K. Tsuchiya, K. Tsujita, and Y. Kawano, “A study on optimal motion of a biped locomotion machine,” Artificial Life and Robotics 3, pp.55–60, Springer Verlag, 1999.
- [29] 佐野明人, “重力場を巧みに利用した動的 2 足歩行,” 日本ロボット学会誌, vol.11, no.3, pp.354–359, 1993.
(平成 16 年 6 月 7 日受付, 8 月 9 日再受付)



佐々木 実

1985 東北大・工・機械工学博士課程了。同年東北大学工学部助手。1988 宮城工業高等専門学校講師。1990 カリフォルニア大学ロサンゼルス校客員教授。1993 岐阜大学工学部助教授, 2003 同教授。現在に至る。分布定数系の制御, 柔軟系のインテリジェント運動制御に関する研究に従事。工博。日本機械学会, 計測自動制御学会, 日本ロボット学会, IEEE, ASME 等各会員。



伊藤 聡 (正員)

1991 名大・工・情報工卒。1993 同大学院工学研究科情報工学専攻博士課程前期課程了。1994 より理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センターに勤務。1999 岐阜大学工学部助手, 2004 同助教授, 現在に至る。工博。計測自動制御学会, 日本ロボット学会, IEEE 等各会員。



阪 圭央

2002 岐阜大・工卒, 2004 同大学院工学研究科博士前期課程了。現在, セイコーエプソン(株)に勤務。



川崎 晴久

1974 名古屋大大学院工学研究科修士課程了, 同年日本電信電話公社(現 NTT)入社, 1990 金沢工業大学教授。1994 年 8 月より岐阜大学工学部教授, 現在に至る。ロボット制御, パーチャルリアリティ応用ロボティクスなどの研究に従事。日本ロボット学会, 日本機械学会, 日本バーチャルリアリティ学会, IEEE 等各会員。工博。