

## 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<sup>†</sup>

伊藤 聡<sup>\*,\*\*</sup>・川崎 晴久<sup>\*</sup>

Internal Torque-Pattern Generation in Upright Posture Control under Periodic External Forces<sup>†</sup>

Satoshi ITO<sup>\*,\*\*</sup> and Haruhisa KAWASAKI<sup>\*</sup>

In this paper, we present a control method of upright posture under unknown periodic external forces assuming that its period is only known. In order to maintain the upright posture in unknown environment, the information of the ground reaction forces are essential. However, being exposed to the stationary environment providing the external force periodically, the regularity in it is learned, and the unknown factors are clarified using adaptation dynamics. Consequently, the balance maintenance is achieved without feedback of ground reaction forces, and the torque pattern is internally generated to control the balance in the feedforward manner.

**Key Words:** balance control, ground reaction forces, periodic external forces, adaptive learning, internal pattern generation

### 1. はじめに

平衡制御は歩行時に必要な基本的制御の一つである。環境が既知な場合、たとえば外乱のない水平な床面での静的立位制御では、全体の重心が足底の真上にくるような姿勢をあらかじめ指定できる。そして、その姿勢を目標値とするような位置の制御を行えば転倒は防止できる。しかし、環境に未知な要因が含まれる場合、あるいは環境に変動が起きる場合には、平衡が保たれる姿勢を前もって指定できない。また、制御則にロバスト性を持たせたとしても、ノミナルな環境条件で設計した目標姿勢では必ずしも転倒せず姿勢を維持できるとは限らない。平らな机の上では安定に立っている電気スタンドが、机を傾斜させると転倒するのがよい例である。これに対して動物は、環境の条件に合わせて運動のパターンを変化させることができる。上述の場合、人間は傾斜にあわせて重心の位置を変えることができ、その能力により転倒を起りにくくしている。

このような適応的な振る舞いを実現するには、変化する環境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、有用な環境情報を含むものの一つは床反力で

ある。たとえばその作用中心 (Center of Pressure:CoP) は、平衡に関する有効な指標となる。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 (Zero Moment Point)<sup>1)</sup> と一致し<sup>2)</sup>、また医療分野でも平衡機能の検査がその動揺により評価されている<sup>3)</sup>。

このような観点から、われわれは床反力の情報に基づいた足関節による直立姿勢の制御法を提案してきた<sup>4),5)</sup>。その制御法では、一定の外力がはたらく環境において、その一定外力と重力の合力方向を向くような上体姿勢が局所安定な定常状態として実現される。これは、定常状態が外力によって変化すること、外力と重力の釣り合いより定常状態では足関節のトルクが零となることを暗に意味している。

われわれはこの方法を拡張し、動的平衡のとれる歩行運動パターン計画に応用することを目指している。ロボットに歩行を行なわせるとき、平衡のとれた歩行を可能とする運動パターンを、歩行パターンとしてあらかじめ記憶させる。この場合の平衡制御は、事前に運動パターンが計算されるという意味でフィードフォワード的であるといえる。しかし、フィードフォワード的な平衡制御では、環境に未知な要因が含まれる場合は歩行が達成できない。ところが、路面の状況など、実際に歩行することによって、未知から既知となる要因がある。運動を通して得られるこれらの情報をうまく活用できれば、環境に応じた歩行パターンを環境情報に基づいて学習し、生成できると考えられる。

平衡維持が可能な運動パターンを環境情報に基づいて内的に生成するという観点から、本稿では立位平衡制御において、環境条件すなわち外力を周期的なものに拡張することを考える。歩行は周期運動であるので、慣性力など平衡を

<sup>†</sup> SICE Annual Conference in Fukui 2003 で発表 (2003・8)

<sup>\*</sup> 岐阜大学工学部 岐阜市柳戸 1-1

<sup>\*\*</sup> 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  
名古屋守山区下志段味ヶ洞

<sup>\*</sup> Faculty of Engineering, Gifu University, Yanagido 1-1, Gifu

<sup>\*\*</sup> Bio-Mimetic Control Research Center, RIKEN,  
Anagahora, Simo-shidami, Moriyama, Nagoya  
(Received August 11, 2003)  
(Revised December 1, 2003)

乱す力は周期的なものとなる。したがって、周期的外力に対し平衡維持がうまくできれば、歩行運動計画への応用の可能性が開けると考える。歩行時に遊脚をどう運ぶかといった運動では一般に目標運動をあらかじめ設計する必要があり、そこからおのずと歩行周期も決定しているはずである。よって、本稿を通して周期的外力のうち周期は既知と仮定する。ここで考える問題は、遊脚の振りや単脚支持期の倒立振り運動から生じる既知周期の未知周期外力に対して、平衡を維持できるような足関節の出力を、運動から得られる環境情報をもとに内部に獲得することである。

## 2. 一定外力下での立位平衡制御

本稿での展開は、これまでに提案してきた足関節による立位平衡制御法<sup>4),5)</sup>に基づき、それを拡張するものである。そこで本節では、その立位制御法を簡単に review する。Fig. 1(a) に示すような、足部と胴部からなる2リンクモデルを考える。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

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

のように表わせる。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での距離、 $\theta$  は胴部の鉛直方向からの変位、 $\tau$  は足関節トルク、 $g$  は重力加速度、 $F_x$  および  $F_y$  は外力を表わし、 $A$ 、 $\theta_f$  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2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。 $\ell$  は足関節から足部先端までの距離、 $m$  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、 $F_H = F_T$  と自重が踵と爪先に均等にかかる状態を実現するよう足関節トルク  $\tau$  を以下の式で与える。

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

このとき、Fig. 1(b) のように外力と重力が釣り合うような

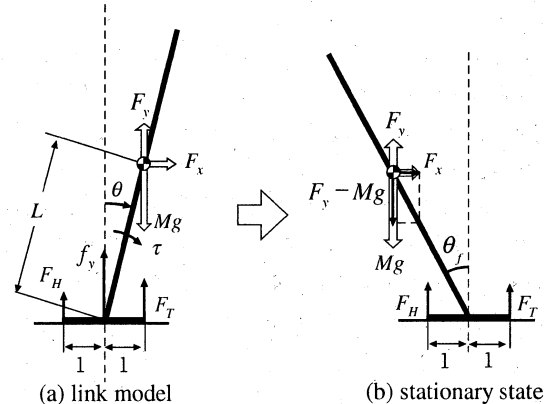


Fig. 1 Model and stationary posture by proposed control law

姿勢、すなわち  $\theta = \theta_f$  が定常状態となり、その安定性はフィードバックゲイン  $K_d$ 、 $K_p$  および  $K_f$  が条件

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

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

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

を満たすように選ぶことにより局所的に保証される。

定常姿勢では重力と一定外力が釣り合うため、平衡維持に必要な足関節トルクは零でよいことに注意する。

## 3. 周期的外力下での立位平衡制御

### 3.1 方針

未知の周期外力（周期は既知）に対して立位姿勢の平衡を維持するためには、最初は平衡に関する有用な情報を含む床反力の情報を利用する必要がある。しかし、この場合の外力には周期性という規則性がある。これをうまく制御に取り込めれば、未知な環境情報が既知となり、結果的に未知環境下の立位姿勢維持に必須となる床反力の情報を用いることなしに、それが可能になると考えられる。これは床反力のフィードバック制御に基づいた立位姿勢制御から、床反力情報を用いない意味でフィードフォワード的な制御への移行を意味する。この観点から本節では、周期的外力下における立位姿勢の制御と適応学習のダイナミクスについて議論する。

前節の制御法では、平衡に関する有用な情報となる床反力をフィードバックし足関節トルクの生成に用いている点の特徴の一つとなっている。しかし、ひとたび定常状態に達すれば与えられた環境に合った姿勢が既知となり、その定常状態での姿勢を記憶することで位置制御のみでも立位姿勢の維持が可能となる。言い換えると、定常状態では未知環境での立位姿勢維持に必要であった床反力の情報は不要となる。もう一つの特徴は、定常状態の姿勢が  $\theta_d$  すなわち比例制御の目標値には依存しない点である。上述の定常状態で足関節トルクが零となることも  $\theta_d$  の値によらず成立する。

ここで  $\theta_d$  の設定値の影響について考察しておく。(7) の第3項は積分項であるので、第2項の比例項に比べ応答が

遅くなる。よって制御の初期の段階では、 $\theta$  は  $\theta_d$  に向かって時間発展する。しかし、時間経過とともに積分項つまり第3項の影響が大きくなり、真の平衡点  $\theta_f$  に収束しはじめる。もし、環境条件が既知であり  $\theta_d = \theta_f$  と設定できれば、初期状態直後に時間発展する方向が平衡点の方向と一致し、平衡点への収束性が局所的にしか保証されていない本稿の制御則には有利である。逆にいえば、適切な値を  $\theta_d$  に設定しないと、同じ初期値でも収束しなくなることが生じる。 $\theta_d$  の設定には、環境にさらされることによって獲得した情報をうまく取り込むことが必要である。

周期的外力に対しても、定常状態に達すれば床反力の情報を用いずに平衡維持が可能となるような制御法を考えることを本稿の方針とする。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。当然、第1項は床反力の情報を用いずに構成する必要がある。

第2項において(7)の  $\theta_d$  に相当する部分は零となっている。その理由は、 $\theta_d$  が定常状態の姿勢に影響を与えないこと、また外乱のない水平な床面を一般的な状況として考えることが多く、その場合上体が足部に対して直角となる  $\theta_d = 0$  が理想的な姿勢となることである。しかし、この場合、フィードフォワード項としてくりだして第1項に含めたと解釈すれば、周期的外力に対して適切な  $\theta_d = \theta_d(t)$  を学習すると考えることもできる。このような理由により、以降では(7)の  $\theta_d$  は取り除いて議論をすすめる。

### 3.2 未知なパラメータに関する線形化

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する。本稿では、外力の周期  $T_e$  は既知と仮定している。この仮定の下では、外力はその周期を基本周期とする三角関数で Fourier 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

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

となる。ここで  $C = \cos \theta$ 、 $S = \sin \theta$  である。左辺を未知なパラメータについて線形化すると

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

$$Y = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}, S, S_0C, C_0C, S_0S, C_0S, \\ \dots, S_nC, C_nC, S_nS, C_nS \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} I, -MgL, -L\alpha_0^{(x)}, -L\beta_0^{(x)}, L\alpha_0^{(y)}, L\beta_0^{(y)}, \\ \dots, -L\alpha_n^{(x)}, -L\beta_n^{(x)}, L\alpha_n^{(y)}, L\beta_n^{(y)} \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

が得られる。

### 3.3 制御法と適応学習

上式に対し、未知なパラメータ  $\sigma$  より新たに未知パラメータ  $\phi$  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。

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

$$Y_r = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_r, S, S_0C, C_0C, S_0S, C_0S, \\ \dots, S_nC, C_nC, S_nS, C_nS \end{bmatrix}^T \quad (21)$$

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

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

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

また、未知パラメータ  $\phi$  の推定に相当する適応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  $\Gamma$  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(7)の右辺と等しいことに注意する。

### 3.4 制御による振る舞い

#### 3.4.1 解析における仮定

解析を簡単にするため、以下の仮定をおく。

A1 周期が既知の周期外力は有界で微分可能である。

A2 初期状態では未知パラメータの推定値はすべて零 ( $\hat{\phi}(0) = 0$ ) であり、足関節出力は第2項すなわち(7)の右辺のみ (ただし  $\theta_d = 0$ ) によって構成される。

A3 この初期状態から適応学習なしで制御則を動かしたとき、与えられた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 の下で適応学習を行っても転倒が起きない。

仮定 A2 の下では(20)の右辺第1項の影響は初期状態には現れていないので、適応学習による効果の解析が容易になる。仮定 A3 は(20)の右辺第2項つまり(7)のみで周期外力に対して立位姿勢が維持できることと等価である。適応学習がない場合では、安定性が保てる外力の大きさは(8)~

(10) の  $A$  の大きさによって見積もることができる。さらに、仮定 A4 で適応学習が原因で転倒が起きる場合を除外しておく。これらの仮定は厳しいものであるが、提案する方法では周期外力に対し立位姿勢を維持するような運動が繰り返し行なわれてはじめて未知パラメータの推定すなわち適応学習が可能となる。つまり、転倒を起こさず立位状態を維持できることが大前提となる。

このような仮定の下で示すべきことは、適応学習により足関節トルクが、床反力の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移行することである。そこで、まず床反力のフィードバックを含む第2項の大きさが、適応学習により0に減少することを示す。つぎに、適応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トルクの変化の仕方が、ある条件下で同一と見なせることを述べる。

### 3.4.2 床反力フィードバック項の減少

リアプノフ関数の候補として

$$V = \frac{1}{2} K_I I s^2 + \frac{1}{2} \bar{\phi}^T \Gamma^{-1} \bar{\phi} (\geq 0) \quad (26)$$

を考える。ここで、 $\bar{\phi} = \hat{\phi} - \phi$  である。前節の仮定 A3 より、立位姿勢の安定が保証されるよう (8)~(10) が満たされているため、 $K_I > 0$  となることに注意する。(26) を時間微分すると、

$$\dot{V} = K_I I s \dot{s} + \dot{\bar{\phi}}^T \Gamma^{-1} \bar{\phi} \quad (27)$$

となる。 $Y_r$  の定義より、

$$I \ddot{\theta}_r - M L g S - \sum_k^n \left\{ \alpha_k^{(x)} S_k + \beta_k^{(x)} C_k \right\} L C + \sum_k^n \left\{ \alpha_k^{(y)} S_k + \beta_k^{(y)} C_k \right\} L S = Y_r \sigma \quad (28)$$

が成り立ち、(14) より (28) を引き算すると、

$$I(\ddot{\theta} - \ddot{\theta}_r) = \tau - Y_r \sigma \quad (29)$$

が得られる。一方、(24) を微分し、(4)、(5) を代入すると

$$\dot{\tau}_f = \frac{1}{\ell} \tau \quad (30)$$

となる。(29) から (30) を  $IK_f/K_d$  倍したものを辺々引くと

$$I(\ddot{\theta} - \ddot{\theta}_r - \frac{K_f}{K_d} \dot{\tau}_f) = (1 - \frac{IK_f}{K_d \ell}) \tau - Y_r \sigma \quad (31)$$

となる。両辺に  $K_I$  をかけ、(23)、(19)、(18) および制御法 (20) を代入すると

$$K_I I \dot{s} = Y_r \bar{\phi} - K_d s \quad (32)$$

が得られる。上式を (27) に代入すると

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s Y_r \bar{\phi} - K_d s^2 + \bar{\phi}^T \Gamma^{-1} \dot{\bar{\phi}} \\ &= \bar{\phi}^T (Y_r^T s + \Gamma^{-1} \dot{\bar{\phi}}) - K_d s^2 \end{aligned} \quad (33)$$

となるが、適応学習のダイナミクス (25) を代入すると最終的に

$$\dot{V} = -K_d s^2 \leq 0 \quad (34)$$

が得られる。 $\dot{V}$  が 0 に収束することをいうために、 $\dot{V}$  の一様連続性を示す。これは

$$\ddot{V} = -2K_d s \dot{s} \quad (35)$$

が有界であることを示せばよい。 $V \geq 0$ ,  $\dot{V} \leq 0$  より  $V$  は有界となる。したがって、 $s$ ,  $\bar{\phi}$  は有界である。 $\bar{\phi}$  の有界性より  $\dot{\bar{\phi}}$  の有界性がいえる。一方、前節の仮定 A1 より、周期外力は有界で微分可能である。このとき、ダイナミクスは状態量  $\theta$ ,  $\dot{\theta}$ ,  $\tau_f$ ,  $\hat{\phi}$  および時刻  $t$  に対して微分可能となり、その解も微分可能となる<sup>6)</sup>。また仮定 A3 より周期外力に対し転倒が起きずに立位姿勢が維持される。これは角度の変位  $\theta$  が有界であり、その変位速度  $\dot{\theta}$  も有界であることを意味する。これより (22) より  $\dot{\theta}_r$  の有界性、(21) より  $Y_r$  の有界性が示される。また (32) において  $K_I$ ,  $I$  は定数より  $s$  が有界となる。 $s$  および  $\dot{s}$  の有界性が示されたので、 $\dot{V}$  は有界となる。

以上のことから Lyapunov like lemma<sup>7)</sup> より定常状態で  $\dot{V} \rightarrow 0$ , すなわち  $s \rightarrow 0$  となる。よって、床反力のフィードバックを含む (20) の右辺第2項は、適応学習が進むにつれ 0 に減衰する。

### 3.4.3 適応学習の前後による足関節トルクの比較

適応学習の前は第3.4.1節の仮定 A2 より、関節トルクは (7) で与えられる。系のダイナミクスは運動方程式 (1) および足部におけるモーメントの釣り合いから導かれる (30) で記述される。(30) を  $\tau$  について解き、ほかの2式に代入することにより、

$$I \ddot{\theta} = M g L \sin \theta + F_c(t) + \ell \dot{\tau}_f \quad (36)$$

$$K_f \tau_f - \ell \dot{\tau}_f = K_d \dot{\theta} + K_p \theta \quad (37)$$

の2式により系の振る舞いが記述できるがわかる。ここで外力の影響は直立姿勢周りで線形化し  $F_c(t)$  として一つにまとめた。

つぎに、適応学習後の振る舞いについて考察する。仮定 A4 より転倒を起こさず適応学習が進んでいく。前節の解析では適応学習のダイナミクスにより新しい拘束  $s = 0$  が形成される。そこで関節トルクはこの拘束に基づいて生成されると考える。つまり、系のダイナミクスは、適応学習前と同じ運動方程式 (1) および足部におけるモーメントの釣り合いから導かれる (30) と、新しいトルクの生成条件

$$-K_d \dot{\theta} - K_p \theta + K_f \tau_f = 0 \quad (38)$$

により決定される。先の場合と同様に  $\tau$  を消去することにより、(36) と同じ

$$I \ddot{\theta} = M g L \sin \theta + F_c(t) + \ell \dot{\tau}_f \quad (39)$$

と、トルク生成の違いにより生じるダイナミクス

$$K_f \tau_f = K_d \dot{\theta} + K_p \theta \quad (40)$$

の2式で系のダイナミクスが決定することがわかる。

結局、適応学習前後のダイナミクスの違いは、コントローラに相当するダイナミクスが (37) か (40) かの違いである。足関節トルクが生じる原因は外力が周期的にはたらくことにあるから、この違いが足関節トルクにどう影響するかを、外力  $F_e$  から関節トルク  $\tau$  への伝達関数により調べてみる。足関節角度の変化は小さいと仮定し (14) を直立姿勢周りで線形化して計算すると、適応学習前の伝達関数  $H_b$  は

$$H_b(p) = \frac{K_f(p^2 I - MgL)(1 - p \frac{\ell}{K_f})}{p\ell(pK_d + K_p)} \quad (41)$$

一方、適応学習後の伝達関数  $H_a$  は

$$H_a(p) = \frac{K_f(p^2 I - MgL)}{p\ell(pK_d + K_p)} \quad (42)$$

となる。  $p$  は微分演算子である。

もし  $K_f \gg \ell$  であり、  $|p\ell/K_f| \ll 1$  と見なせるならば、  $H_b(p)$  と  $H_a(p)$  は近似的に等しくなり、したがって外力により生じる足関節トルクは同じとなる。つまり、適応学習は、その前後での足関節トルクの変化の仕方には影響を与えないことになる。

### 3.4.4 適応学習によるトルク成分の変化

第 3.4.2 節より適応学習で床反力フィードバックを含む項が減少することが示され、他方第 3.4.3 節より  $K_f \gg \ell$  ならば適応学習が足関節トルクの生成に影響を与えないことがわかった。これらを総合すると、足関節トルクを構成する成分は最初は床反力フィードバックを含む項が全成分を占めているが、適応学習によりその成分がフィードフォワード項に完全にコピーされるといえる。このとき、(11) の第 2 項で作られるトルクの時系列データをそのまま記憶する方法も可能であるが、未知パラメータの推定により  $Y_r$  の各要素を基底とする関数の重み付け和で記述することにより、情報量の集約が可能となる。  $Y_r$  の各要素には床反力の情報は入っていないので、そのフィードバックなしで平衡が維持できることになる。これは、周期外力に対し平衡を維持するトルクが内部に生成されていることを意味している。

第 3.4.3 節の解析では、適応学習の途中での足関節トルクの大きさについての議論はできない。このダイナミクスは非線形性が高く、厳密な解析が困難である。これについては次節のシミュレーションによって考察することにする。

## 4. シミュレーション

Fig. 1 に示したような 2 リンク・モデルを用いてシミュレーションを行なった。リンク・モデルのパラメータは、前稿のパラメータ<sup>4)</sup>をもとに、  $M = 2(\text{kg})$ ,  $L = 0.5(\text{m})$ ,  $\ell = 0.05(\text{m})$ ,  $I = 5ML^2/4(\text{kgm}^2)$  のように設定した。周期外力は、周期が 5(s) となるよう

$$F_x = MgL \sin \alpha \quad (43)$$

$$F_y = MgL(1 - \cos \alpha) \quad (44)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{18}(1 - \cos 2\pi f_e t) \quad (f_e = 0.2) \quad (45)$$

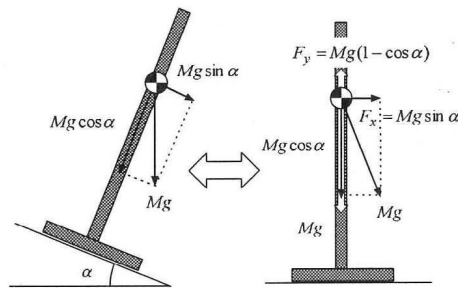
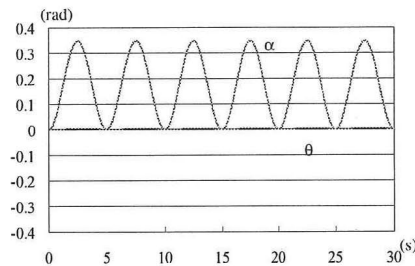
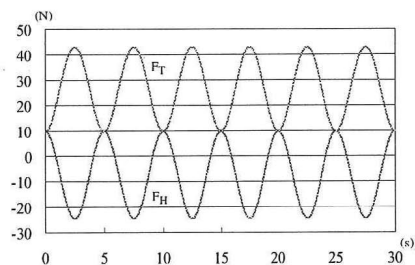


Fig. 2 Definition of external force



(a) Slope and ankle joint angles



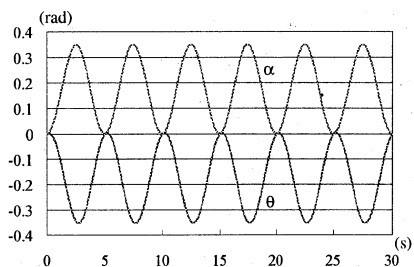
(b) Ground reaction forces

Fig. 3 Results with PD control

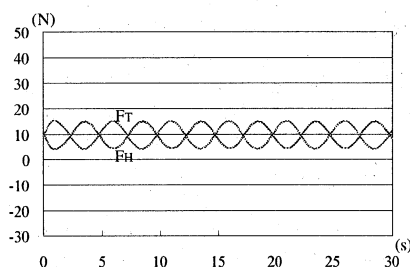
で与えた。これは、Fig. 2 に示すように、床面の傾斜角度が  $\alpha$  になったときの重力方向の変化によって生じる外力に相当する。つまり、周期 5(s) で角度  $\pi/18$  を中心に床面を  $\pi/18$  の振幅で傾斜させていることと等価になる。傾斜角度が  $\alpha$  では、姿勢は  $\theta = -\alpha$  が、胴部は重力方向を向き、また  $F_T = F_H$  を満たす望ましい状態となることに注意する。

制御則の違いを比較するため、従来の PD 制御のみの場合 ( $K_p = 1000$ ,  $K_d = 500$ ), 床反力のフィードバックを加えた場合 ((7) 式,  $K_p = 1000$ ,  $K_d = 500$ ,  $K_f = 25$ ), さらにフィードフォワード項とその適応学習 (25) を加えた場合 ( $K_d = 500$ ,  $K_p = 1000$ ,  $K_f = 25$ ,  $\Gamma = \text{diag}[0.1, \dots, 0.1]$ ,  $n = 10$ ) の 3 種類を行なう。制御のゲインは、新しく加わったものの影響がわかるよう共通なパラメータは同じ値を設定している。それぞれの結果は Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 に示す。

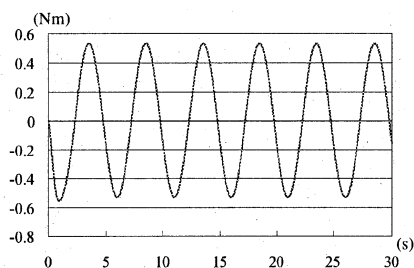
PD 制御のみの場合、ゲインが大きいため、外力が周期的に作用しても足関節角度は常に 0 付近に保たれる (Fig. 3(a))。しかし、床反力 (Fig. 3(b)) をみると負になっている瞬間があり、このとき実際には転倒が起きてしまう。



(a) Slope and ankle joint angles



(b) Ground reaction forces

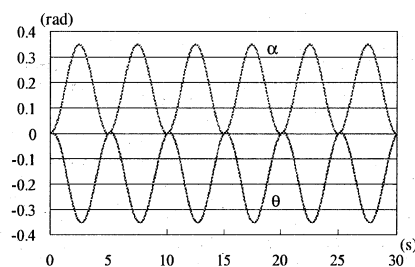


(c) Ankle joint torque

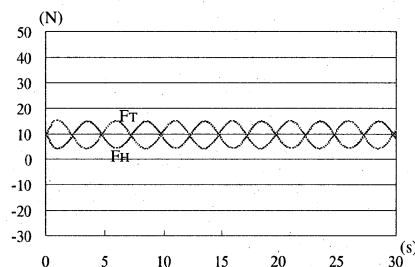
Fig. 4 Results with ground reaction force feedback

これに対し、床反力のフィードバックを加えると、周期外力に応じた足関節角度の調節が行なわれる (Fig. 4(a)). そのため、床反力が負になることはなく (Fig. 4(b)), 未知な環境に対しても床反力情報に基づいて適切に重心を動かすことで転倒を防いでいることがわかる. Fig. 4(c) はこのときの足関節のトルク変化である.

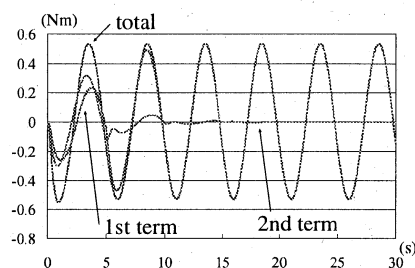
さらに、適応学習のダイナミクスを加えてみる. 足関節角度 (Fig. 5(a)), 床反力 (Fig. 5(b)), 足関節トルク (Fig. 5(c)) とも適応学習なしの場合とほとんど変化はない. つまり、適応学習のダイナミクスを加えても、未知な周期外力に対して同じようにに立位姿勢が保たれる. しかし、Fig. 5(c) に示されるように足関節トルクを生成する成分に変化が生じている. 床反力のフィードバックを含む項が時間とともに減少し、代わりにそれを含まない (20) の第 1 項の成分が増大し、最終的にはその成分で  $\tau$  がほとんど形成されていくことがわかる. つまり、未知な環境下で直立姿勢を維持するには床反力情報は必須であるが、その未知な環境が定常的であるとき適応学習により環境情報が取り込まれ、床反力の情報は不要となる.



(a) Slope and ankle joint angles



(b) Ground reaction forces



(c) Ankle joint torque

Fig. 5 Results with ground reaction force feedback and adaptive learning

## 5. 討 論

本稿では、床反力に基づく立位平衡制御を取り扱っている. 平衡制御は歩行ロボットや人間型ロボットにおいて重要なテーマの一つであり、ZMP すなわち床反力の作用中心を計測しフィードバックすることによって環境変動にロバストな歩行運動が実現されている<sup>8),9)</sup>. それらは ZMP の計測値により歩行の目標軌道を一時的に修正する方法を提案し、その有効性を実験より実証するアプローチである. 本稿では床反力から得られる環境情報からそこに潜む規則性を学び取り、制御出力のトルクパターンをその環境に適した知識として記憶しようという点、その制御法・適応学習法の理論的な証明を試みている点でそれらの研究とは違ったアプローチをとっている.

本稿での適応学習は、適応制御の枠組みと同じである. 適応制御ではマニピュレータによる物体搬送が主な対象であり、物体の質量や慣性モーメント、負荷変動、動力学パラメータなど時不変未知定数を運動しながら推定する問題設定<sup>7),10),11)</sup>である. したがって、本稿のように歩行系を扱

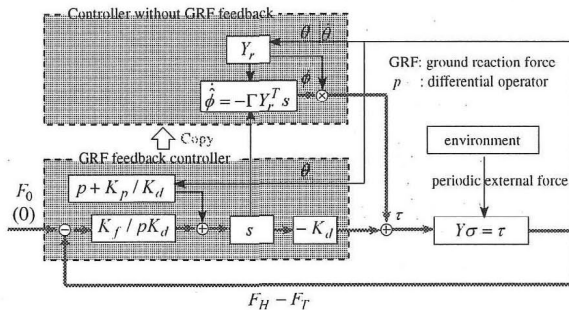


Fig. 6 Block diagram of control scheme

い、またそれに作用する周期的すなわち時変な外力を推定する方法は、これまでに提案されていない。

適応学習では理論上  $s$  は 0 に収束し、それは前節のシミュレーションでも確認されている。しかし、実際の応用つまりロボットを使った実験などでは、外乱やノイズによる影響のため  $s$  が必ずしも 0 に完全に収束するとは限らない。一般に、制御系でフィードバックが必要なのは、予期できない外乱に対応するためである<sup>12)</sup>。言い換えると、予期できない外乱が存在する場合、フィードフォワード制御のみで対処することは根本的に不可能である。したがって、未知な外乱が存在する実環境においてフィードバック項すなわち  $s$  が 0 とならないのは自然であると考え。本稿では、学習の対象としているのは環境の定常性つまり周期性であり、予測できない外乱は学習できず、フィードバックに頼ることになる。このとき  $s$  を完全に 0 に収束させることよりも、少しでも 0 に近づけてフィードバック成分を減少させ、内部に獲得した情報で、できる限り与えられた環境条件に対処することに価値をおく。

また、適応学習で学習されるのは、外力の周期成分のみである。外力のオフセット成分は、その影響は制御の初期に(11)第2項で対処されてしまう<sup>4)</sup>ため学習されない。

## 6. おわりに

本稿では、未知の周期外力(周期は既知)が働く状況下での立位平衡制御と適応学習について考察した。提案する制御方法は Fig. 6 のようにまとめられる。未知な外力が働く場合でも効果的に立位姿勢を維持するためには、床反力の情報を用いることが重要である。しかし、外力が周期的でその周期が既知な場合、定常的に立位姿勢を維持し続けることによって環境の情報を取り込まれる。その結果、未知な外力下では必須であった床反力の情報を用いることなく、立位姿勢の維持が可能となる。これは床反力のフィードバックに基づくコントローラが適応学習によりコピーされ、床反力の情報を用いない意味でフィードフォワード的なコントローラに置き換わることに対応する。このフィードフォワード的なコントローラは、主に外力を展開する基底関数の重み付け和として構成され、その重みに運動を通して得られた環境情報が集約されている。

今後の課題は、提案した手法の実験的な検証および周期が未知な場合への拡張、歩行運動計画への応用、床反力のフィードバック制御の収束性の向上などが挙げられる。

本研究の一部は、小川科学技術財団、岐阜大学活性化研究費の補助を受けています。

## 参考文献

- 1) M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla and D. Stokic: Biped Locomotion, Scientific Fundamentals of Robotics 7, Springer-Verlag (1989)
- 2) A. Goswami: Postural stability of biped robots and the foot-rotation indicator (FRI) point, the International Journal of Robotics Research, 18-6, 523/533 (1999)
- 3) 日本平衡神経科学会編: 平衡機能検査の手引, 南山堂 (1976)
- 4) 伊藤, 西垣, 川崎: 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, 38-1, 79/86 (2002)
- 5) S. Ito, Y. Aoyama and H. Kawasaki: Static balance control and external force estimation using ground reaction forces, Proc. of 2nd Int. Symp. on Adaptive Motion of Animals and Machines, WeP-I-4 (2003)
- 6) S. Wiggins, 丹波敏雄 監訳: 非線形の力学系とカオス(上), シュプリンガー・フェアラーク東京 (1992)
- 7) J.-J. E. Slotine, W. P. Li: Applied Nonlinear Control, Prince Hall (1991)
- 8) K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka: The development of Honda humanoid robot, Proc. of 1998 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1321/1326 (1998)
- 9) Qiang Huang et al.: Balance control of a biped robot combining off-line pattern with realtime modification, Proc. of 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 3346/3352 (2000)
- 10) 川崎, 上木, 伊藤: 複数ロボットによる力センサレス適応協調制御, 計測自動制御学会論文集, 39-9, 879/878 (2003)
- 11) Chee-Meng Chew and Gill A. Pratt: Adaptation to load variations of a planar biped: Height control using robust adaptive control, Robotics and Autonomous Systems, 35 1/22 (2002)
- 12) 伊藤正美: 自動制御, 丸善 (1987)

## [著者紹介]

### 伊藤 聡 (正会員)



1991年名古屋大学工学部情報工学科卒業。93年同大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了。94年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。99年、岐阜大学工学部助手、現在に至る。工学博士。日本ロボット学会、IEEEなどの会員。

### 川崎 晴久 (正会員)



1974年名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了、同年日本電信電話公社(現NTT)入社、90年金沢工業大学教授。94年8月より岐阜大学工学部機械システム工学科教授、現在に至る。ロボット制御、バーチャル・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などの会員。工学博士。