

床反力中心制御による2足歩行系両脚支持期の重心移動

伊藤 聡^{*1*2} 浅野 博紀^{*1} 川崎 晴久^{*1}

A Weight Shift by Control of Center of Pressure of Ground Reaction Forces in Biped Double Support Phase

Satoshi Ito^{*1*2}, Hironori Asano^{*1} and Haruhisa Kawasaki^{*1}

In this paper, we consider the weight shift in biped double support phase under variable environment. In conventional method, motion pattern of body parts that leads the center of mass or center of pressure of ground reaction forces to the desired position is planned first, and then execute positional feedback against it. This indirect method causes problems such that the planned motion pattern is not suitable, or how this pattern should be modified, for the varied environment. Here, we show that, by selecting the center of pressure as the controlled variable, not only the motion planning of body part becomes unnecessary, but also the motion pattern automatically changes with the environmental conditions. The stability of the control method is discussed and its validity is examined by simulations and robot experiments.

Key Words: Biped Robot, Double Support Phase, Center of Pressure, Ground Reaction Forces, Environmental Changes

1. はじめに

2足歩行系において平衡の制御は重要な課題である。平衡のとれた歩行を計画するために考え出されたのがZMP (Zero Moment point) [1] の概念である。ZMPとは慣性力と重力の作るモーメントが零となるような床面上の点である。関節軌道を設計すると慣性力が計算できるため、運動時の各瞬間でZMPがどの位置にくるかが計算できる。単脚支持期の場合、足部が運動しないと仮定して計算したZMPが足底の外に出てしまうならば、その関節軌道に従った運動では足部の縁まわりで回転を起こす。つまり、足部の接地状態すなわち足裏全体での面接触が維持されない。この状態での回転中心にはアクチュエータやセンサは存在せず、通常制御が難しくなり、歩行ロボットの場合はこの状態になるのを避けることが多い。現在、多くの歩行ロボットでは、ZMPが足底内部に常に留まるように歩行運動の軌道計画を行い、歩行時にはその軌道に対する位置のフィードバック制御を行っている[2][3]。この有効な方法が、ロボットの2足歩行技術に発展をもたらしたといえる。

しかし、この方法ではZMPの制御に関してはフィードフォワード的であり、実際にZMPの位置を計測してその情報をも

とに関節トルクを決定しているわけではない。したがって、パラメータの誤差や環境の変化により、ZMPが目標位置に制御されているとは限らない。近年、ZMPの位置を計測し、その情報により計画した運動の目標軌道を修正する方法が提案されている[4]~[6]。しかし、制御による振舞いの理論的考察、特に安定性の解析は十分ではない。

本稿では、いかにしたら環境が変化しても平衡のとれた運動ができるかを問題とする。これを解決するには、床反力が重要であると考えた。特に床反力中心 (CoP: Center of Pressure) は平衡に重要な指標となるZMPと一致する[7]ことから、CoPを被制御量[†]として選ぶ方法を提案する。我々は、2足歩行の直立姿勢に関し、床反力に基づいた制御法を提案してきた[8]。ここでは矢状面内に運動が限定された2リンクモデルで踵と爪先での2点接地を仮定し、その2点での床反力の垂直成分の差が一定となるように制御することで、一定外力に応じた直立姿勢の変化を実現している。この制御の特徴は、定常時の姿勢、つまり上体の傾きが外力の大きさによって適応的に変化することである。本稿ではこれを拡張し、CoPを新しく被制御量としてそれをフィードバック制御することにより、環境変化に応じて変化するような振る舞いを実現することを目的とする。

このような問題の枠組みが応用できる例としては、両脚支持期の重心移動がある。単脚支持期では、遊脚を前に振り出すと

原稿受付 2003年6月10日

^{*1}岐阜大学工学部

^{*2}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

^{*1}Faculty of Engineering, Gifu University

^{*2}Bio-mimetic control research center, RIKEN

[†]本論文では以後ZMPを床反力中心 (CoP: Center of Pressure) と呼称する。

同時に支持脚で地面を後方に蹴る動作が伴う。これには必然的にそのような運動をさせるための軌道計画が必要となる。それに対し両脚支持期では、その主な役割は、平衡を保ちながら重心を新しい支持脚の上に乗せることであって、どの位置にどの部位を運ぶというような動作そのものが具体的に決まっているわけではない。つまり実質的な目標は CoP を支持脚の足裏に移動させることであり、その意味では CoP を被制御量としてとることが妥当となる。しかし、従来のアプローチでは、CoP が移動できるような上体の運動を計画し、それを実現するような位置制御を行う。このような間接的な手段をとるため、環境変化によって計画した運動が合わなくなったり、それを修正し直したりする問題が生じる。ここでは、CoP を直接制御することで上体運動の目標軌道が不要となるばかりでなく、その運動が環境に応じて自動的に変化することを示す。そして、これまでに提案されている ZMP のフィードバックでは十分なされてこなかった制御方法の収束性について議論する。

歩行ロボットの研究には、ロボットに歩行を行わせることでヒトの歩行原理を解明しようという側面もある。本研究では環境変化に対しても平衡が保たれる安全な歩行を目指し、ヒトの歩行原理を解明することには重点をおかない。

2. 床反力に基づく直立姿勢制御

最初に本稿でのアプローチが基本とする文献 [8] の床反力制御に基づいた平衡維持法について簡単に述べておく。そこで設定している仮定は以下のようなものである。直立姿勢の制御では、小さい摂動に対しては足関節を使用して平衡を保つことが知られている (ankle strategy [13])。これは最も単純には、Fig. 1 に示すように、2 足歩行系を胴部と足部からなる 2 リンク系として表現できる。なお運動は矢状面に限定している。足部の形状は前後に対称で、足関節は足部中央の高さ 0 の位置にあるものと仮定する。また足部は地面と 2 点で接地し、接地点での垂直方向の床反力の大きさが測定できるとする。また、足関節では、角度と角速度が測定でき、適切なトルクが出力できる。環境からの影響を考慮するため、それを重心に働く外力として表現する。外力は一定であると仮定する。

平衡が保たれているとき足部に運動は起きず、胴部のみが

$$I\ddot{\theta} = MLg \sin \theta + F_x L \cos \theta - F_y L \sin \theta + \tau$$

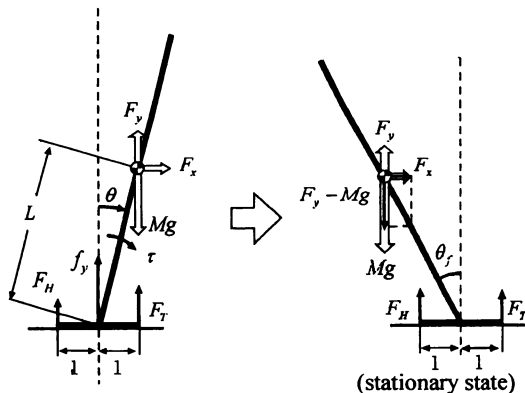


Fig. 1 Link model

$$= AL \sin(\theta - \theta_f) + \tau \quad (1)$$

に従って運動する。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 は足関節と胴部重心間の距離、 θ は床面に対して垂直な方向からの胴部の角度、 τ は足関節トルク、 g は重力加速度、 F_x および F_y はそれぞれ外力の水平および垂直成分、 A は胴部重心にかかる外力と重力の合力の大きさを

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

であり、その方向は次式を示す θ_f によって表される。

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

また、接地点まわりのモーメントの釣り合いより足関節トルクと 2 つの接地点における床反力の垂直成分 F_H , F_T との関係が、

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

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

で与えられる。ここで m は足部の質量、 ℓ は足関節から接地点までの距離、 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。

ここでの目的は、外力にかかわらず転倒しないように平衡を維持することである。これは F_T および F_H を共に正に保てば達成される。しかし、定常状態に置いては F_T と F_H が等しい値をとることが、安定余裕 [14] の観点からは望ましい。そこで定常状態において $F_T = F_H$ が達成されるよう足関節トルク τ 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 右図のように外力と重力が釣り合うような姿勢が定常状態となり、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。証明は文献 [8] を参照されたい。なお、定常状態での姿勢が外力によって変化することに注意する。

3. 両脚支持期の重心移動

3.1 問題設定および仮定

両脚支持期の重心移動が必要な例として、歩行の開始時の制御がある。歩行開始時は通常両脚で支持されており、左右の両足に均等に体重がかかっている。その状態から歩行のための一歩を踏み出すには、一方の脚を前に振り出せる拘束を受けない自由な状態とするように、左右の脚のどちらか一方に全体重を

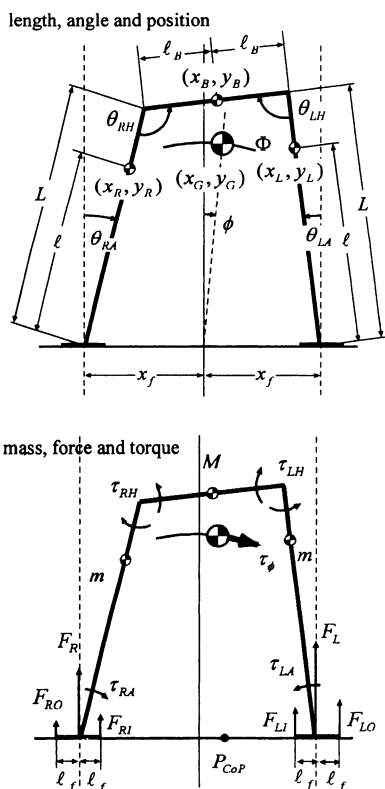


Fig. 2 Model for double support phase in the frontal plane

移動させる必要がある。このような観点から、本稿ではまず両脚支持期での重心移動を前額面内の運動に限定して考える。

両脚支持期でのダイナミクスを考慮するため、Fig. 2に示すような胴部、脚部、足部からなる5リンクのモデルを用いる。この運動は膝を伸ばしたまま行われる場合が多いため、脚部は1リンクとみなす。左右の足関節は足部中央の高さ0の位置にあると仮定する。足部は左右両端の2点で床面と接地し、そこでの床反力の垂直成分が測定できるものとする。また、足関節と股関節の角度と角速度が測定でき、それぞれの関節でトルクが出力できる。

両脚支持期の重心移動における制御目標は、体重が床面上の目標位置にかかるように上体を動かすことである。ここでは、外力の影響を考慮して上体の運動を計画するのではなく、床反力、より厳密にはCoPそのものを直接被制御量とするアプローチをとる。

3.2 制御方法

両脚支持期では、足部の接地状態は維持される。上体の機構は閉リンクとなり、実際に運動するのは胴部と両脚部の3リンクであるので、その運動は1自由度となる。前章での制御法(7)も1自由度の胴部の運動に対する制御法であったため、それを拡張することを考える。

前章の問題設定との大きな違いは、重心移動という動的な制御を目的としている点である。しかし、これは静的平衡点の局所安定性に基づき、その目標値をゆっくりと変化させることによって実現することにする。それ以外に、接地点数が多いこと、重心軌道が円弧とならないこと、また、トルクの生成が冗

長となることの三つの違いが問題となる。それらの違いを解決できるように、制御方法を以下で拡張していく。

3.2.1 床反力中心による記述

接地点数の違いは、式(7)を応用する上で大きな問題となる。それは式(7)が接地する2点での垂直床反力の差に基づいたものであるからである。4点接地の場合に拡張するため、CoPが被制御量となるよう式(7)を書き換える。CoPは床反力が床面の一点で働くとみなしたときの作用点[7]で、その点周りで床反力の垂直成分が作るモーメントは零となる。この性質によるとFig.1のCoPの位置 P_{CoP} は、

$$P_{CoP} = \frac{F_T \ell - F_H \ell}{F_T + F_H}, \quad (11)$$

で表現できる。 P_{CoP} の原点は足部中央すなわち足関節としている。分母の $F_T + F_H$ は全体重に相当し、直立姿勢維持のように胴部の動きが小さくゆっくりな場合は一定と考えることができる。そこで、定数 K_w を

$$K_w = \frac{\ell}{F_T + F_H}, \quad (12)$$

のように定義し、上式に代入すると

$$P_{CoP} = -K_w(F_H - F_T). \quad (13)$$

となる。この関係を利用し、さらに床反力中心を目標位置 P_d に制御できるように式(7)を書き直す

$$\begin{aligned} \tau = & -K_d \dot{\theta} + K_p(\theta_d - \theta) \\ & + K_f' \int (P_d - P_{CoP}) dt. \end{aligned} \quad (14)$$

となる。ここで $K_f' = K_f / K_w$ である。

両脚支持期では、床反力中心の位置 P_{CoP} は四つの接地点における床反力の垂直成分 $F_{RO}, F_{RI}, F_{LO}, F_{LI}$ を用いて次のように計算できる。

$$\begin{aligned} P_{CoP} = & -\frac{F_{RO}}{F_{all}}(x_f + \ell_f) - \frac{F_{RI}}{F_{all}}(x_f - \ell_f) \\ & + \frac{F_{LI}}{F_{all}}(x_f - \ell_f) + \frac{F_{LO}}{F_{all}}(x_f + \ell_f) \end{aligned} \quad (15)$$

$$F_{all} = F_{RO} + F_{RI} + F_{LI} + F_{LO}. \quad (16)$$

ここで、下付き添え字 RO, RI, LI および LO はそれぞれ接地点の位置、すなわち右外側、右内側、左内側および左外側を表し、また ℓ_f は足関節位置から同じ足の接地点までの距離、 x_f は二つの足関節位置の midpoint から各足関節までの距離である。なお、 P_{CoP} の座標系の原点は左右の足関節の midpoint である。

3.2.2 重心運動に対する座標系

直立姿勢のモデルFig.1においては、胴部の重心の軌道は足関節を中心とする円弧を描く。したがって、一般化座標を足関節の角度とすれば足関節のトルクをその一般化力と定義できた。

本稿で考えている両脚支持期の運動の場合も運動自由度が1のため、一次元の座標系として表現できる。しかし、重心の軌道は歩隔によって変化し、必ずしも円弧になるとは限らない。し

たがって、その軌道を表現する座標系を適切に選ぶ必要がある。

軌道上における重心の座標を ϕ とおく。 ϕ の定義には、重心の水平座標や軌道上での弧の長さなど、幾通りも表現方法がある。ここでは、直立姿勢モデルでの制御の自然な拡張となるよう床面に対して垂直な方向からの上体重心の角度で定義する。

$$\phi = \arctan \frac{x_G}{y_G}. \quad (17)$$

ここで、 (x_G, y_G) は左右の足関節の midpoint を原点とした直交座標系における上体重心座標である。この定義によると、もし歩幅が股関節間の距離と等しく重心軌道が円弧となる場合、直立姿勢モデルの定式化と一致する。さて、両脚の足関節角度 θ_{RA} 、 θ_{LA} を用いると、重心座標は

$$x_G = 2\rho \cos \frac{\theta_{RA} + \theta_{LA}}{2} \sin \frac{\theta_{RA} - \theta_{LA}}{2} \quad (18)$$

$$y_G = 2\rho \cos \frac{\theta_{RA} + \theta_{LA}}{2} \cos \frac{\theta_{RA} - \theta_{LA}}{2} \quad (19)$$

のようにかける。ここで、 ρ は

$$\rho = \frac{2m\ell + ML}{2(2m + M)}. \quad (20)$$

を満たす定数、 M および m は胴部および脚部の質量である。これより

$$\frac{x_G}{y_G} = \tan \frac{\theta_{RA} - \theta_{LA}}{2} \quad (21)$$

が得られるが、式 (17) を比較することにより、 ϕ は

$$\phi = \frac{\theta_{RA} - \theta_{LA}}{2}. \quad (22)$$

で与えられることになる。この新しく定義した重心軌道上の一般化座標系に対し、その軌道の接線方向に働く一般力を τ_ϕ を式 (7) との類似性より

$$\begin{aligned} \tau_\phi &= -K_d \dot{\phi} + K_p(\phi_d - \phi) \\ &\quad + K_f \int (P_d - P_{CoP}) dt \end{aligned} \quad (23)$$

と定義すれば、 CoP はその目標値に制御できると期待できる。

3.2.3 トルクの分配

式 (23) で定義された一般化力 τ_ϕ を実現するように、各関節トルクをいかに生成するかについて考える。それには、重心位置の変位と関節変位を結びつけるヤコビ行列を利用する。

重心位置の変位を $\Delta\phi$ 、関節角度の変位を $\Delta\theta$ ($\theta = [\theta_{RA}, \theta_{RH}, \theta_{LH}, \theta_{LA}]^T$) とする。ここで、下付添え字 RA, RH, LH, LA は関節を区別し、それぞれ右足関節、右股関節、左股関節、左足関節を表す。両者の関係はヤコビ行列 $\mathbf{J}(\theta)$ によって

$$\Delta\theta = \mathbf{J}(\theta)\Delta\phi. \quad (24)$$

と書ける。

前項の一般化座標の定義に従うと、このヤコビ行列 $\mathbf{J}(\theta)$ は以下のように計算できる。まず、式 (22) により

$$\dot{\phi} = \frac{\dot{\theta}_{RA} - \dot{\theta}_{LA}}{2} \quad (25)$$

が得られる。また、幾何学的な拘束より

$$-\theta_{RA} + \theta_{RH} + \theta_{LH} - \theta_{LA} = \pi \quad (26)$$

であるため、これを微分して

$$-\dot{\theta}_{RA} + \dot{\theta}_{RH} + \dot{\theta}_{LH} - \dot{\theta}_{LA} = 0 \quad (27)$$

となる。また閉リンク系より右股関節の座標 (x_{RH}, y_{RH}) に対し

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{RH} \\ y_{RH} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -x_f + L \sin \theta_{RA} \\ L \cos \theta_{RA} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x_f - L \sin \theta_{LA} - 2\ell_B \sin(\theta_{LH} - \theta_{LA}) \\ L \cos \theta_{LA} - 2\ell_B \cos(\theta_{LH} - \theta_{LA}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (28)$$

と 2 通りの記述ができ、これを微分して

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} -L\dot{\theta}_{LA} \cos \theta_{LA} - 2\ell_B(\dot{\theta}_{LH} - \dot{\theta}_{LA}) \cos(\theta_{LH} - \theta_{LA}) \\ -L\dot{\theta}_{LA} \sin \theta_{LA} + 2\ell_B(\dot{\theta}_{LH} - \dot{\theta}_{LA}) \sin(\theta_{LH} - \theta_{LA}) \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} L\dot{\theta}_{RA} \cos \theta_{RA} \\ -L\dot{\theta}_{RA} \sin \theta_{RA} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (29)$$

を得る。四つの変数 $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_{RA}, \dot{\theta}_{RH}, \dot{\theta}_{LH}, \dot{\theta}_{LA}]^T$ について式 (25)、式 (27)、式 (29) の 4 式を解くと

$$\dot{\theta} = \frac{2}{J_1 + J_3} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_1 - J_2 \\ J_2 - J_3 \\ -J_3 \end{bmatrix} \dot{\phi} = \mathbf{J}(\theta)\dot{\phi} \quad (30)$$

$$J_1 = 2\ell_B \sin \theta_{LH} \quad (31)$$

$$J_2 = L \sin(\theta_{LH} + \theta_{RH}) \quad (32)$$

$$J_3 = 2\ell_B \sin \theta_{RH}. \quad (33)$$

となる。このヤコビ行列を用いて、一般化力 τ_ϕ と関節トルク $\tau = [\tau_{RA}, \tau_{RH}, \tau_{LH}, \tau_{LA}]^T$ との関係が仮想仕事の原理より導かれる。

$$\tau_\phi = \mathbf{J}^T(\theta)\tau \quad (34)$$

この方程式を解くことにより、関節トルクが

$$\tau = (\mathbf{J}^T(\theta))^* \tau_\phi + (I - (\mathbf{J}^T(\theta))^* \mathbf{J}^T(\theta))\mathbf{p} \quad (35)$$

のように決定できる。ここで $(\mathbf{J}^T(\theta))^*$ は $\mathbf{J}^T(\theta)$ の一般化逆行列、 \mathbf{p} は任意の四次元ベクトルである。

3.3 平衡状態

もし股関節が $0 < \theta_{RH}, \theta_{LH} < \pi$ の範囲でのみ変化するならば、各関節角度は重心の座標 ϕ の関数として、 $\theta = \theta(\phi)$ と書ける。このとき「重心の軌道の接線は一般には床面に対して垂直な方向を向かない」ことに注意する。そして重心の運動方程式は ϕ を用いて

$$M(\theta)\ddot{\phi} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta, g, \mathbf{F}) = \tau_\phi. \quad (36)$$

と記述できる。ここで慣性に相当する $M(\theta)$ は正となり、 $C(\theta, \dot{\theta})$

は $\dot{\theta}_i (i=_{LH,LA, RH,RA})$ の二次の項となる。また G には重力だけでなく一定外力 $\mathbf{F} = (F_x, F_y)$ が含まれる。一方、一般化力 τ_ϕ により CoP の位置も変化し、その関係は

$$P_{CoP} = P(\boldsymbol{\theta})\tau_\phi + Q(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + R(\boldsymbol{\theta}, g, \mathbf{F}) \quad (37)$$

で表される。同じように $P(\boldsymbol{\theta})$ は正、 $Q(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$ は $\dot{\theta}_i$ の二次の項、 R には重力と一定外力 \mathbf{F} が含まれる。以上の2式に対し、制御入力 (23) により達成される平衡状態について考察する。解析を簡単にするため、床反力中心の目標値 P_d は定数と仮定し、また新しい変数 τ_f を

$$\tau_f = \int (P_d - P_{CoP}) dt \quad (38)$$

と定義する。運動方程式 (36) より

$$\begin{aligned} M(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\phi}} + C(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + G(\boldsymbol{\theta}, g, \mathbf{F}) \\ = -K_d\dot{\boldsymbol{\phi}} + K_p(\boldsymbol{\phi}_d - \boldsymbol{\phi}) + K_f\tau_f. \end{aligned} \quad (39)$$

が得られる。一方、 τ_f を微分すると

$$\dot{\tau}_f = P_d - P_{CoP} \quad (40)$$

となるが、 P_{CoP} に式 (37) を代入すると

$$\begin{aligned} \dot{\tau}_f = P_d - P(\boldsymbol{\theta})(-K_d\dot{\boldsymbol{\phi}} + K_p(\boldsymbol{\phi}_d - \boldsymbol{\phi}) + K_f\tau_f) \\ - Q(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) - R(\boldsymbol{\theta}, g, \mathbf{F}) \end{aligned} \quad (41)$$

となる。 $\boldsymbol{\phi}$ 、 $\dot{\boldsymbol{\phi}}$ および τ_f を状態変数とみなすと、上式で $\dot{\boldsymbol{\phi}} = \ddot{\boldsymbol{\phi}} = \dot{\tau}_f = 0$ とおくことにより、平衡状態 $\bar{\boldsymbol{\phi}}$ 、 $\bar{\tau}$ が得られる。ここで重要なことは、平衡状態では $\dot{\tau}_f = 0$ であることである。これは、式 (40) より $P_{CoP} = P_d$ を意味し、CoP がその目標値と一致する状態が平衡状態となる。

3.4 平衡状態の安定性

平衡状態の安定性を調べるため、式 (39) と式 (41) を平衡点 $(\bar{\boldsymbol{\phi}}, 0, \bar{\tau}_f)$ の周りで線形化する。

$$\bar{M}\Delta\ddot{\boldsymbol{\phi}} + \frac{\partial \bar{G}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \bar{J} \Delta\boldsymbol{\phi} = \Delta\tau_\phi \quad (42)$$

$$\Delta\dot{\tau}_f = - \left(\frac{\partial \bar{R}}{\partial \boldsymbol{\theta}} + \frac{\partial \bar{P}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \bar{\tau}_\phi \right) \bar{J} \Delta\boldsymbol{\phi} - \bar{P} \Delta\tau_\phi \quad (43)$$

ここで、 $\Delta\boldsymbol{\phi}$ および $\Delta\tau_\phi$ はそれぞれの平衡状態からの変位、 $\bar{M} = M(\bar{\boldsymbol{\theta}})$ 、 $\bar{J} = \mathbf{J}(\bar{\boldsymbol{\theta}})$ 、 $\bar{P} = P(\bar{\boldsymbol{\theta}})$ 、 $\frac{\partial \bar{G}}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \frac{\partial G(\bar{\boldsymbol{\theta}})}{\partial \boldsymbol{\theta}}$ 、 $\frac{\partial \bar{R}}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \frac{\partial R(\bar{\boldsymbol{\theta}})}{\partial \boldsymbol{\theta}}$ 、 $\frac{\partial \bar{P}}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \frac{\partial P(\bar{\boldsymbol{\theta}})}{\partial \boldsymbol{\theta}}$ である。線形化した方程式の可制御行列

$$M_c = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{\bar{M}} & 0 \\ \frac{1}{\bar{M}} & 0 & -\frac{1}{\bar{M}^2} \frac{\partial \bar{G}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \bar{J} \\ -\bar{P} & 0 & -\frac{1}{\bar{M}} \left[\frac{\partial \bar{R}}{\partial \boldsymbol{\theta}} + \frac{\partial \bar{P}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \bar{\tau}_\phi \right] \bar{J} \end{bmatrix} \quad (44)$$

がフルランクになれば、例えば LQ 理論により Riccati 方程式

の解を用いて適切なフィードバックゲイン K_p 、 K_d および K_f を決めることにより、平衡点は安定化できる。可制御行列の行列式は

$$\bar{\tau}_\phi = K_p(\boldsymbol{\phi}_d - \bar{\boldsymbol{\phi}}) + K_f \bar{\tau}_f = \bar{G} \quad (45)$$

を用いると

$$|M_c| = \frac{1}{\bar{M}^3} \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\theta}} (\bar{P} \bar{G} + \bar{R}) \bar{J} = \frac{1}{\bar{M}^3} \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\phi}} (PG + R) \Big|_{\boldsymbol{\phi}=\bar{\boldsymbol{\phi}}} \quad (46)$$

となる。ここで可制御行列の行列式 (46) が零と仮定すると矛盾が起きることを示す。式 (37) の τ_ϕ に式 (36) を代入し、(37) を平衡点のまわりで線形化すると

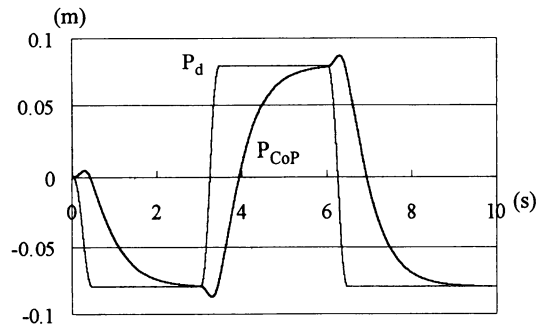
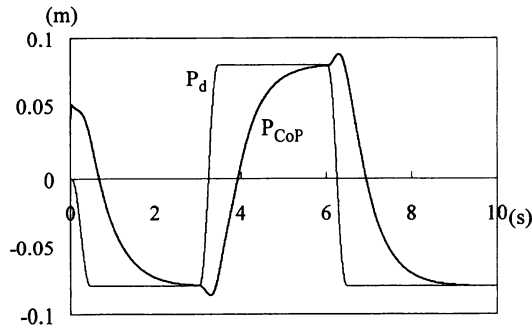
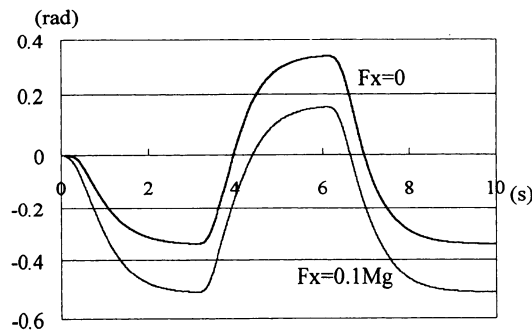
$$\Delta P_{CoP} = PM\Delta\ddot{\boldsymbol{\phi}} + \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\phi}} (PG + R) \Big|_{\boldsymbol{\phi}=\bar{\boldsymbol{\phi}}} \Delta\boldsymbol{\phi} \quad (47)$$

となる。いま平衡状態 $\bar{\boldsymbol{\phi}}$ から一定の速度で変位が起きた場合を考える。この場合加速度 $\Delta\ddot{\boldsymbol{\phi}}$ は零とみなせる。また、式 (46) を零と仮定したため、結局 $\Delta P_{CoP} = 0$ となる。これは $\boldsymbol{\phi}$ が等速で変位しても床反力中心は同じ場所にとどまることを意味する。この現象は重心が垂直に動くような場合には可能であるが、前節の最初で述べたように一般には重心軌道の接線は床面に対して垂直な方向は向かない。それゆえ矛盾が生じ、可制御行列はフルランクで線形システムは可制御となる。

4. シミュレーション

次章で行う実験に基づき、パラメータを $M = 2.5$ 、 $m = 1.0$ 、 $m_f = 0.25$ 、 $L = 0.34$ 、 $\ell = 0.17$ 、 $\ell_B = 0.08$ 、 $\ell_f = 0.03$ 、 $K_d = 100$ 、 $K_p = 400$ 、 $K_f = 2,000$ のように設定した。初期姿勢として足を少し開いて直立した状態 $\theta_{RA} = \theta_{LA} = 0.05$ 、 $\theta_{RH} = \theta_{LH} = \frac{\pi}{2} + 0.05$ を与える。10秒間のうちに CoP を左側、右側そしてふたたび左側に振ってそこに保つ動作を目標動作とした。一般化力 τ_ϕ を式 (23) により決定し、それを式 (35) により各関節に分配する。このとき足部が回転しないよう足関節トルクの制限を考慮した。

比較のため、外力が加わらない場合 ($F_x = F_y = 0$) と水平方向に外力が加わる場合 ($F_x = 0.1Mg$ 、 $F_y = 0$) に対してシミュレーションを行った。CoP の目標軌道とシミュレーションによる結果について、外力なしの場合を Fig. 3 に、水平外力が加わる場合を Fig. 4 に示す。外力のあるなしにかかわらず同じような軌道が初期の応答を除き得られている。しかし、両者の差は Fig. 5 に示す重心の角度 ϕ の違いとして現れる。外力が働かない場合、 ϕ は 0 に対して対称な軌道となる。しかし、水平外力が加わる場合は外力に対抗する方向にバイアスがかかり、全体的に傾いた状態を中心に上体の移動が行われている。この上体の軌道変化は、その目標軌道を調節したわけではなく、床反力中心を被制御量として制御した結果として自然に現れたものであることに注意する。

Fig. 3 CoP position for $F_x = 0$ Fig. 4 CoP position for $F_x = 0.1 Mg$ Fig. 5 Comparison of sway angle ϕ

5. ロボットによる実験

最後にロボットを用いた実験により理論の検証を行った。ロボットは胴部と大腿部、下腿部、足部からなる2本の脚部で構成されている。地上から股関節までの高さは直立時でおおよそ40 [cm]で股関節間の距離は16 [cm]、足幅は6 [cm]である。自由度は股関節に3自由度、膝関節に1自由度、足関節に2自由度あるが、運動を前額面に限定するため、股関節および足関節のピッチおよびヨー軸周りの自由度は機械的に固定した。さらに、足部の左右両側に均等に体重がかかり、 $F_{RI} = F_{RO}$ および $F_{LI} = F_{LO}$ となるよう足関節は自由関節とした。結果的に股関節のトルクのみで重心の移動を行うことになる。全重量はおおよそ5.0 [kgw]である。関節角度は、モータに取り付けられたエンコーダにより計測する。また足部の裏側四隅に小型ロードセルを取り付けて床反力を計測する。

実験でのロボットの初期姿勢には、足関節間の距離が24 [cm]

となるような少し足を開いた状態を与えた。CoPの目標軌道は、CoPを左側、右側に振ってから中央に戻す動作として与えた。フィードバック・ゲインはシミュレーションと同じ $K_d = 100$, $K_p = 400$, $K_f = 2,000$ とした。

実験は水平な床面と、一定外力が加わることと等価な斜面の2通りを行った。それぞれの実験の様子を Fig. 6 (a), (b) に示す。Fig. 7 は水平な床面における実験、Fig. 8 は斜面における実験での床反力中心の目標値と実測値である。斜面の実験では最初の5秒間で水平な状態から傾斜を作り、また最後の5秒間で傾斜面をもとの水平な状態に戻している。それらの点での違い以外は、シミュレーションと同様、傾斜角度つまり外力があるなしにかかわらず、床反力中心は目標値におおよそ追従し、両者で似たような軌道が得られる。ただシミュレーションと違い、バックラッシュの影響で傾きの方向が逆転した直後に振動が起きている。重心の傾き角度 ϕ はシミュレーションと同様、傾斜面では鉛直方向を常に向くよう斜面に対して相対的に傾いている (Fig. 9)。この振る舞いも重心の目標軌道を傾斜角度に応じて修正しているわけではなく、床反力中心を制御した結果、自然とあらわれてくることを付け加えておく。

この実験では脚を開いている分、平衡がとりやすく倒れにくい。そこでより平衡維持が難しい脚を平行にした状態で同様の実験を行った。紙面の関係でここでは示さないが、同じ様な結果が得られている。

6. 討 論

本稿では、両脚支持期における前額面内での重心移動について考察してきた。両脚支持期は歩行サイクルの中でも占める割合は比較的小さく、走行時には現れない。そういった意味では両脚支持期の制御は応用範囲が幾分限定される。両脚支持期の制御を積極的に扱った研究は、両脚の拘束により低次元化するダイナミクスでの固有値設定問題として安定化制御を試みる研究 [9]、両脚支持期の動作を動的成分と静的成分に分けた力学解析に基づいて制御を行う研究 [10]、両脚支持期に冗長となる関節トルクを歩行系の転倒・滑り防止の拘束条件のもとでのトルク和最小条件で実験的に各関節に分配する研究 [11] などがある。ところが、単脚支持期に比べてその数は少なく、時には支持脚の交換が短時間で行われると仮定して無視されることもある [12]。しかし、歩行の開始時および終了時は必ず両脚支持であること、また単脚支持で失われた平衡が両脚を接地することによって回復しやすいことなどから、あながち軽視されるべき問題ではないと考える。本稿では、足先など位置の制御を必要とせず重心の移動のみを取り扱える例として、単純な両脚支持期の重心移動を扱っている。一定な外力が働く場合に関して CoP の目標値への収束性を局部的にはあるが保証できているのは、対象とする動作を重心の移動のみが問題となる簡単なものとしたことが要因の一つとしてあげられる。

環境の変化の表現として、本稿ではリンク重心に働く未知の外力を考えた。外力は本稿で提案する手法の示す収束性よりも十分変化が遅いものである必要がある。また、立位制御おける式 (8)~(10) のように、両脚支持期の重心移動の場合にも外力の大きさ・方向にはゲインによる制限が加わる。しかし、その範

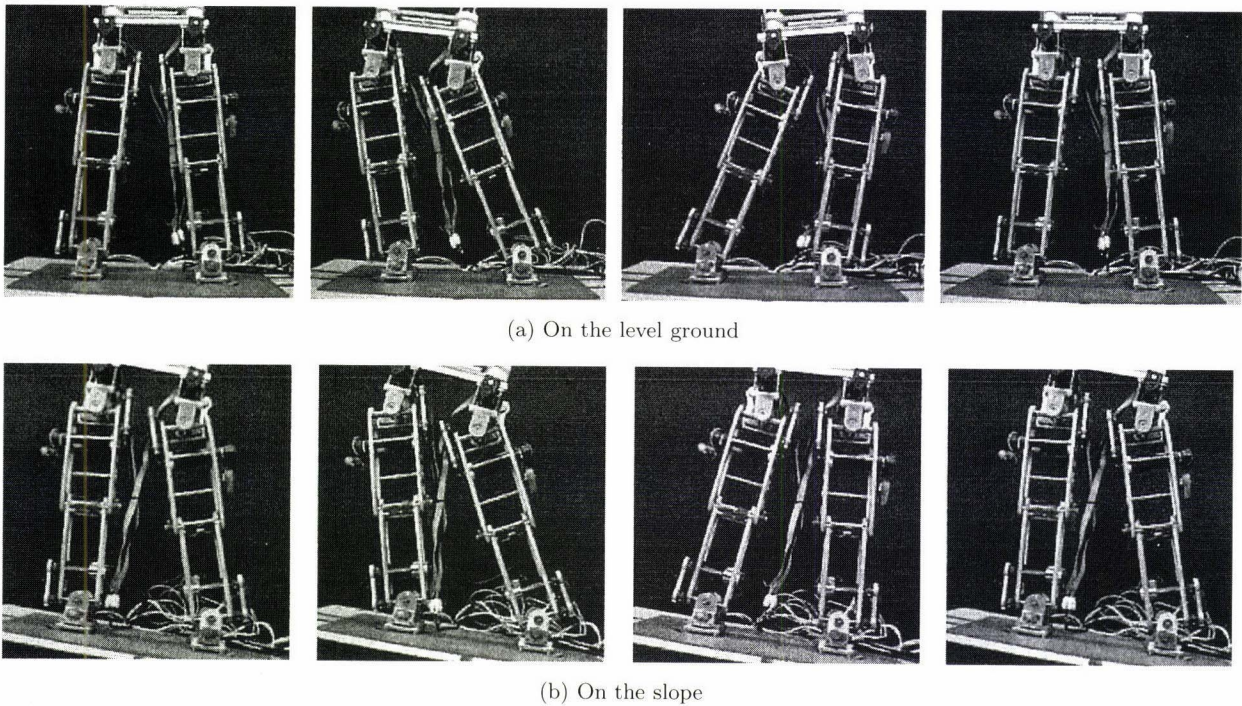


Fig. 6 Robot behaviors in the experiment

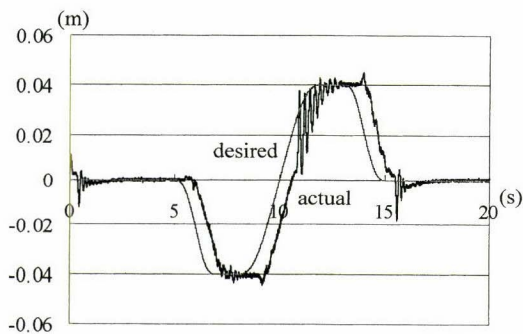


Fig. 7 Desired and actual CoP trajectories from the experiment on the level ground

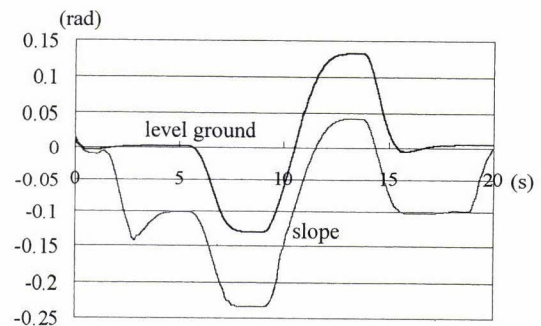


Fig. 9 Comparison of phi trajectories between two experiments

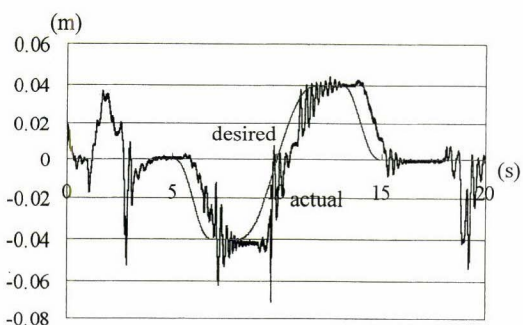


Fig. 8 Desired and actual CoP trajectories from the experiment on the slope

囲内ならば未知の外力に条件はなく、一般性のある表現となっている。実験では角度が未知な傾斜面という形で環境変化を与えたが、重力の方向が見かけ上変化したものと考えれば、この環境変化も本稿での表現で十分記述できるものである。

ZMP 規範に基づいた制御では、慣性力をうまく発生させることにより平衡を維持させるものである。しかし、慣性力の計算は慣性モーメント等のパラメータ値に依存してしまい、モデル化誤差の影響が ZMP の位置に直結してしまう。一方、本手法では、歩行系のパラメータ値は制御則そのものには必要とされず、ZMP の実測値のフィードバックにより目標値への制御を達成している。つまり、ZMP 規範に基づいた手法は本質的には軌道計画問題であるのに対し、本手法は CoP のレギュレータ問題であり、上体の目標軌道を用いないこと、それに伴いモデル化誤差の影響が少ないことが違いとなって現れる。文献 [4]~[6]でも、ZMP 実測値のフィードバックを提案し、実際にロボットに実装することで有効性を確認しているものもあるが、数式を用いた収束性の解析は行われていない。したがって、CoP の振る舞いが議論されていることが本研究の特徴となる。

ZMP 規範による手法は構成上、フィードフォワード的な運動を可能とするが、本手法は基本的には誤差駆動のシステムである。よって、素早い運動の実現については、ZMP 規範による制

御と組み合わせるなど今後の工夫が必要である。

7. おわりに

本稿では、環境に変化がある場合の両脚支持期の重心移動について考察した。従来の方法の一つでは、重心の目標軌道を設計しそれに対する追従制御を行うため、環境が変化しても目標を達成するためには、その目標軌道を環境に合わせて修正する必要があった。本稿では、重心を目標軌道を制御するのではなく、床反力中心を被制御量にする方法を提案した。上体位置の目標軌道を使用しない代わりに、床反力中心に基づいた力の制御により平衡維持が行われる。一般に位置と力は同時に制御できないため、ここでは力を制御し、その制御の結果として位置すなわち運動パターンが現れる。それは環境変化に対する上体の振る舞いの変化として観察される。

制御方法に対する安定性について議論したが、そこでは床反力中心の目標値が一定であると仮定してきた。厳密には軌道に対する追従性は保証されていないが、一定目標値に対する局所安定性により、シミュレーションおよび実験で利用した目標軌道に対しては遅れながらも追従することが示せた。このとき文献[15]で指摘されているように、ZMP すなわち床反力中心の応答は逆応答を示す。しかし、人間が重心を横方向に移動する場合にも逆応答が見られ[16]、動作としては自然であると考えられる。

この制御方法の問題点として、追従性がやや遅いことがある。今後はこの改善を考えると同時に、このアプローチにそった足踏み動作および歩行の実現を目指す。

参考文献

- [1] M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla and D. Stokic: Biped Locomotion (Scientific Fundamentals of Robotics 7). Springer-Verlag, 1990.
- [2] 高西淳夫, 石田昌巳, 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, vol.3, no.4, pp.325-336, 1985.
- [3] K. Nagasaka, H. Inoue and M. Inaba: “Dynamic walking pattern generation for a humanoid robot based on optimal gradient method,” Proc. of the 1999 IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, pp.VI908-VI913, 1999.
- [4] 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, pp.1321-1326, 1998.
- [5] Q. Huang et al.: “Balance control of a biped robot combining off-line pattern with real-time modification,” Proc. of 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3346-3352, 2000.
- [6] J.H. Park and H.C. Cho: “An on-line trajectory modifier for the base link of biped robots to enhance locomotion stability,” Proc. of 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3353-3358, 2000.
- [7] A. Goswami: “Postural stability of biped robots and the foot-rotation indicator (FRI) point,” the International Journal of Robotics Research, vol.18, no.6, pp.523-533, 1999.
- [8] 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.
- [9] 成清辰生, 小林基, 伊藤正美, 細江繁幸: “二足歩行系の両脚支持期の制御について”, 電気学会論文誌, C, vol.103, no.12, pp.281-286, 1983.
- [10] 五十嵐越郎, 野飼亨: “二足歩行運動における両脚支持相の力学解析と制御”, 日本ロボット学会誌, vol.7, no.3, pp.142-150, 1989.
- [11] 佐野明人, 古荘純次, 伊神也寸志: “両脚支持期における 2 足歩行システムのトルク分配制御”, 計測自動制御学会論文集, vol.26, no.9, pp.1066-1073, 1990.
- [12] F. Gubina, H. Hemami and R.B. McGhee: “On the dynamic stability of biped locomotion,” IEEE Trans. on Biomedical Engineering, vol.BME-21, no.2, pp.102-108, 1974.
- [13] F.B. Horak and L.M. Nashner: “Central program of postural movements: adaptive to alerted support-surface configurations,” J. Neurophysiol, vol.55, no.6, pp.1369-1382, 1986.
- [14] 広瀬茂男, 塚越秀行, 米田完: “不整地における歩行機械の静的安定性評価基準”, 日本ロボット学会誌, vol.16, no.8, pp.1076-1082, 1998.
- [15] Napoleon, S. Nakamura and M. Sampei: “Balance control analysis of humanoid robot based on ZMP feedback control,” Proc. of the 2002 IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2437-2442, 2002.
- [16] G.M. Jones: ‘Posture,’ E.R. Kandel et al. eds., Principles of neural science (fourth edition). pp.816-831, McGraw-Hill companies, 2000.



伊藤 聡 (Satoshi Ito)

1968 年 12 月 10 日生。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、岐阜大学工学部助手、現在に至る。工学博士。計測自動制御学会、IEEE などの会員。(日本ロボット学会正会員)



浅野博紀 (Hironori Asano)

1980 年 12 月 8 日生。2003 年岐阜大学工学部機械システム工学科卒業、現在同大学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 (Haruhisa Kawasaki)

1949 年 6 月 27 日生。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、1990 年金沢工業大学教授。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、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。計測自動制御学会、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。(日本ロボット学会正会員)