

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[†]

伊藤 聡^{***}・西垣 智啓^{*}・川崎 晴久^{*}

Standing posture control in constant force field
based on ground reaction force

Satoshi ITO^{***}, Tomohiro NISHIGAKI^{*} and Haruhisa KAWASAKI^{*}

In this paper, we consider standing posture control of biped system. When standing on a slope, a human adjusts his posture, i.e., ankle joint angles adjust to the gradient of the slope. In this case, the resultant stationary posture is not determined until the slope angle is given to the system. To solve this problem, we propose a new posture control law, where the standing posture is adjusted based on the ground reaction forces in such a way that the entire weight is placed evenly on the feet. This control law consists of PD control and force feedback control, whose stationary posture possesses local stability in adequate feedback gain. By applying this control law to a simple robot system, we examine its efficiency. In this experiment, we show the robot behavior is adaptive to the slope angle or external force generated by wind.

Key Words: Posture control, Ground reaction force, Adaptation, External force, Stability

1. はじめに

直立した状態の維持は、人間をはじめとする二足で歩行を行なう動物が、歩行を行なう前に獲得する運動機能である。したがって、二足歩行による動的な安定性の維持を考える前に十分に理解しておくべきことであると考えられる。このような動機づけより、本稿では二足歩行系を簡単なリンク系でモデル化し、起立した姿勢の制御法を床反力に着目して考察する。

本稿では、起立状態において足部とそれ以外の上部部が作る角度、すなわち足関節の角度に着目し、これを直立状態の姿勢と定義する。このように考えたとき、単に直立状態を維持するにしても、われわれがとりうる姿勢は、環境によって様々であることに気づく。例えば、傾斜面で山側を背に起立する場合、平面の時よりも足関節を伸展させ、上部が鉛直方向を向くような姿勢をとる。一方、流水プールの中で立ち止まる時のように横方向から力を受け続ける場合、上部を上流の方向に倒した状態で姿勢を維持する。上記の2つの例に共

通するのは、平面で直立している状態に対し一定の外力が定常的に加えられる状況と解釈できる点である。以下では、一定の外力場を環境と定義する。本稿でとり扱う問題は、未知の一定外力に対し、上述したような直立姿勢の変化を実現するような平衡制御法をいかに与えるかという問題である。

環境に応じて直立姿勢を変化させる場合、その姿勢は環境が与えられなければ決まらないことになる。傾斜面で上部が鉛直方向を向くように直立するには、傾斜角度が分からないことには、とるべき姿勢は決まらない。このことは、直立姿勢の維持を位置のフィードバックで行なおうとするときに問題となる。直立姿勢を維持する最も簡単な手法は、足関節角度を検出してその角度に対する位置のフィードバックをかけるものである。しかし、フィードバックする足関節角度の目標値が、環境が与えられた後、つまり事後的にしか決定できない。

この理由により、未知環境下での平衡制御の問題は、従来提案されてきた手法がうまく利用できないことが多い。二足歩行系の平衡制御は、重心の鉛直投影点¹⁾、ZMP(zero moment point)²⁾、FRI(Foot-Rotation Indicator) point³⁾などにより議論される。なかでも、歩行運動はダイナミクスを持つため、慣性力と重力が作るモーメントがゼロとなるZMPに着目した制御法が多く報告されている^{4)~6)}。しかし、ZMPが用いられるのは、主に歩行運動の計画時である。すなわち、ZMPが足底(支持多角形)内部に常に留まるように各関節軌道を事前に設計し、実際の歩行運動の制御はその目標関節軌道に関するフィードバックで達成されてい

[†] ISHF2001 で発表 (2001.9)

^{*} 岐阜大学工学部 岐阜市柳戸 1-1

^{**} 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
名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞

^{*} Faculty of Engineering, Gifu University,
Yanagido 1-1, Gifu

^{**} Bio-Mimetic Control Research Center, RIKEN,
Anagahora, Simo-shidami, Moriyama, Nagoya

(Received July 2, 2001)

(Revised October 22, 2001)

る。したがって、このアプローチは目標値が環境により事後的に決定する本稿の問題設定に対しては、そのままでは利用できない。一方、力センサにより実際の ZMP を計測し、その目標値からのずれをリアルタイムで補償する手法が検討されている^{7),8)}。この方法は有効ではあるが、提案された制御則により、歩行系がどのように振舞うかの理論的考察が十分ではないように思われる。杉山・野飼⁹⁾は、目標とする歩行運動が実現できるように床反力をはじめとした環境との接触力・接触モーメントを最初に規定することで歩行運動を計画しているが、最終的には規定した接触力・接触モーメントを実現しうる関節の目標軌道を生成するため、環境の変化を含めた問題には応用が難しい。

本稿では、未知な環境すなわち一定外力を運動方程式に取り込んで解析し、その影響を考慮した直立姿勢の制御方法を床反力に着目し考察する。本稿で取り扱う問題は、ダイナミカルな要素を含んでいない分、歩行の制御より問題が簡単ではある。しかし、環境からの影響を陽に考えた例えば文献¹⁰⁾のような研究は、そもそも静的な平衡制御においてさえ数少ない。環境による影響を考慮しそれにあわせて姿勢を変化させる方が、一定の姿勢で直立状態を保つ場合よりその安定性が向上することからも、このような枠組みの研究は重要であると考えられる。

2. モデルと制御方法

2.1 環境を含めた運動方程式

人間の体は多くの骨格と関節から成り立つ多リンク系である。ここでは歩行運動は扱わないが、以後この多リンク系を歩行系と呼ぶことにする。多くの関節の中でも直立状態の安定性に大きな影響を与えるのは、足関節である。それは足関節が歩行系の最下部に位置し、わずかな変動が歩行系全体の重心位置に大きな影響を及ぼすためである。そのような足関節の重要性に着目するため、本稿では歩行系を Fig. 1 で示すような足部とそれ以外の胴部の2つのリンク系としてモデル化する。なお、多リンク系への応用に関しては、第4.3節で議論することにする。

簡単のためモデルの運動は矢状面内に限定し、さらに以下の条件を仮定する。まず、足関節にはアクチュエータがあり適当なトルク τ が出力できる。また足関節の角度 θ および角速度 $\dot{\theta}$ が計測できる。足部は両先端すなわち踵と爪先の2点で接地し、それぞれの接地点では床反力の垂直成分(それぞれ F_H , F_T とする)が計測できる。以降では床反力といえば F_H , F_T を表すことにする。水平方向に F_x 、鉛直方向に F_y の未知の一定な外力が加わる。また床は水平で滑べらないものとする。

このような仮定の下では胴部のみがダイナミクスをもち、その運動は

$$I\ddot{\theta} = MLg \sin \theta + F_x L \cos \theta - F_y L \sin \theta + \tau, \quad (1)$$

で記述できる。ここで、 M は胴部の質量、 I はその足関節

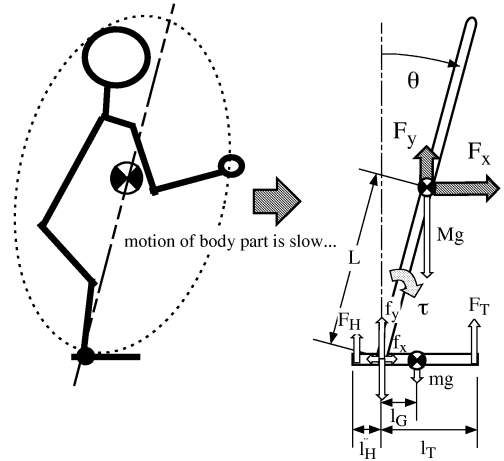


Fig. 1 Link model.

周りの慣性モーメント、 L は胴部の重心と足関節間の長さ、 g は重力加速度である。一方、リンク間に働く水平方向、鉛直方向の内力 f_x および f_y は次式で与えられる。

$$f_x = ML\ddot{\theta} \cos \theta - ML\dot{\theta}^2 \sin \theta - F_x, \quad (2)$$

$$f_y = -ML\ddot{\theta} \sin \theta - ML\dot{\theta}^2 \cos \theta + Mg - F_y. \quad (3)$$

これらを用いると、床反力 F_T および F_H は、踵および爪先周りのモーメントのつりあいの条件より、

$$F_T = -\frac{1}{l_T + l_H} \tau + m_T g + \frac{l_H}{l_T + l_H} f_y, \quad (4)$$

$$F_H = \frac{1}{l_T + l_H} \tau + m_H g + \frac{l_T}{l_T + l_H} f_y. \quad (5)$$

となる。ここで、 l_T , l_H , l_G は、足関節からそれぞれ爪先、踵、足部の重心までの長さである。また、 m_T と m_H はそれぞれ爪先、踵にかかる足部の重量で、

$$m_T = \frac{l_H + l_G}{l_T + l_H} m, m_H = \frac{l_T - l_G}{l_T + l_H} m \quad (6)$$

で与えられる。 m は足部の質量である。

この単純化したモデルに対し考えるべきことは、環境すなわち一定外力 F_x , F_y に対して姿勢を変化させようような制御入力 τ を、関節角度 θ と角速度 $\dot{\theta}$ および床反力 F_H , F_T を基にいかにか決定するかである。以降での計算を簡単にするため、(1) 式を以下のように変形しておく。

$$I\ddot{\theta} = (Mg - F_y)L \sin \theta + F_x L \cos \theta + \tau \\ = AL \sin(\theta - \theta_f) + \tau \quad (7)$$

ここで、

$$A = \sqrt{(Mg - F_y)^2 + F_x^2} \quad (8)$$

であり、 θ_f は次式を満たす定数である。

$$\sin \theta_f = -\frac{F_x}{A}, \quad \cos \theta_f = \frac{Mg - F_y}{A}. \quad (9)$$

ここで、 A と θ_f がともに環境をあらわす F_x , F_y に依存していることに注意する。

2.2 制御方法

2.2.1 カフィードバックによる制御

議論を簡単にするため、まず対称性をもつ足部すなわち $\ell_T = \ell_H = \ell$, $\ell_G = 0$ の場合について考える。転倒が起きないためには、 F_T と F_H がいずれも正の値を保つ必要がある。そして、爪先と踵に体重が均等にかかり $F_T = F_H$ となった場合が、最も安定性が高くなる。これは対称な足底において ZMP がその中央にくることから説明できる。

したがって、2つの床反力 F_T と F_H の差を小さくするように、足関節トルク τ を決定することを考える。(4) と (5) 式より、 F_T と F_H と τ の関係は

$$F_H - F_T = \frac{1}{\ell}\tau. \quad (10)$$

与えられる。これより定数 K_I を用いて

$$\tau = \ell \cdot K_I \int (F_H - F_T) dt, \quad (11)$$

とすれば、 $F_H - F_T$ は零に収束することが示せる。しかし、残念なことに、この制御入力では直立姿勢を安定化することはできない。 $F_H = F_T$ を保ったまま、胴部が転倒してしまうからである。この不安定性については次節でも述べる。

2.2.2 PD 制御とカフィードバックの組合せ

胴部の安定化を図るには、足関節角度の PD 制御が有効である。

$$\tau_\theta = -K_d \dot{\theta} + K_p(\theta_d - \theta). \quad (12)$$

ここで、 K_d と K_p は正の定数、 θ_d は PD 制御の目標値である。直立姿勢を目指す場合 $\theta_d = 0$ である。しかし、外力が存在するため θ は θ_d には収束しない。 $\tau = \tau_\theta$ を (7) 式に代入すると、

$$I\ddot{\theta} = AL \sin(\theta - \theta_f) - K_d \dot{\theta} + K_p(\theta_d - \theta). \quad (13)$$

が得られる。ここで、 $\theta - \theta_f \sim 0$ を仮定して上式を $\theta = \theta_f$ まわりで線形化すると、

$$\ddot{\theta} = -\frac{K_d}{I}\dot{\theta} - \left(\frac{K_p - AL}{I}\right)(\theta - \theta_0), \quad (14)$$

となる。ここで、

$$\theta_0 = \frac{K_p \theta_d - AL \theta_f}{K_p - AL}. \quad (15)$$

である。これより $K_p > AL$ が成り立てば、第一次近似では θ は θ_0 に収束することがわかる。

さて、この段階で胴部の局所的な安定性は PD 制御により保たれることとなった。そこでさらに (11) 式のような体重を爪先と踵に均等にかける床反力のフィードバックを制御入力に加えることを考える。そのようなカフィードバックとして、

$$\tau_f = \int (F_H - F_T) dt, \quad (16)$$

を定義し、最終的な足関節トルクを

$$\tau = \tau_\theta + K_f \tau_f. \quad (17)$$

で与える。ここで K_f は力のフィードバック・ゲインである。以降では、この制御方法を PD 制御とカフィードバック (Force feedback) の組合せせからなることから、足関節の PDF 制御と呼ぶことにする。

2.2.3 平衡状態とその安定性の解析

(12), (16) および (17) 式で与えられる関節トルクに対し、胴部の局所的安定性が保証できる。

《定理 1》(足関節 PDF 制御 (対称足部) の局所的安定性) 歩行系に対し足部の対称性 $\ell_T = \ell_H = \ell$, $\ell_G = 0$ を仮定する。(1) 式で与えられる系のダイナミクスに対して、(12), (16) および (17) 式で与えられる足関節トルクを考える。もし、フィードバック・ゲイン K_d , K_p および K_f が

$$K_p > AL > 0 \quad (18)$$

$$\frac{\ell}{I} K_d > K_f > 0 \quad (19)$$

$$(K_d \ell - K_f I) K_p > K_d \ell AL \quad (20)$$

を満たせば、 $\theta = \theta_f$ は局所的漸近安定な平衡点となる。

(証明) (7) 式に、(17), (12) 式を代入すると、

$$I\ddot{\theta} = AL \sin(\theta - \theta_f) - K_d \dot{\theta} + K_p(\theta_d - \theta) + K_f \tau_f, \quad (21)$$

となる。一方、(16) 式を微分した式に (10), (12) および (17) 式を代入すると、

$$\dot{\tau}_f = \frac{1}{\ell}(-K_d \dot{\theta} + K_p(\theta_d - \theta) + K_f \tau_f). \quad (22)$$

が得られる。まず、(21) 式と (22) 式で与えられるダイナミクスの平衡点 $(\bar{\theta}, \bar{\tau}_f)$ を求める。 $\ddot{\theta} = \dot{\theta} = 0$ と $\dot{\tau}_f = 0$ を代入すると (21) 式および (22) 式はそれぞれ

$$AL \sin(\theta - \theta_f) + K_p(\theta_d - \theta) + K_f \tau_f = 0, \quad (23)$$

$$\frac{1}{\ell}(K_p(\theta_d - \theta) + K_f \tau_f) = 0. \quad (24)$$

となる。この代数方程式を解くと、

$$(\bar{\theta}, \bar{\tau}_f) = \left(\theta_f, \frac{K_p}{K_f}(\theta_f - \theta_d)\right) \quad (25)$$

が得られる。次にこの平衡点の安定性を調べる。 $\theta = \theta_1$, $\theta = \theta_2$ とおき、方程式を平衡点まわりで線形化すると、

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\tau}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{AL - K_p}{I} & -\frac{K_d}{I} & \frac{K_f}{I} \\ -\frac{K_p}{\ell} & -\frac{K_d}{\ell} & \frac{K_f}{\ell} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \tau_f \end{bmatrix} \quad (26)$$

となる。この線形微分方程式の特性方程式は、

$$\lambda^3 + p_2 \lambda^2 + p_1 \lambda + p_0 = 0 \quad (27)$$

で与えられる。ここで

$$p_2 = \frac{K_d \ell - K_f I}{I \ell}, p_1 = \frac{K_p - AL}{I}, p_0 = \frac{K_f AL}{I \ell} \quad (28)$$

である。Routh/Hurwitz の安定判別法を用いると、平衡点が安定となるための必要十分条件は

$$p_0 > 0, p_1 > 0, p_2 > 0, p_1 p_2 - p_0 > 0 \quad (29)$$

である。上式より、(18)-(20) が導出できる。

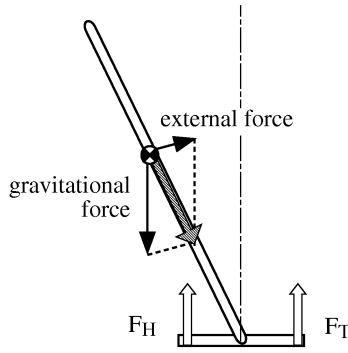


Fig. 2 Stationary posture

(注意) 制御入力 (11) 式は, (17) 式において $K_d = K_p = 0$ と設定したものに相当する. この場合, (18)-(20) 式で与えられる条件を満たさない. したがって, カフィードバックのみの制御 (11) では, 胴部が不安定となり転倒するといえる. (注意) (18) から (20) 式の条件は, 外力によって定まるパラメータ A を含んでいる. これにより, 各フィードバックゲインが与えられたとき, どれくらいの外力に耐えうかを見積もることができる. 逆に, 外力の最大値が既知の場合は, これらの式により各フィードバックゲインが決定できる.

2.3 定常状態での姿勢

前節の解析より, 足関節トルクとして (17) を用いると定常状態での姿勢は $\theta = \theta_f$ となる. ここで, 先に述べたように, θ_f が環境すなわち一定な外力 F_x, F_y に依存していることに注意する. これは, 定常状態の姿勢が, 環境条件が与えられてはじめて決まることを意味する.

定常状態での姿勢 $\theta = \theta_f$ では, Fig. 2 に示すように, 胴部が重力と外力との合力の方向を向かうことに注意する. したがって, もし外力が働かなければ, 鉛直方向が定常状態での姿勢となる. この姿勢をとることの利点は, 足関節まわりの重力と外力のモーメントがつりあっているため, その姿勢の維持が極わずかなトルクで可能なことである. 計算上では, (25) 式を (12) 式と (17) 式に代入するとわかるように入力トルクは $\tau = 0$ となる. このことはエネルギー消費の点からみても有利である.

2.4 モデルの拡張と制御則の応用

足部に対称性のない場合 $l_H \neq l_G, l_G \neq 0$ を考える. この場合, 外力なしの状況で鉛直方向に直立しても, F_T と F_T は等しくならず, それぞれ

$$\bar{F}_T = m_T g + \frac{l_H}{l_T + l_H} f_y \quad (30)$$

$$\bar{F}_H = m_H g + \frac{l_T}{l_T + l_H} f_y \quad (31)$$

となる. したがって, F_T と F_T との差が,

$$F_0 = \bar{F}_H - \bar{F}_T = (m_H - m_T)g + \frac{l_T - l_H}{l_T + l_H} f_y \quad (32)$$

に収束するように, 床反力のフィードバック τ_f を以下のよう修正する.

$$\tau_f = \int (F_H - F_T - F_0) dt \quad (33)$$

この修正した制御方法により, 対称性のない足部に対しても胴部の安定性が保証できる.

《定理 2》(足関節 PDF 制御 (非対称足部) の局所的安定性) 歩行系 (1) に対して, (12), (17) および (33) 式で定義される制御入力を考える. ここで, $l = \frac{l_T + l_H}{2}$ とする. フィードバック・ゲイン K_d, K_p, K_f が (18)-(20) 式を満たせば, $\theta = \theta_f$ は局所的漸近安定な平衡点となる.

(証明) (21) 式および (22) と同様の微分方程式が導かれることを示す. (21) 式が導出されることは, 定理 1 と同様, (7) 式に (17), (12) 式を代入することより自明である. 次に, (22) 式の導出である. (33) 式を微分した式

$$\dot{\tau}_f = F_H - F_T - F_0 \quad (34)$$

に, (5) から (4) 式を引いて得られる式

$$F_H - F_T = \frac{1}{l} \tau + (m_H - m_T)g + \frac{l_T - l_H}{l_T + l_H} f_y \quad (35)$$

を代入する. このとき (32) 式に注意すれば, (22) 式と同様の式となることがわかる. 後の解析は, 定理 1 と同様である. (注意) 制御入力を決めるとき, (32) に含まれる f_y の値が必要である. これは, (5) と (4) を足し合わせてえられる

$$f_y = F_T + F_H - (m_T + m_H)g = F_T + F_H - mg \quad (36)$$

より求める. 足部の質量 m が既知であれば, 床反力フィードバックの F_T, F_H より算出可能である.

次に, 環境から一定外力 F_x, F_y ばかりでなく, 一定のモーメント τ_e が同時に胴部にかかる場合を考察する. このとき, 胴部の運動方程式は

$$\begin{aligned} I\ddot{\theta} &= M L g \sin \theta + F_x L \cos \theta - F_y L \sin \theta + \tau_e + \tau, \\ &= A L \sin(\theta - \theta_f) + \tau_e + \tau, \end{aligned} \quad (37)$$

となる. この系に対し足部が対称ならば定理 1, 対称でなければ定理 2 で定義される足関節の PDF 制御を用いる. まず, その場合の平衡点について考える. 得られる微分方程式は

$$I\ddot{\theta} = A L \sin(\theta - \theta_f) + \tau_e - K_d \dot{\theta} + K_p(\theta_d - \theta) + K_f \tau_f, \quad (38)$$

$$\dot{\tau}_f = \frac{1}{\ell} (-K_d \dot{\theta} + K_p(\theta_d - \theta) + K_f \tau_f). \quad (39)$$

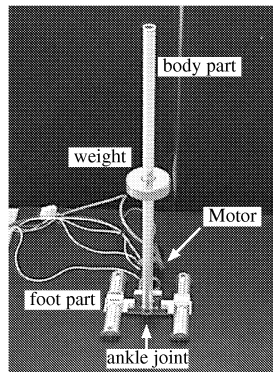
であるから, $A L \geq |\tau_e|$ のとき平衡点 $(\theta_e, \frac{K_p}{K_f}(\theta_e - \theta_d))$ が存在する. ただし, θ_e は

$$A L \sin(\theta_e - \theta_f) + \tau_e = 0, \quad \left(-\frac{\pi}{2} < \theta_e - \theta_f < \frac{\pi}{2}\right) \quad (40)$$

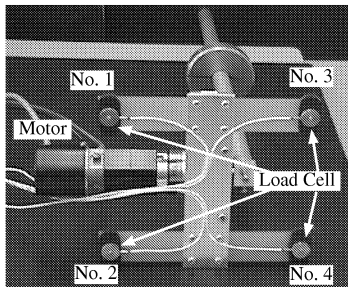
を満たす定数である. 次に平衡点の安定性を調べる. $\theta = \theta_1, \dot{\theta} = \theta_2$ とおき, (38), (39) を平衡点まわりで線形化すると, 状態変数が $[\theta_1, \theta_2, \tau_f]$ のときの線形微分方程式の係数行列は

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{A L \cos(\theta_e - \theta_f) - K_p}{I} & -\frac{K_d}{I} & \frac{K_f}{I} \\ -\frac{K_p}{\ell} & -\frac{K_d}{\ell} & \frac{K_f}{\ell} \end{bmatrix} \quad (41)$$

となる. ここで改めて $A \cos(\theta_e - \theta_f) > 0$ を A と定義すれば, 以下の議論は定理 1 と同様である. 以上をまとめると次の定理が得られる.



(a) Overview.



(b) Four loadcells on the sole.

Photo. 1 A designed robot

《定理 3》 歩行系 (37) において，外部から力 F_x , F_y およびモーメント τ_e が

$$\sqrt{(Mg - F_y)^2 + F_x^2} L \geq |\tau_e| \quad (42)$$

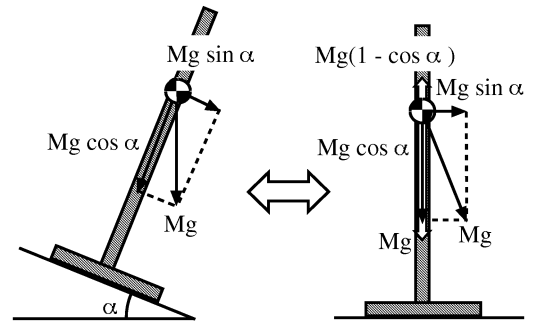
の関係を満たすと仮定する．この系に対し，(12)，(17) および (33) 式で定義される制御入力を与える．フィードバック・ゲイン K_d , K_p , K_f が (18) - (20) 式を満たせば，(40) 式を満たす $\theta = \theta_e$ は局所的漸近安定な平衡点となる．ここで， $\ell = (\ell_T + \ell_H)/2$, $A = \sqrt{(Mg - F_y)^2 + F_x^2} \cos(\theta_e - \theta_f)$ である．

(注意) (40) 式より定常状態での姿勢 $\theta = \theta_e$ は，足関節まわりの外部からの力およびモーメントがつりあう姿勢であることがわかる．したがって第 2.3 節で述べたのと同様に，定常状態では入力トルクは理論上零でよく，姿勢の維持には効率がよい．

3. 実験

3.1 実験装置

足関節 PDF 制御による振舞いを実験的に検証するため，Photo. 1 に示すような簡単なロボットを製作した．Photo. 1(a) はロボットの全体図である．このロボットは Fig. 1 でモデル化したように，足部と胴部の 2 つのリンクから構成されている．胴部の長さは $0.55(m)$ ，足部の長さは $0.12(m)$ で，対称性のある構造をもつ．足関節はエンコーダの付いた DC モータ (定格出力 $6W$ ，減速比 $1:50$) により駆動される．足関節角度はこのエンコーダにより検出し，角速度は検出した角度を遮断周波数 $10Hz$ の一次の微分フィル

**Fig. 3** Slope and external force

タを通すことにより計算する．また，このロボットの足底には，Photo. 1(b) に示すように，1 軸のロードセルが 4 つ取り付けられている．爪先および踵での床反力の垂直成分は，それぞれロードセルの No.1 と No.3，No.2 と No.4 によって計測される力を計算機内で足し合わせることで算出する．胴部の重心位置を調節するために，主さ $0.42(kg)$ の可動式のおもりを取り付ける．ロボット全体の質量は， $1.11(kg)$ となる．制御入力は，エンコーダからの角度およびロードセルからの床反力の情報をもとに $1(ms)$ 毎に算出する．この実験でのフィードバック・ゲインは $K_p = 2.5$, $K_d = 1.5$, $K_f = 0.01$ とした．

3.2 実験結果

3.2.1 傾斜面での実験

傾斜角を α とすると，傾斜面での環境は Fig. 3 に示すように，水平面上で $F_x = Mg \sin \alpha$, $F_y = Mg(1 - \cos \alpha)$ の一定外力が働く場合と等価となる．傾斜面における足関節 PDF 制御の有効性を調べるため，以下のような実験を行った．初期状態として，ロボットを水平な板の上におく (ステージ 1)．この状態から，板の左端を持ち上げて傾斜面をつくり，しばらくの間一定傾斜角を保つ (ステージ 2)．その後，再び板の左端を床に降ろし，水平な状態を維持する (ステージ 3)．各ステージでのロボットの姿勢を Photo. 2 に示す．傾斜面に合わせて姿勢が適応的に変化していることがわかる．そのときの数値データを Fig. 4 に示す．Fig. 4(a) は，足関節角度の時間変化を表す．傾斜角度が一定のとき足関節は $0.3(rad)$ に保たれ，また水平面に戻されたとき足関節は $0(rad)$ 付近に戻っていることがわかる．Fig. 4(b) は制御入力 τ , τ_θ および $K_f \tau_f$ の時間変化を表す．傾斜角が一定に保たれているとき，理論上制御入力 τ は零となるはずである．しかし，足関節まわりの摩擦が大きいため定常偏差が残り，この実験では τ は零となっていない．Fig. 4(c) は床反力の時間変化である．ロボットの自重が足部の両端に均等にかかるよう制御が行なわれていることがわかる．Fig. 4(d) はそれらの床反力より推算した床反力の作用中心点の位置の変化である．足関節の位置が原点で爪先側を正とった．最初は爪先側が上げられるので，床反力の作用中心は踵側に移動するが，傾斜が一定となると原点付近に収束する．次

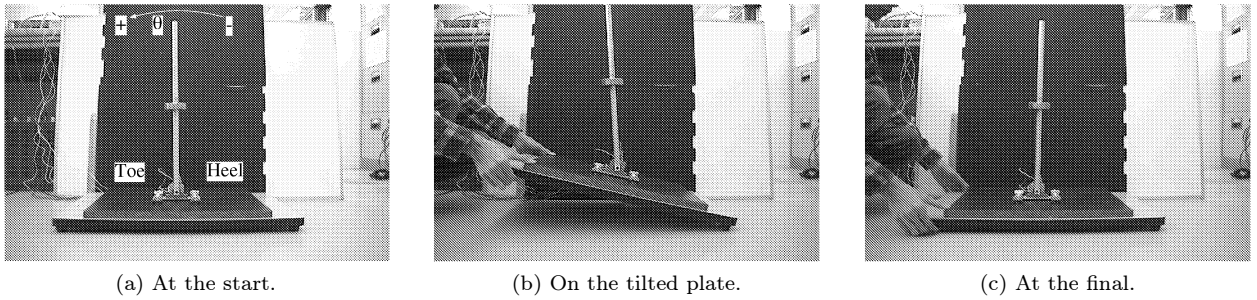


Photo. 2 Posture changes by slope angle.

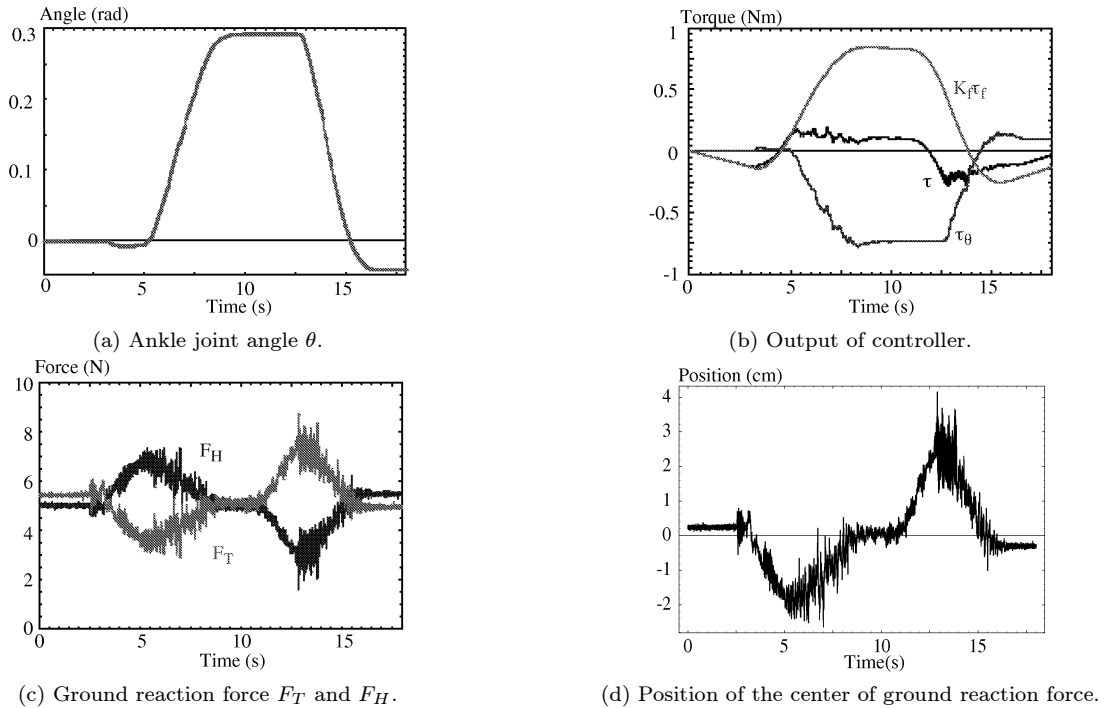


Fig. 4 Experimental result

に傾斜状態から水平にゆっくり戻すと、最初は爪先側に移るが、やがて原点付近に戻される。

3.2.2 水平面で外力を受ける実験

ロボットにパラシュートを取り付け横から扇風機で風を送ることにより、ほぼ水平な外力を受ける状況を作り出した。その時のロボットの姿勢変化を **Photo. 3** に報告する。なお、この場合の外力の大きさの正確な計測は難しく数値的な検証ができないため、実験時の数値的データは省略する。実験では、前節と同じようにまずロボットを水平な板の上におく(ステージ1)。次にリモコンにより扇風機の風力を弱にし、その状態をしばらく保った(ステージ2)。その後、扇風機の風力を強にし、その状態を保った(ステージ3)。外力が加わらない状況では垂直に立っているが、外力が強くなるにつれて風上方向に姿勢を倒しているのがわかる。

4. 討論

4.1 カフィードバックのみによる姿勢制御の可能性

足関節の PDF 制御を提案し、それを利用した歩行系の振

舞いを実験で検証してきた。もともとこの制御法は、床反力のみを制御することで一定外力場における直立姿勢をより効果的に維持できないかというのが狙いであった。しかし、足関節 PDF 制御には、関節角度・角速度のフィードバックも含まれている。つまり、床反力のみでのフィードバックでは、この制御法は実現できないこととなる。けれども、注目すべき点は、平衡状態の姿勢は重力と外力のみによって決定され、PD 制御の目標値 ((12) 式の θ_d) には依存しないことである。つまり、適当な姿勢に対する弾性と粘性が足関節角度に与えられていればよいことになる。このことは、足関節 PDF 制御の PD 制御部分を機械的な要素つまりバネとダンパに置き換えられる可能性を示唆している。通常の制御では、機械的な要素を用いると、制御の目標値すなわち平衡点を変えたいときに対処できなくなることが問題となる。足関節 PDF 制御では重力と外力のモーメントとつりあう位置として平衡点が自動的に変わることによって、この問題を解決している。

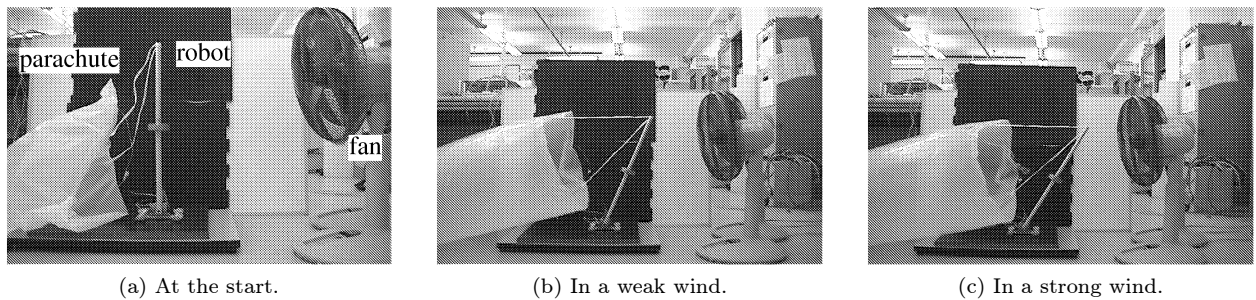


Photo. 3 Posture changes by the force of the wind.

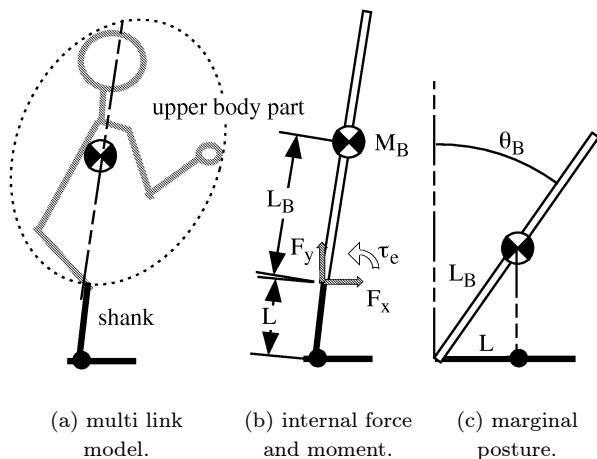


Fig. 5 application to multi-link system.

4.2 足関節の位置に関する検討

第 2 節では、足関節は床面と同じ高さにあると仮定してきた。しかし、厳密には地面よりわずかに上にある。水平面からの足関節の高さを ℓ_A とおくと、床反力は胴部からの水平方向内力 f_x の影響をうけ、

$$F_T = -\frac{1}{\ell_T + \ell_H} \tau + m_T g + \frac{\ell_H}{\ell_T + \ell_H} f_y - \frac{\ell_A}{\ell_T + \ell_H} f_x \quad (43)$$

$$F_H = \frac{1}{\ell_T + \ell_H} \tau + m_H g + \frac{\ell_T}{\ell_T + \ell_H} f_y + \frac{\ell_A}{\ell_T + \ell_H} f_x \quad (44)$$

となる。したがって、(32) 式で定義される F_0 を

$$F_0 = (m_H - m_T)g + \frac{\ell_T - \ell_H}{\ell_T + \ell_H} f_y + 2\frac{\ell_A}{\ell_T + \ell_H} f_x \quad (45)$$

と定義しなおせば、定理 2 および定理 3 と同じ条件で、同一の結果が得られる。ただし、 F_0 の決定には f_x の値が必要である。したがって、リンク間の水平方向内力 f_x を計測するため、力センサがもう一軸必要となる。

4.3 多リンク系の制御への応用

本稿ではこれまで、胴部を 1 リンクの剛体としてモデル化してきた。しかし元来、人間は多リンク系である。そこで、多リンク系への応用の可能性が次の問題となる。これを Fig. 5 を用いて説明する。Fig. 5(a) に示すように、脛部を Fig. 1 の胴部とみなし、膝関節より上の部分(ここでは便宜上、上体ということにする)は外力によってその力学的な影響が反映されていると考える(膝関節を固定した脚を Fig. 1

の胴部と考えてもよい)。この場合の外力は、上体に働く外力をも含めて扱えることに注意する。ここで一つだけ異なるのは、膝関節に働くトルクの影響を考慮しなければならない点である (Fig. 5(b))。これを外部からのモーメントとして扱えば定理 3 を適用することができる。

足関節 PDF 制御を多リンク歩行系にもちいると、お辞儀をするときのように、安定性を確保したまま胴体、腕、頭の位置をゆっくり変化させることができる。足関節 PDF 制御は、足関節の角度および角速度と床反力のフィードバックのみで構成されている。多リンク系の制御に用いた場合でも、上体の関節角度といった情報は一切用いていないため、局所的なフィードバックで独立にできるのが利点の一つである。そして、定理 3 の (42) 式により、平衡を保てる姿勢の範囲をおおよそ見当づけることができる。簡単のため、外力は働かないものとし、脛部の質量 $M = 0$ 、リンク長を L とし、上体の質量を M_B 、膝関節から上部の重心と膝関節間の距離を L_B 、重心と膝関節を結ぶ直線が鉛直方向からなす角を θ_B とおく。定常状態では、 $F_x = 0$ 、 $F_y = M_B g$ より $A = M_B g$ 、また $\tau_e = M_B g \sin \theta_B$ であるから (42) 式より

$$\frac{L}{L_B} \geq \sin \theta_B \quad (46)$$

となる。姿勢の変化は、重心が上式を満たす θ_B の範囲内で可能であることから、 L は大きく、 L_B は小さいほうが広い範囲で上体の姿勢が変化できることとなる。Fig. 5(c) に (42) 式を満たす限界の姿勢の一つを示す。実際には関節の可動範囲に限界があり、結局は上体の重心が足関節の真上にもってこられる範囲で姿勢変化が実現できることとなる。

また、足関節 PDF 制御は、ZMP すなわち床反力が作用する中心点を足関節の位置に制御することと等価である。したがって、足底すなわち支持多角形の各頂点で床反力を検出することによって、これまで矢上面内に限定して考えてきた運動を、3次元空間への拡張することは容易であると考えられる。

4.4 制御と環境変化の時間スケール

足関節 PDF 制御の基本的な考え方は、一過性の外乱等に対してはとりあえず PD 制御で対処して平衡を保ち、その結果として体重のかけかたに不均等が生じた場合に、力フィードバックでそれを解消しようということである。したがって、PD 制御の収束性は、力フィードバックの収束性よりも

当然速くなる必要がある。おおまかにいえば PD 制御の収束性は K_p と K_d 、カフィードバックの収束性は K_f で決まる。上述した収束性の速さに関する条件は、(18) と (19) 式において K_f の大きさに上限があることで表現されている。

また、理論展開では外力は一定と仮定してきたが、実験で示したようにある程度のダイナミクスをもって傾斜面を作ったり、外力を変化させたりしても対処できる。これは、環境の変化が、カフィードバックの収束性よりも遅ければ、その変化に追従できることを意味している。これもおおまかな表現ではあるが、 K_f が大きくとれるほど変化の速い環境にも適応でき、足関節 PDF 制御の有効性が高くなるといえる。

5. おわりに

本稿では、直立姿勢における足関節の働きに着目し、単純化したモデルを用いて、一定な外力を受ける場合の直立姿勢の新しい制御方法について説明した。この方法の利点としては

- (1) 一定な外力に応じて姿勢を変化させ、外力と重力が足関節まわりにつくるモーメントのつり合う姿勢が平衡状態となる。
- (2) その平衡状態の局所的な安定性が保証されている。
- (3) 重力と外力のモーメントがつりあっているため、姿勢の維持にはわずかなトルクしか必要としない。
- (4) 足関節角度と角速度、床反力といった足部の局所的な情報のみで制御入力計算ができる。

が挙げられる。そしてロボットにより、制御方法によるロボットの振舞いを実験的に検証した。また、制御方法の拡張性について考察し、足関節角度・角速度の情報を用いずに床反力フィードバックのみに基づく姿勢制御の可能性、また多リンク系への応用方法を議論した。

この制御方法は、現在のままでは静的な平衡の維持にしか動作は保証できない。今後はこれを発展させ、歩行運動のようなダイナミカルな運動の制御に応用することを考えていきたい。これには、外力を慣性力に置き換えることで生じる問題点、床反力差の目標値を時間の関数として与えることなどが可能かどうか、などを検討する必要がある。

本研究の一部は中部電力基礎技術研究所 (R-11102) および遠藤齊治朗記念科学技術財団、日本学術振興会科学研究費補助金 (13750215) の補助を受けた。

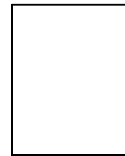
参考文献

- 1) R. B. McGhee and A. A. Frank. On the stability properties of quadruped creeping gaits. *Mathematical Biosciences*, 3, 331/351 (1968)
- 2) M. Vukobratovic. 歩行ロボットと人工の足. 日刊工業新聞社 (1975)
- 3) Ambarich Goswami. Postural stability of biped robots and the foot-rotation indicator (FRI) point. *the International Journal of Robotics Research*, 18- 6, 523/533 (1999)
- 4) 高西 淳夫, 石田 昌己, 山崎 芳昭, 加藤 一郎: 2足歩行ロボット WL-10RD による動歩行の実現. *日本ロボット学会誌*, 3-4, 325/336 (1985)

- 5) 水戸部 和久, 矢島 克知, 那須 康雄: ゼロモーメント点の操作による歩行ロボットの制御. *日本ロボット学会誌*, 18-3, 359/368 (2000)
- 6) K. Nagasaka, H. Inoue, and M. Inaba: Dynamic walking pattern generation for a humanoid robot based on optimal gradient method. *Proc. of 1999 IEEE ICSMC*, VI, 908/913 (1999)
- 7) Qiang Haung et. al: Balance control of a biped robot combining off-line pattern with real-time modification. *Proc. of 2000 IEEE ICRA*, 3, 3346/3352 (2000)
- 8) 中村 仁彦 他: 仮想ロボットプラットフォーム. *日本ロボット学会誌*, 19-1, 28/36 (2001)
- 9) 杉山 和利, 野飼 亨: 接触力を主眼とした歩行ロボットの脚関節軌道の生成. *日本ロボット学会誌*, 14-8, 1208/1212 (1996)
- 10) A. Takanishi, T. Takeya, H. Karaki, and I. Kato: A control method for dynamics biped walking under unknown external forces. *IEEE Int. workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS'90)*, 795/801 (1990)

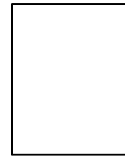
[著者紹介]

伊藤 聡 (正会員)



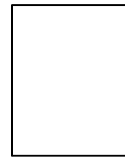
1991年名古屋大学工学部情報工学科卒業。1993年同大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了。1994年より理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センターに勤務。1999年、岐阜大学工学部機械システム工学科助手、現在に至る。工学博士。日本ロボット学会、IEEEなどの会員。

西垣 智 啓



2001年岐阜大学工学部機械システム工学科卒業。現在同大学院工学研究科機械システム工学専攻博士前期課程在学中。

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。1994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。