

線形倒立振子モードを規範とする 凹凸路面上の動的2足歩行制御[†]

梶田秀司*・谷和男*

Dynamic Biped Walking Control on Rugged Terrain
Using the Linear Inverted Pendulum Mode

Shuuji KAJITA* and Kazuo TANI*

An experimental study of a biped robot is presented. A new scheme named "Linear Inverted Pendulum Mode" is utilized for controlling biped walking on rugged terrain. We developed a 6 d.o.f. biped robot "Meltran II" which has light weight legs and walks in a two dimensional vertical plane. After discussing the control systems for the support leg and the swing leg, we applied these control laws to the real robot and obtained following results.

1. Support phase dynamics of the biped robot under the proposed control law can be well represented by a linear model with a viscous term.
2. An adequate vertical speed at touchdown and a short duration of two-leg support after touchdown help smooth support leg exchange with a small loss of momentum.

Based on these results, a whole biped control system was implemented. In our experiment, biped walking with a half step period of 0.5-1.0 s and a half stride of 10-14 cm was realized on a flat floor. The maximum walking speed was 24 cm/s. Our robot also walked over a box of 3.5 cm height at a speed of 20 cm/s.

Key Words: biped robot, biped locomotion, dynamic walking

1. はじめに

人間や動物が行なうようなダイナミックな歩行運動をコンピュータ制御により実現しようという試みはすでに20年以上の歴史をもっている。その目的は高度な移動ロボットや義足の実現、人間の歩行の理解などさまざまであるが、歩行系のもつ複雑なダイナミクスや人間の歩行運動の巧みさは多くの研究者の興味を強く引きつけ、様々な制御手法の提案や実験がなされてきた^{1)~17)}。

2足歩行運動は複雑な非線形方程式に支配されるため、歩行を実現できる解を直接求めることは難しい。そこで、歩行の本質的な特徴を保ちつつ運動方程式を簡略化するさまざまな手法が提案され、2足歩行研究の一つ

の流れを作っている。たとえば、宮崎、有本¹¹⁾は特異摂動法を用いた解析により二足歩行機械のダイナミクスの数理的な構造を明らかにした。古井ら⁴⁾は局所フィードバックによって現れる支配モードを用いることにより遊脚質量の効果を含めた低次元モデルが導出できることを示している。

われわれは前報⁶⁾において sagittal plane 内^(#1)を運動するロボットの胴体運動に拘束制御を加えることによってシステムの線形化と低次元化を同時に行なう新しい手法を提案した。従来の低次元化手法と比較すると、われわれの手法は大域的な線形化ができるので大きな歩幅の運動にも適用可能のこと、凹凸面上の歩行であっても線形低次元化モデルが得られること、直交座標系の方程式が得られるため理論の見通しがよいことなどの特徴をもっている。一方、問題点としては無質量脚モデルから

† 第29回計測自動制御学会学術講演会で発表(1990.7)

* 機械技術研究所 つくば市並木1-2

* Mechanical Engineering Laboratory, Tsukuba

(Received December 6, 1994)

(Revised March 31, 1995)

(注1) 鉛直軸とロボットの進行方向がつくる二次元平面を sagittal plane と呼ぶ

出発しているために遊脚質量の効果が考慮されておらず、脚質量の比率の高いシステムに適用した場合の結果が明らかではない点が上げられる。

本論文の目的は、実際の2足歩行ロボットを用いた実験によって、理論の有効性を示すとともにその適用限界を見定めることにある。まず2章で線形倒立振子モードの原理を簡単に説明するとともに、これにもとづく歩行制御の概要を述べる。3章では試作した2足歩行ロボットについて説明し、4, 5, 6章でこれを用いた種々の実験とその結果を報告する。7章では本論文で得られた知見と今後の課題を総括する。

2. 線形倒立振子モードによる制御

2.1 線形倒立振子モードの原理

まずははじめに簡単なモデルを使って線形倒立振子モードの原理と特徴を説明しよう。Fig. 1 の倒立振子モデルは質量 m の質点と可変長の脚(長さ r , 無質量)からなり、入力として支持点まわりのトルク u と脚の伸縮力 f をもつ。

いま、支持点まわりの回転を自由とし($u=0$)、脚伸縮力 f だけを使って質点に直線運動を行わせる制御を考えてみよう。このとき、質点に作用するのは脚伸縮力 f と重力 $-mg$ であり、その合力の水平成分 F_x と、鉛直成分 F_y はそれぞれ次のように表現できる。

$$F_x = f \sin \theta = (x/r)f \quad (1)$$

$$F_y = f \cos \theta - mg = (y/r)f - mg \quad (2)$$

ここで x, y は支持点を原点とした質点の水平、垂直位置である。質点が直線運動をするためには運動中 F_x と F_y が常に一定比を保つことが必要である。

$$F_x : F_y = 1 : k \text{ (一定)} \quad (3)$$

ただし k は質点がえがく軌道の傾きに一致しなくてはならない。 $(1), (2)$ 式を (3) 式に代入し、 f について解けば次式を得る。

$$f = \frac{mgy}{y - kx} \quad (4)$$

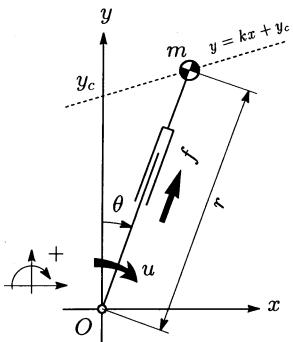


Fig. 1 Inverted pendulum model

この入力により質点がえがく軌道を次式であらわそう。

$$y = kx + y_c \quad (5)$$

y_c は軌道の y 切片である。この関係を使うと (4) 式はさらに簡単に表現できる。

$$f = \left(\frac{mg}{y_c} \right) r \quad (6)$$

適切な初期条件のもとで、このように脚長 r に比例した脚伸縮力 f を与えれば質点は直線運動を行う。

軌道上の質点の運動は (6) 式を (1) 式へ代入し、 $F_x = m\ddot{x}$ の関係を使えば次式のように求められる。

$$\ddot{x} = \frac{g}{y_c} x \quad (7)$$

(7) 式の意味を考えるために、 $k > 0$ の軌道上を倒れてゆく倒立振子と、 $k < 0$ の軌道上を倒れてゆく倒立振子の運動を比較してみよう(Fig. 2)。ここで両者の軌道の y 切片 y_c は等しく、また両者は同じ水平位置から倒れはじめるものとする。一見すると、重心を上げながら倒れてゆく倒立振子のほうがゆっくりと運動するよう想像される。ところが質点の水平変位に着目すれば、二つの水平運動は完全に一致するのである。これは k がいかなる値であっても成り立つ。

われわれは前報⁶⁾において、胴体部を剛体とし一般的な脚構造(ただし無質量)をもつ2足歩行ロボットモデルに対して適切な制御を加えれば、上記の場合とまったく同様の運動が生ずることを示した。2足歩行の非線形なダイナミックスがこのような方法でなんらの近似も使うことなく線形化できることは從来知られていなかった。本研究ではこのような運動パターンを「線形倒立振子モード」と呼ぶ。

2.2 歩行制御への応用

つぎに線形倒立振子モードを利用して凹凸路面上の2足歩行の制御方法を説明しよう(Fig. 3)。歩行する路面の凹凸ははらかのセンサすでに計測されているものとし、その上に適切な着地点を設定する(黒い三角印)。各着地点より高さ y_c の垂線を立てその先端を結んだ直

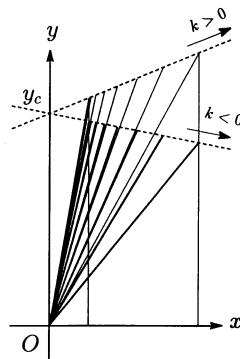


Fig. 2 Linear inverted pendulum mode

線(破線)を考え、この直線上を重心が運動するように脚を制御する。ただし歩行中はつねに一脚で胴体を支持し、支持脚の切り換えは瞬間的におこるものとする(Fig. 3 の点 a, c, e)。

軌道の傾きは各支持脚相の途中、着地点の真上(点 b, d)で不連続に変化する。点 b, d は特異点^(注2)であり、ここを通過する際に何が起こるかを予測することはできないが、ここでは、これらの変曲点を通過しても重心の水平運動は影響を受けず(7)式に従うと仮定する(仮定1)。

仮定1が成立するならば、ロボットの歩行速度は支持脚切り換えのタイミングを変化させることで制御できる。Fig. 4 にその原理的なイメージを示そう。(a)ではつぎの支持脚を遅めに着地した結果、つぎの一歩は現在に比べ速い運動となる。(b)では逆につぎの支持脚を早めに着地した結果、つぎの一歩は現在よりも遅い運動となる。

定量的な関係を示すため支持脚を切り換える瞬間の重心の水平位置を x_f 、歩幅を w としよう^(注3)。ここで、脚切り換えの瞬間に重心の速度が変化しないことを仮定する(仮定2)。切り換え前後の重心の運動と x_f および w の間には次式の関係が成立する。

$$x_f = \frac{y_c}{gw} (E_2 - E_1) + \frac{w}{2} \quad (8)$$

E_1 と E_2 はそれぞれ脚切り換えの前と後の運動に対応する特定のスカラ量であり、「軌道エネルギー」^(注4)と呼ぶ。ある支持脚相の運動に関する軌道エネルギーは運動中の任意の瞬間の位置 x と速度 \dot{x} より次式のように計算できる^(注5)。

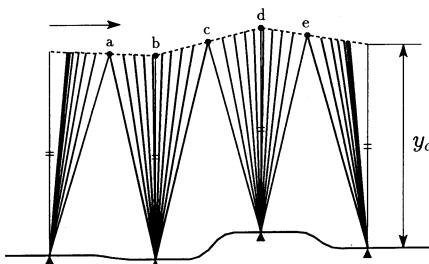


Fig. 3 Walking control in the linear inverted pendulum mode

(注2) Fig. 1 の倒立振子モデルの場合、これらの特異点では f が無限大となってしまう。

(注3) 本論文では2足歩行研究の慣例にしがたい、一方の脚の着地から他方の脚の着地までを「一步」とし、その時間を「周期(period)」、着地点間の距離を「歩幅(step length)」と呼ぶ。

(注4) (9)式を時間に関して微分すれば(7)式を得るから、両者は等価であることがわかる。

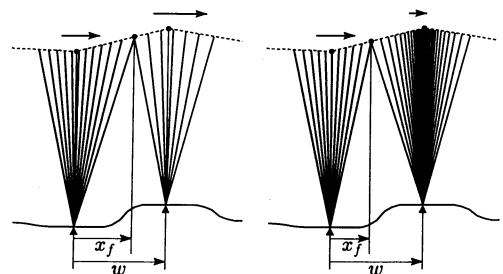
$$E = -\frac{g}{2y_c} x^2 + \frac{\dot{x}^2}{2} \quad (9)$$

歩行速度の制御は希望する速度に対応する運動パターンから一步ごとの軌道エネルギーを算出し、(8)式により支持脚相の切り換え条件を決定することに帰着される。

以上の議論でわれわれは二つの重要な仮定を置いた。仮定1は拘束直線上の変曲点を通過するときのロボットの重心の挙動、仮定2は脚切り換え時の挙動についてである。これらの仮定の妥当性はそれぞれ4章、5章における実験によって検証される。さらに、この制御法を実際のロボットに適用するに際しては、脚質量を有するロボットが無質量脚のモデルと同様にふるまうことが前提となる。これは以下の実験すべてを通じて検証されることになる。

3. 実験装置

線形倒立振子モードによる歩行制御を実証するためにわれわれは簡単な構造の2足歩行ロボットを試作した。「Meltran II」は各脚3自由度、全6自由度をもつ、高さ約40 cm、重量4.7 kgの比較的小型の2足歩行ロボットである(Photo. 1)。脚は平行リンクで構成され、胴体に配置された減速器つきのDCサーボモータ(11 W、減速比1/69.3)により駆動される。また、足首は膝付近に配置されたDCサーボモータ(6.4 W、減速比1/34.7)により駆動される。このような設計によって脚の軽量化と胴体部への質量集中をねらった。Fig. 5にMeltran IIの各リンクの重心位置とロボット全体の重心位置を示す。重心の脇に記された数値は各リンクが全質量に占める割合(%)を示す。胴体の質量が全体に占める割合は52%と従来の人間形の歩行ロボットに比べ大幅な質量の集中が達成されている^(注5)。



(a) Late touchdown leads to acceleration
(b) Early touchdown leads to deceleration

Fig. 4 Speed control by support leg exchange

(注5) たとえば美多らが開発した6自由度の人間型歩行ロボットでは胴体質量が全質量に占める割合は23%となっている⁽¹⁰⁾。

足部は足首を中心に前後方向に対称な形状をもち、その長さは8cmである。また左右方向には静的な安定を保つため内側へ張り出した幅の広い構造になっており、これによって、歩行運動は sagittal plane 内に拘束されたものとなる。しかし、このような構造にしたため遊脚の復帰時には支持脚足部に衝突しないように4cm程度足をもち上げなくてはならない。

Fig. 6 にロボットの制御系の概要を示す。制御を高速

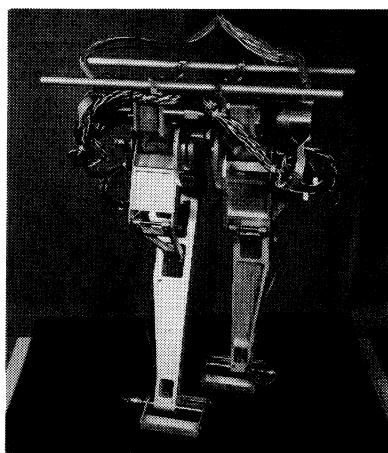


Photo. 1 Biped robot "Meltran II"

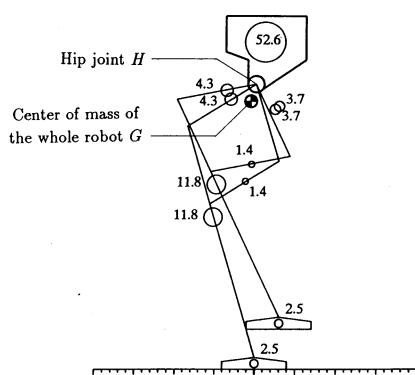


Fig. 5 Mass distribution (center of mass and proportion (percentage) to the whole robot)

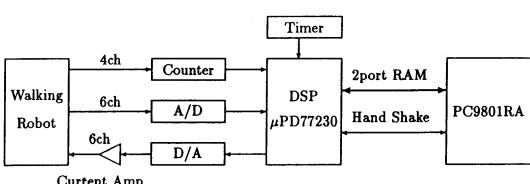


Fig. 6 Control system

に行うためにDigital Signal Processor (NEC μ PD77230, 6.7 MHz)を使用した。電流制御が可能なモータ駆動用アンプを用いたのでDSPから各関節のトルクを直接指令することができる。DSPとホスト計算機(PC-9801 RA, i386+387, 16 MHz)とは共有メモリとハンドシェーク信号を用いて制御に必要なデータをやりとりする。

4. 支持脚相の制御

4.1 脳体運動の制御

現実のロボットにより線形倒立振子モードに近い運動を行わせる方法としては、ロボット全体の重心位置を制御するのがもっとも有望だと考えられる^(注6)。しかし、この場合遊脚を含めてロボット全体の運動を考慮しなくてはならず、制御が複雑になってしまう。一方、Meltran IIでは胴体質量の比率が高いため、歩行中の重心はほぼ腰関節付近に存在すると考えられる(Fig. 5 参照)。そこでわれわれは腰関節の位置を制御することにした。

制御のために、支持脚足首を原点とした直交座標系をとり、腰関節(Hip joint)の位置を点 $H(x_h, y_h)$ であらわす(Fig. 7)。足部は前後の爪によって路面上に支えられ、足部の法線が鉛直となす角度 α は既知であるとする^(注7)。制御目標は胴体の鉛直を保ちつつ点 H を次式の直線上に拘束することである。

$$y = kx + y_c \quad (10)$$

$$k = \begin{cases} k_1 & \text{if } x \leq 0 \\ k_2 & \text{if } x > 0 \end{cases}$$

2.2節で述べたように k_1, k_2 は路面の形状に合せて定められる(k_1 は一步前の k_2 に、 k_2 は一步後の k_1 に等しいこ

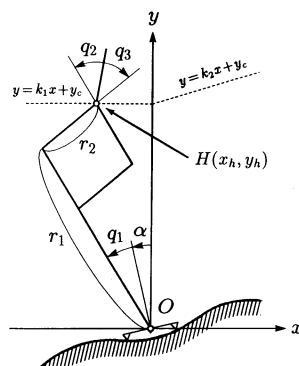


Fig. 7 Constraint control

(注6) 重心位置を陽に与えて歩行を制御する試みとしてはホップフィールド形ネットワークを利用した吳松らの研究⁸⁾がある。

(注7) 簡単のため本論文の実験では着地面が水平な路面 ($\alpha=0$) のみを用いた。

とに注意). また本論文ではすべての実験において $y_c = 34$ (cm) とした.

拘束制御を実現するために支持脚関節 q_2, q_3 を用いる. これらの関節にそれぞれ独立に位置制御(PID制御)をかけ, その目標値として拘束条件を満たす関節角度を与えた. q_2, q_3 の目標値 $q_{2\text{ref}}, q_{3\text{ref}}$ は足首関節角度 q_1 から簡単な幾何学的逆変換によってそれぞれつぎのように計算できる.

$$q_{2\text{ref}} = q_1 + \alpha \quad (11)$$

$$q_{3\text{ref}} = -\gamma(q_1 + \alpha) - \beta + \pi/2 \quad (12)$$

ここで,

$$\gamma(q) = -\cos^{-1} \left(\frac{-r_1 \sqrt{1+k^2} \cos(q+\beta) + y_c}{r_2 \sqrt{1+k^2}} \right)$$

$$\beta = \tan^{-1} k$$

ポテンショメータで計測される支持脚足首の角度 q_1 をもとに以上の式を 1 ms ごとに計算し, 支持脚膝関節と腰関節の目標角度とする.

4.2 拘束制御のもとでの自由運動

拘束制御を加えた実際のロボットの運動を計測し, それがどの程度無質量脚のモデルに一致するかを調べる. Meltran II を一脚支持状態とし, (11), (12)式の制御を加え, さらに支持足首を自由回転とする. もう一方の脚は実験の邪魔にならないように地面からもち上げた状態で胴体に対して固定し, 胴体と一緒に運動するようにする. この状態のロボットの胴体に手で適当な初速度を与えると, 足首が自由に回転するため胴体は拘束を保ちつつ初速度に応じた自由運動を行うことになる. このような自由運動の一例を Fig. 8 に示す. 図の向かって左から強く押して胴体に初速度を与え, ロボットが手から離れたあとの自由運動を 50 ms ごとに示した. このとき用いた拘束直線は破線で示されている.

傾きの異なる 4 種類の拘束直線を用い, さまざまな初

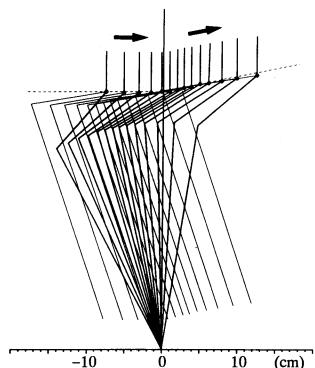


Fig. 8 Result of support phase control experiment
(1 picture/50 ms, $y_c=34$ (cm), $k_1=0, k_2=0.2$)

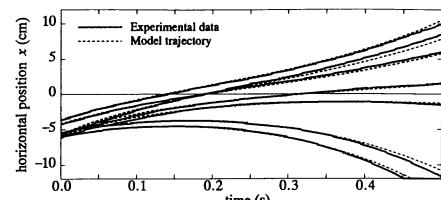
速度(7種類)を与えてロボットの運動を計測した. それぞれの実験結果を時間を横軸とり腰関節 H の水平変位を縦軸にとって示したものが Fig. 9(a)~(d)の実線である. この実験データに対して数種類のモデルを試した結果, 次式があてはまるを見いたした.

$$\ddot{x} = \frac{g}{y_{\text{exp}}} x - d_{\text{exp}} \dot{x} \quad (13)$$

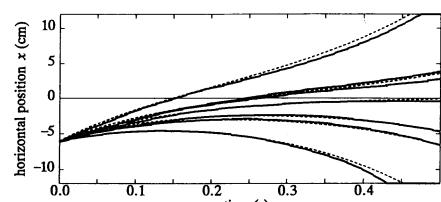
ここで, $y_{\text{exp}}, d_{\text{exp}}$ は実験から求めるべきパラメータである. Fig. 9(a)~(d)のデータからカーブフィッティングによって以下の推定値を得た.

$$y_{\text{exp}} = 32.2 \text{ (cm)}, d_{\text{exp}} = 1.8 \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

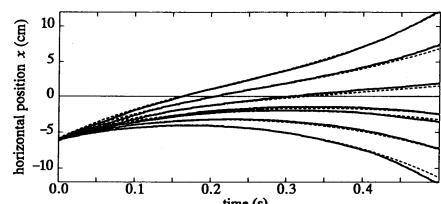
粘性項 $-d_{\text{exp}} \dot{x}$ はモータや減速器の摩擦, 拘束制御の誤差, 脚質量の影響などのさまざまな要因を含んでいる



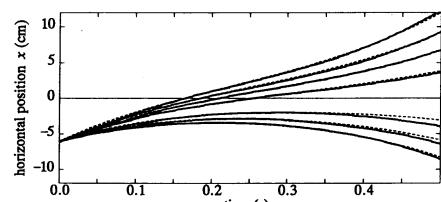
(a) Constraint $k_1=k_2=-0.2$



(b) Constraint $k_1=k_2=0.0$



(c) Constraint $k_1=k_2=0.2$



(d) Constraint $k_1=0.0, k_2=0.2$

Fig. 9 Horizontal motion of the hip joint

と考えられる。Fig. 9(a)～(d)に破線で示されているのがこのパラメータに基づくモデルの軌道である。データとモデルはよく一致しており、ロボットの水平運動が拘束直線の傾きに関係なく、同じモデルで近似できていることがわかる。さらに、折れ曲がった拘束直線を用いた場合(Fig. 9(d))もモデルとよく一致していることから、2.2 節で立てた「仮定 1：折れ曲がり点の通過は水平運動に影響を与えない」が成り立っていることもわかる。

なお、 x は平衡点を基準とした H の変位を表わしており、次式で与える。

$$x = x_h - x_{\text{offset}} \quad (14)$$

x_{offset} は拘束制御のもとでロボットが静的にバランスする平衡点の位置である。腰関節 H が真の重心位置ではないのでこの補正が必要となる。 x_{offset} は実測で 1.15 (cm) であり、以下の実験すべてでこの値を用いた。

4.3 胴体運動と遊脚運動の非干渉化

実際の歩行におけるロボットのダイナミクスは、遊脚を前方へ振り出す運動が加わるため、前節で同定されたものからずれてくる。そこで、遊脚の振り出し運動を外乱とみなし、これを打ち消すことを考える。この制御のためにこれまで自由回転してきた支持脚の足首トルクを用いる。足首トルクは胴体の運動に対して線形に作用するので⁶⁾、これを使えば運動の微調整をすることができる。遊脚の運動の影響と足首トルクの効果を考慮した支持脚相のダイナミクスはつぎのようになる。

$$\ddot{x} = \frac{g}{y_{\text{exp}}} x - d_{\text{exp}} \dot{x} + f_{\text{swing}} + \frac{1}{m y_{\text{exp}}} u_1 \quad (15)$$

f_{swing} は加法的な外乱として表わした遊脚運動の効果、 u_1 は支持脚の足首トルク、 m はロボット全体の質量を表わす。足首トルク u_1 は次式のように与える。

$$u_1 = k_p(x_{\text{ref}} - x) + k_d(\dot{x}_{\text{ref}} - \dot{x}) + k_l \sum (x_{\text{ref}} - x) \Delta t \quad (16)$$

ここで、 k_p 、 k_d 、 k_l はフィードバックゲイン、 Δt はサンプリング間隔 (1 ms) である。 x_{ref} 、 \dot{x}_{ref} は胴体運動の目標位置と速度であり、次式の規範モデルから計算する。

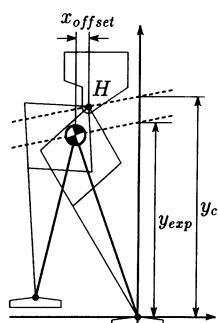


Fig. 10 Equivalent massless model

$$\ddot{x}_{\text{ref}} = \frac{g}{y_{\text{exp}}} x_{\text{ref}} \quad (17)$$

(16)式の制御が適切に動作していれば、遊脚がどのように運動しようと胴体の運動は(17)式の規範モデルに追従する。すなわち、Fig. 10 のように Meltran II を等価な無質量脚モデルで置き換えて良いことになる。

なお過大な足首トルクによってつま先あるいはかかとが床面から浮かび上ることを防ぐために、 u_1 は次式で飽和させる。

$$-u_{\max} \leq u_1 \leq u_{\max} \quad (18)$$

u_1 が飽和している間は(16)式の積分動作を停止して、積分器のワインドアップ現象を防ぐ。足首トルクの制限値 u_{\max} は平面上の歩行であれば次式で計算できる。

$$u_{\max} = m g r_0 \quad (19)$$

r_0 は足部の半分の長さ (4 cm) である。

5. 遊脚軌道の生成

歩行速度を制御するためには遊脚を適切なタイミングで正しい位置に着地させる必要がある。そこで本章では遊脚の軌道制御について考察する。

5.1 遊脚の水平運動計画

支持脚相と同様に遊脚の各関節には独立な位置制御を加え、適切な目標値を与えてその運動を制御する。遊脚軌道は胴体を基準とする直交座標系で計画・生成し、これを実時間で関節角の目標値に変換して制御を実現した。

ここではまず水平運動について考察する。Fig. 10 の等価モデルを使って、一步の運動をあらわそう(Fig. 11)。遊脚は支持脚相のはじまりと同時に地面から離れ、支持脚相の終了と同時に地面に着地しなくてはならない。ある支持脚相の持続時間を τ とすれば支持脚相のダイナミクス(17)式の解析解より次式がなりたつ。

$$x_f = x_i \cosh\left(\frac{\tau}{T_c}\right) + T_c v_i \sinh\left(\frac{\tau}{T_c}\right) \quad (20)$$

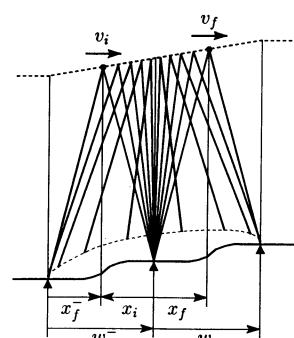


Fig. 11 Swing leg trajectory

$$v_f = \frac{x_i}{T_c} \sinh\left(\frac{\tau}{T_c}\right) + v_i \cosh\left(\frac{\tau}{T_c}\right) \quad (21)$$

ここで、 x_i, v_i は支持脚開始時の胴体位置と速度、 x_f, v_f は支持脚終了時の胴体位置と速度、 $T_c = \sqrt{y_{\text{exp}}/g}$ である。
(20), (21)式を τ に関して解けば次式を得る。

$$\tau = T_c \ln\left(\frac{x_f + T_c v_f}{x_i + T_c v_i}\right) \quad (22)$$

遊脚を胴体からはえたマニピュレータとみなし、等価モデルの質点を原点にとった座標系で表わした遊脚足首の位置 x_{swing} と速度 \dot{x}_{swing} を制御するものとする。

初期条件： $x_{\text{swing}}(0) = -x_f$ $\dot{x}_{\text{swing}}(0) = -v_f$

最終条件： $x_{\text{swing}}(\tau) = w - x_f$ $\dot{x}_{\text{swing}}(\tau) = -v_f$

この条件を満たせば、離床と着地の瞬間に遊脚足底の床面に対する水平速度が 0 となるのでなめらかな脚切り換えが可能となる。この条件を満たす軌道を適当な関数で生成した。なお、足部は常に地面と平行になるように制御した。

5.2 遊脚の着地制御について

実験を開始した当初、遊脚の鉛直運動についても離床、着地時の対地速度が 0 となるように軌道を与えた^(注8)。ところが実験を重ねるにつれて、離床、着地の瞬間の遊脚の鉛直運動が脚切り換え後の胴体の水平速度に大きな影響を与えることがわかつってきた。そこで両者の関連を実験的に調べることにした。

Fig. 12 に実験系を示す。スリップ防止と条件の一定化のため、定盤の上に厚さ 2 mm のゴムシートを貼ったものを床面として用いた。ロボットの足底はむくのアルミ材であり、すべり止めのスパイクなどはついていない。地面に対する胴体の絶対運動を計測するために、レーザ変位センサ(Keyence LB-300)用いた。

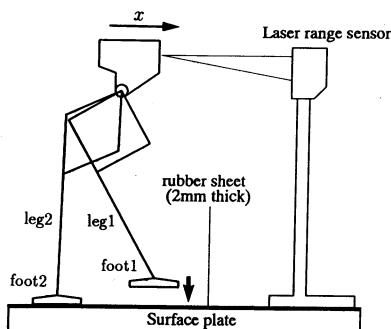
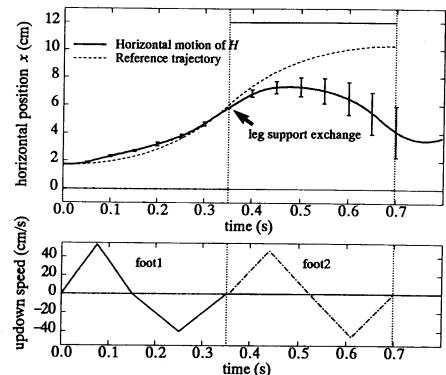


Fig. 12 Setup of leg support exchange experiment

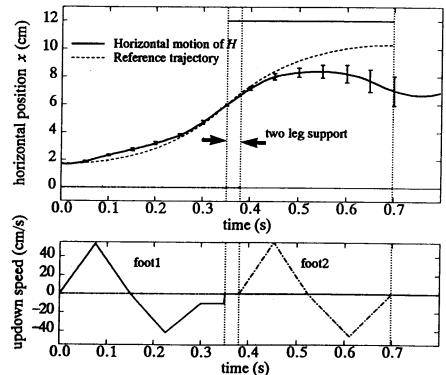
(注 8) 遊脚の鉛直運動の運動計画には障害物(支持脚足部や段差のへりなど)の回避も考慮する必要がある。しかしこれは厳密性を問わなければ比較的容易なので本論文では割愛した。

遊脚の着地、離床のパターンを違えた 2 種類の実験 (a) と (b) を行って胴体の水平運動を計測した。制御の手順を以下にしめす。

1. 2 脚支持状態
2. 実験開始：時刻 0.0 s で foot 1 をもち上げ、同時に leg 2 に支持脚相の制御を加える。
3. leg 2 による支持：ロボットの胴体は規範モデルに追従しつつ水平に運動する。
4. 着地準備：時刻 0.35 s での着地にむけて foot 1 を降下する。実験(a)では速度 0 で床面に着地する目標パターンを、実験(b)では -10 (cm/s) の下向き速度をもったまま床面に衝突するパターンを与えた。
5. 支持脚の切り換え：時刻 0.35 s から、leg 1 に支持脚相の制御を加える。ただし足首トルクは 0 とする。これと同時に leg 2 には遊脚相の制御を加え、foot 2 を床面からもち上げる。実験(a)では即座にもち上げ動作を開始するが、実験(b)では 30 ms だけ 2 脚支持状態を保ってから foot 2 をもち



(a) with basic touchdown pattern



(b) with improved touchdown pattern

Fig. 13 Results of support leg exchange experiment

- 上げるパターンを与えた。
6. leg 1 による支持：胴体は水平に自由運動を行う。
 7. 停止準備：時刻 0.7 s で地面に着地するように foot 2 を降下する。
 8. 2 脚支持状態に戻る

具体的な遊脚の鉛直方向の運動(目標速度パターン)が Fig. 13(a), (b)の下段のグラフに示されている。上段のグラフに実線で示されているのがレーザ変位センサで計測された胴体の水平運動である。この実験は再現性が悪く、試行ごとのばらつきが大きかった(特に 0.35 s 以降の軌道)。そこで 10 回の試行で得られた軌道データの平均値と分散を実線とエラーバーで示した。比較のため、脚切り換え時の速度損失がないと仮定したときの規範モデルの運動を破線で示している。二つの実験結果を比較すれば、(b)のほうが脚切り換え時の速度の損失が少なく、脚切り換え後の運動のばらつきも少ないため、歩行に適していることがわかる。

実験(b)のほうがスムーズな脚切り換えを実現できた理由を考察してみよう。まず foot 1 の着地運動の違いの効果について。(a)では着地直前に脚先が地面付近に留まる時間が長く、わずかな位置誤差があっても予定より早く着地して速度が大きく失われるのに対して、(b)では多少の位置誤差があっても正確なタイミングで着地できるため、より再現性のよい運動が実現されると考えられる。つぎに、脚切り換え後の foot 2 の離脱運動については、実験(b)で導入された 30 ms の二脚支持期間が支持脚交換期における運動量の伝達に役だっていると考えられる。

ここで、2.2 節で立てた「仮定 2：脚切り換えの瞬間に重心の速度が変化しない」について考えてみる。現実には実験(b)の場合でも切り替えの際に約 1 割の速度が失われる。しかし Fig. 13 の破線のように損失のない規範軌道を設定し、支持脚足首トルクを使ってこれに追従す

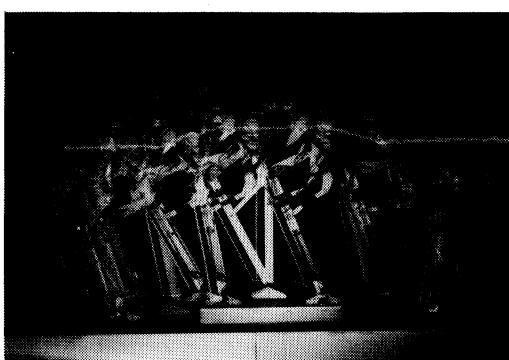


Photo. 2 Walk over a box of 3.5 cm height
(step length: 12 cm, period: 0.6 s)

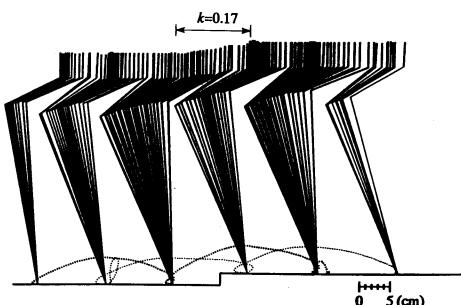
るよう制御すれば、速度損失をおぎなうことができ、仮定 2 を満足させることができる。ただし、足首トルクはあまり大きくできないので、速度損失はできるだけ小さくすることが望ましい。

6. 歩行実験

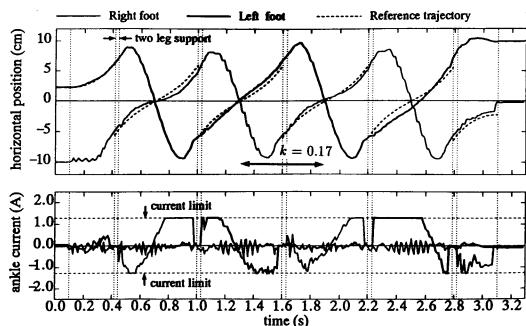
以上の結果をもとに凹凸面における 2 足歩行の制御を実現した。支持脚の切り換えは規範モデルにより計算されたタイミングで行い、着地センサなどは用いなかった。

Photo. 2 に静止状態から右に向かって歩行し高さ 3 cm の箱を乗り越えた後、停止するまでの分解写真を示す(一步 0.6 s, 歩幅 12 cm, ストロボ 80 回/min)。太い軌跡は胴体に取り付けた LED で、胴体の軌道(=拘束直線)を示している。細い軌跡は右脚足首に取り付けた LED の運動を示す。実験ではあらかじめ箱の位置と高さの情報をプログラムに入力しておき、設定された位置から歩行を開始した。

Fig. 14(a) に高さ 2 cm の段差を一段上がった場合の実験データをスティック図で示した。ロボットは静止状態から右方向へ 5 歩前進して止まった(一步 0.6 s, 歩幅 12 cm)。支持脚と胴体の姿勢を 27 ms ごとに示し、遊脚



(a) Stick picture (1 picture/27 ms)



(b) Horizontal motion and ankle current

Fig. 14 Experimental data: walk over a step of 2 cm height (step length: 12 cm, period: 0.6 s)

Table 1 Results of the walk experiments
(○ Success, △ Unstable, × Failure)

Period(s)	Step length(cm)			
	10	12	14	16
0.5	○	○	×	×
0.6	○	○	○	×
0.7	○	○	○	×
0.8	×	△	○	×
0.9	×	△	○	×
1.0	×	×	○	×

先端の軌道を点線で示している。同じ実験データの脚の水平運動と足首電流の変化を示したのがFig. 14(b)である。上段のグラフは胴体を基準とした座標系で両脚の水平運動を示したものである(破線は支持脚相の規範軌道)。段差の乗り越えのため傾いた拘束直線($k=0.17$)を用いた区間を矢印で示す。前後の軌道と比較すれば段差乗り越えが水平運動に影響を与えていないことがわかる。

下段のグラフは足首電流の変化を示す。足首の電流は ± 1.3 Aの範囲に制限した((18)式参照)。電流は支持脚相においてしばしば最大値に達しているが、一步ごとの軌道を見れば胴体の運動は規範モデルに追従し安定な歩行が実現されていることがわかる。

最後にわれわれの歩行制御法の有効範囲を知るために、平面上でさまざまな歩幅と歩行周期を指定して歩行実験を行った。その結果をTable 1に示す。○は安定な歩行が可能、△は歩行可能だが規範モデルとの誤差が大きく不安定、×は規範モデルに胴体の運動が追従できず転倒した場合を示す。実現できた歩行は一步0.5~1.0 s、歩幅10~14 cmの範囲にあり、最高速度は24 cm/sであった。

歩幅の限界は主に機構的な要因によるものなので、歩行速度に上限と下限が存在する理由について考察してみる。まず歩行速度の上限は粘性項や遊脚の運動による反力が足首トルクの補償範囲を超ってしまう点であると考えられる。一方、歩行速度に下限が存在することは同定された支持脚相のモデルあるいは5.2節の脚切り換え動作がある速度以下では適用できなくなることを示している。

7. おわりに

本論文では「線形倒立振子モード」に基づく2足歩行制御系の構成法を具体的に示し、その有効性を確認した。特に試作した2足歩行ロボット“Meltran II”を用いた実験によりつぎのような新しい知見を得た。

1. 拘束制御を加えたMeltran IIのダイナミクスは実用上十分な精度で線形なシステムとみなすことができる。

2. 脚切り換えをスムーズに行うためには遊脚が床面へ衝突する鉛直方向速度成分をもち、両脚支持期間が存在することが有効である。

これらをふまえて歩行制御系を構築した結果、“Meltran II”は最大3.5 cmの段差を歩幅12 cm、平均速度20 cm/sで乗り越えることができた。また、平面上では一步0.5~1.0 s、歩幅10~14 cmの範囲内の歩行が可能で、最高速度は24 cm/sであった。

今後、より高速な歩行を実現するためには遊脚のダイナミクスを考慮した制御法が必要だと考えられる。一方、より低速な歩行を実現するためには遅い速度での運動特性を明らかにする必要がある。特に遊脚の着地条件については理論的な解明が必要である。

本論文で扱ったのは sagittal plane 内に拘束された二次元的な歩行にすぎないが、三次元的な動歩行においても sagittal plane からの変位が小さい場合には同様に適用可能であると考えられる。本手法の簡明さと見通しの良さは実用に供することの可能な2足歩行ロボットの制御技術を確立する上で価値をもつとわれわれは考えている。

最後に、本研究に対してご支援頂いた大山尚武前機械技術研究所ロボット工学部長、ご支援頂いている野崎武敏ロボット工学部長、ならびに本研究に関しいつも有益な助言を頂いている機械技術研究所ロボット工学部諸氏に謝意を表する。

参考文献

- 特集：二足歩行ロボット、日本ロボット学会誌, 1-3 (1983)
- 特集：歩行ロボット、日本ロボット学会誌, 11-3 (1993)
- ビデオ特集号、日本ロボット学会9(1991)
- 古庄、森塚、増淵：局所フィードバックの概念を考慮した2足歩行の低次元モデル、計測自動制御学会論文集, 17-5, 596/601 (1981)
- 梶田、小林：位置エネルギー保存型軌道を規範とする動的2足歩行の制御、計測自動制御学会論文集, 23-3, 281/287 (1987)
- 梶田、谷：凸凹路面における動的2足歩行の制御について、計測自動制御学会論文集, 27-2, 177/184 (1991)
- Katoh and Mori : Control Method of Biped Locomotion Giving Asymptotic Stability of Trajectory, Automatica, 20-4, 405/414 (1984)
- 吳松、ほか：二足歩行ロボットの軌道計画、システム制御情報学会論文誌, 2-4, 118/127 (1989)
- T. McGeer : Passive Walking with Knees, Proc. IEEE Int. Conf. R & A 3, 1640/1645 (1990)
- Mita, et al : Realization of a high speed biped using modern control theory, Int. J. Control, 40-1, 107/119 (1984)
- 宮崎、有本：特異摂動法による多自由度二足歩行系の解析、計測自動制御学会論文集, 15-4, 84/90 (1989)
- 小笠原、ほか：スイング運動を用いた2次元二足歩行運動の実現、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'94(A), 393/398 (1994)

- 13) M. Raibert : Legged Robots That Balance, MIT Press
(1986)
- 14) 佐野, 古莊 : 角運動量制御による 2 足歩行ロボットの 3 次元動歩行, 計測自動制御学会論文集, 26-4, 459/466 (1990)
- 15) 下山勲 : 竹馬型 2 足歩行ロボットの動的歩行, 日本機械学会論文集(C編), 48-433, 1445/1455 (1982)
- 16) 高西, ほか : 2 足歩行ロボット WL-10 RD による動歩行の実現, 日本ロボット学会誌, 3-4, 325/226 (1985)
- 17) 米田完 : HC 地形のための 2 足歩行ロボットの開発, 第 5 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 585/586 (1987)

谷 和男 (正会員)



1972 年, 東京大学大学院工学系研究科産業機械工学博士課程修了(工学博士)。同年通商産業省工業技術院機械技術研究所に入所。現在, 同所ロボット工学部運動機構研究室長, マニピュレータの管理体制, アクティブラススペンション四輪ロボットなどの研究に従事。日本ロボット学会の会員。

[著者紹介]

梶田秀司 (正会員)



1985 年, 東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了(制御工学専攻)。同年通商産業省工業技術院機械技術研究所に入所。現在, 同所ロボット工学部運動機構研究室主任研究員。2 足歩行ロボットなどの機構の動的運動制御の研究に従事。IEEE, 日本ロボット学会などの会員。