

# 二足歩行ロボットの軌道生成への位相ダイナミクスの 応用について

## Motion generation of a biped walking robot by using the phase dynamics

○上田美穂、水戸部和久、那須康雄

○Miho Ueda, Kazuhisa Mitobe and Yasuo Nasu

山形大学工学部

Yamagata University

キーワード：二足歩行ロボット (biped walking robot)、位相ダイナミクス (phase dynamics)、  
歩容 (walking gait)、安定性 (stability)

連絡先：〒992 米沢市城南 4-3-16 山形大学工学部 機械システム工学科 那須研究室  
上田美穂、Tel.:(0238)26-3238、E-mail:miho@mnasu2.yz.yamagata-u.ac.jp

## 1. はじめに

人類や鳥など、二足歩行を行う生物の動的な歩行を機械システムによって実現することを意図した研究が、古くから大学や研究所などで行われているが、近年のコンピュータの進歩に伴い、より複雑で様々な制御手法の適用が可能となっている。二足歩行は、車輪による移動や多足歩行に比べて狭い範囲や凸凹面での移動が可能である反面、足底の小さな支持面積によりロボット全体の重量を支えなくてはならない点が難しく、胴体が転倒しないで、安定した移動を行うことが目標とされる。

ロボットの軌道生成を行うための制御方法については、様々な手法が用いられている。多自由度により人間に近いモデルを目指す場合には、運動方程式が複雑となり、安定な歩行を可能とする領域にZmp (Zero Moment Point; 床反力によるモーメントがゼロになる点) を保つ問題、足が床面を滑らないような床反力の制御の問題、両脚支持

期における制御の問題が難しくなる。

これらの問題を回避するために、倒立振子モデルを用いる事が多い。振り子の倒れこむ動きを利用した倒立振子モデルは、歩行を重心の移動問題として捉えた自然な動きを可能とする。このモデルは支持脚の動きと重心位置の関係を主に扱っており、ロボット全体のバランスを考慮に入れないことにより、問題を単純化する方法である。しかし、倒れずに歩行を行うためには、重心の移動に伴い、バランスよく遊脚が進行方向に進まなくてはならない。ロボットの転倒防止を考えた場合、支持脚、遊脚、重心位置のバランス問題を考えることは重要と思われる。

この問題の解決法として、歩行が周期運動を行うことから、振動子の引込現象 (相互作用のある非線形振動子同士は互いに影響しあい、全体で一つの振動子となる性質) を利用する方法が提案されている。これは、重心位置と遊脚先端位置を

位相表現を用いて2つの振動子とみなし、相互に作用させることにより、平衡を保たせるものである。その結果、どちらかが行きすぎる時には遅らせ、遅れている時には進ませるような、バランスを保たせるための目標点を選ぶことが可能となる。

本研究では、実際のロボットにおいて特に重要となる、単脚支持期での重心位置と遊脚におけるバランス問題を解消するため、目標軌道の一部に位相調整の方法を導入する。そして、外乱などの影響による遊脚の着地のタイミングのずれを適応的に補正することによる、転倒しないための軌道生成法に関して、実験的検討を行う。

## 2. 二足歩行システム

### 2.1 二足歩行システムの構成

図1に実験システムのブロック線図を示す。本実験システムは制御用コンピュータ(NEC PC9801RA 32bit 16Mhz)、10bitDAコンバータ、電流指令型パワーアンプ、角速度検出器、位置検出用デジタルカウンタ、及び二足ロボットにより構成されている。

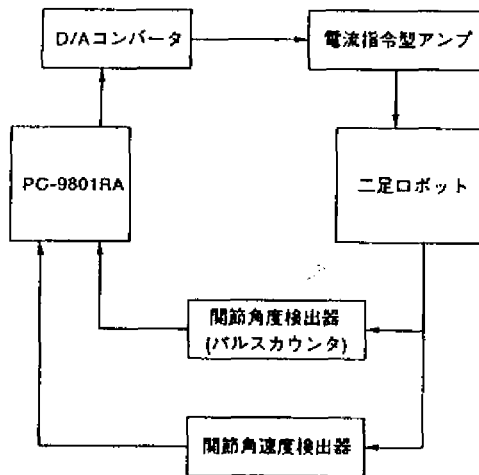


図1 システムのブロック線図

### 2.2 二足歩行ロボットの機構

歩行ロボットの自由度は歩行を実現するために必要な最低限のものとし、図2のとおり、5リンクにモデル化する。

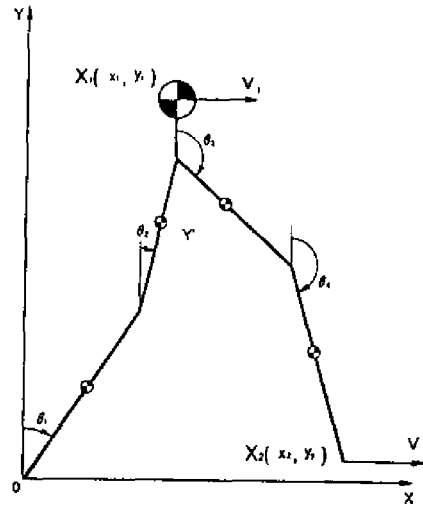


図2 5リンクモデル

図2のモデルより製作した二足歩行ロボットを、図3に示す。本研究では、ロボットに次のような機構を持たせる。

- ・脚部(リンク1、リンク2、リンク3、リンク4)の質量をできる限り軽量化する。
- ・脚部に平行リンクを用いることにより、歩行中の胴体の地面に対する姿勢を一定に保つ。
- ・足底の形状を工夫することにより、ロボットの横方向への転倒を防ぐ。

脚の質量が胴体に比べ十分に軽いものとして無視できれば、制御系を大幅に簡略化することが可能である。脚部の質量ができる限り胴体部に集中する必要があるため、脚下部の駆動は、平行リンク、アルミ製プーリ、ゴム性強カタイミングベルトを用い、モータは胴体部に配置する。この機構により、脚部と全質量の比は0.217となり、今回実験を行った歩行速度においては、無質量脚と仮定した制御則が適用できるものとする。

慣性力の影響を最小限に抑えるために、胴体部の姿勢が常に地面と平行となるように平行リンクを用いる。

歩行を、進行方向と高さの2次元平面内での運動に限定して考えるため、足底の形状は横幅を長くし、歩行中に横方向への転倒を防ぐ。

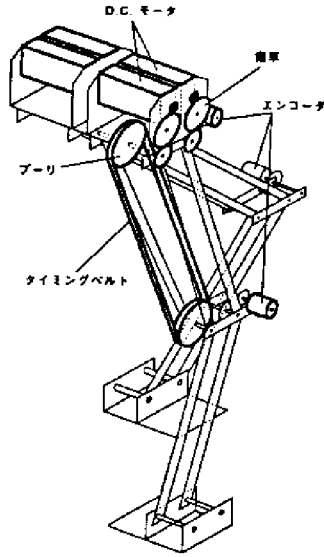


図3 概観図

### 3. 制御方法

#### 3.1 運動方程式

二足歩行ロボットを図2の5リンクのモデルとみなす事により、運動方程式を導くと次の様になる。

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (1)$$

$q$  はリンク角を要素に持つ4次のベクトル ( $q = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)^T$ ) で、 $M(q)\ddot{q}$  は慣性力、 $C(q, \dot{q})\dot{q}$  は遠心力及びコリオリ力を表し、 $G(q)$  が重力負荷を表す項である

( $q \in R^{4 \times 1}, M \in R^{4 \times 4}, C \in R^{4 \times 4}, G \in R^{4 \times 1}$ )。支持脚と地面が接した点を原点とした座標系を用いて重心位置、遊脚先端位置を考え、 $X$  を次のように定義する。

$$X = (x_1, y_1, x_2, y_2) \quad (2)$$

時間  $t$  で微分すると

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (3)$$

のようになる。ここで  $J(q)$  は  $X$  の  $q$  に関するヤコビ行列を表す。

$$J(q) = \begin{bmatrix} l \cos \theta_1 & l \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ -l \sin \theta_1 & -l \sin \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l \cos \theta_3 & l \cos \theta_4 \\ 0 & 0 & -l \sin \theta_3 & -l \sin \theta_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

さらに微分を行うと、

$$\ddot{X} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q)\dot{q} \quad (5)$$

のようになる。ここで  $J(q)$  が正則であると仮定すると、(5)式は次のように変換できる。

$$\ddot{q} = J(q)^{-1}\ddot{X} - \dot{J}(q)\dot{q} \quad (6)$$

以上により(1)式は

$$MJ^{-1}\ddot{X} + (C - MJ^{-1}\dot{J})\dot{q} + G = \tau \quad (7)$$

と表せる。 $MJ^{-1}$ が正則であると仮定して入力トルク  $\tau$  を次のように与える。

$$\tau = MJ^{-1}u + (C - MJ^{-1}\dot{J})\dot{q} + G \quad (8)$$

従って

$$\ddot{X} = u \quad (9)$$

のように線形化される。

実験においては、重心と脚の比率が脚の質量を無質量と仮定する。また、リンク1、リンク2、リンク4、リンク5の長さは等しいので(8)式において

$$C - MJ^{-1}\dot{J} = 0 \quad (10)$$

が成立し制御則が簡単化される。

入力  $u$  を適当に選ぶ事により、ロボットの重心位置及び遊脚先端位置を容易に制御する事ができる。目標軌道への追従のため、入力  $u$  をゲイン  $K_d, K_p$  及び目標値  $X_d$  を用いて次のように選ぶ。

$$u = \ddot{X}_d + K_d(\dot{X}_d - \dot{X}) + K_p(X_d - X) \quad (11)$$

ここで、追従誤差を  $e = X_d - X$  とすれば

$$\ddot{e} + K_d\dot{e} + K_p e = 0 \quad (12)$$

となり、上式が安定となるようなゲインを与える事により、 $e$  は0に収束する。

#### 3.2 位相方程式

定常な歩行が周期運動である事に着目し、その位相の調整によりロボットの運動にバランスを持たせる方法について考える。

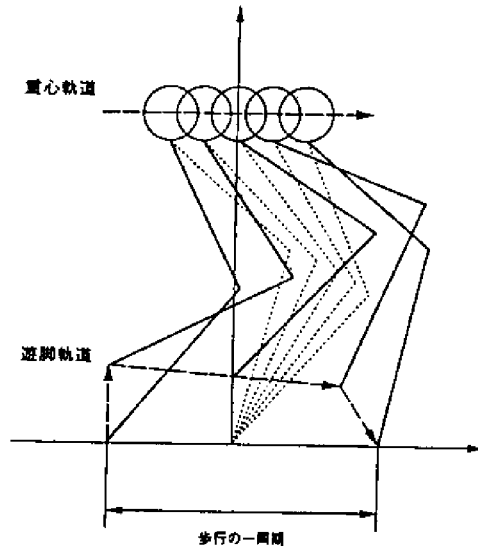


図4 重心、遊脚の目標軌道

そこでは、重心位置と遊脚先端位置の座標  $X_1, X_2 = (x_1, y_1), (x_2, y_2)$  の運動モデルをリミットサイクル振動子のモデルに置き換え、次の運動方程式を満足するものとしている。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} dX_1 &= V_1(X) \\ \frac{d}{dt} dX_2 &= V_2(X) \end{aligned} \quad (13)$$

図4は、歩行の一周期における重心と遊脚の目標軌道を表したものである。座標が目標軌道上にある場合、軌道に沿って、座標  $X_1, X_2$  を位相  $\phi$  で表す。座標が目標軌道上にない場合、位相  $\phi$  は目標軌道上で、座標に一番近い値を取るものとする。

$$\begin{aligned} X_1(t) &= \phi_1 \\ X_2(t) &= \phi_2 \end{aligned} \quad (14)$$

図5に、位相で表した重心位置、遊脚先端位置を示す。便宜上、 $\phi$  が0から  $2\pi$  であるとした場合、重心位置、遊脚先端位置を一周期の位相に変換させると図5のようになる。 $\phi_1$  の(a)、(b)、(d)、(e)と同周期にあたるのが、 $\phi_2$  の(f)、(g)、(h)、(i)であり、この値が一致して移動を行うことがバランスの良い歩行となる。仮に、 $\phi_1$  が(c)、 $\phi_2$  が(g)にある場合、 $\phi_1$  の位相の方が、 $\phi_2$  の位相より進んでいることになり、進行方向に重心が倒れこむ恰好となる。このような位相のずれは、ロボットの転倒につながる。

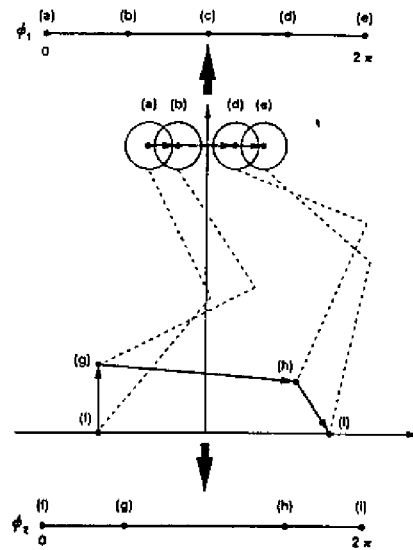


図5 位相表現を用いた重心位置、遊脚先端位置

位相にずれが生じた場合に、その調整法について考える。周期運動は

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \phi_1 &= v_1(\phi_1) \\ \frac{d}{dt} \phi_2 &= v_2(\phi_2) \end{aligned} \quad (15)$$

と表わせ、特に目標速度が一定の場合、次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \phi_1 &= \omega_1 \\ \frac{d}{dt} \phi_2 &= \omega_2 \end{aligned} \quad (16)$$

周期関数を最も簡単な正弦関数として扱えば、相互作用を行う2つのモデルに対して、

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_1 &= \omega_1 - \sin(\phi_1 - \phi_2) \\ \dot{\phi}_2 &= \omega_2 - \sin(\phi_2 - \phi_1) \end{aligned} \quad (17)$$

と表すことにより、双方に引込みの作用を与える事ができる。その結果、先程の位相のずれを修正することが可能となる。実験においては

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_1 &= \omega_1 - K_{12} \sin(\phi_1 - \phi_2) \\ \dot{\phi}_2 &= \omega_2 - K_{21} \sin(\phi_2 - \phi_1) \end{aligned} \quad (18)$$

として、適当なゲイン  $K_{12}$ 、 $K_{21}$  を与えることにより、位相の調整を行う。

本研究で問題とするロボットにおいては、単脚支持期における重心と遊脚の運動のバランスが安定な歩行の維持に大きく影響することを重視し、

この部分に上述の位相調整の方法を適用する事にする。

#### 4. 実験結果

二足歩行ロボットを用いて、3章に述べた制御則に基づき実験を行った。

図 6, 7, 8(a)は、単脚支持期における重心位置と遊脚先端位置のX方向への変位、及び目標軌道をグラフにしたもので、図 6, 7, 8(b)は、その時刻での位相調整を表したものである。

図(a)において、重心に関しては左軸を、遊脚に関しては右軸を取るものとする。重心位置 $\phi_1$ 、遊脚先端位置 $\phi_2$ を(18)式に代入することにより、図(b)の位相調整 $\dot{\phi}_1$ 、 $\dot{\phi}_2$ を導出している。 $\dot{\phi}_1$ 、 $\dot{\phi}_2$ の値は $\phi_1$ 、 $\phi_2$ の位相のずれにより決定される。位相調整 $\dot{\phi}_1$ 、 $\dot{\phi}_2$ を与えた目標値が、図(a)の実線及び点線となる。この目標値を用いて、式(12)より入力 $u$ を算出し、重心位置及び遊脚先端位置のフィードバック制御を行っている。

位相の調整が小さすぎる場合、遊脚位置に対して、重心位置は遅れたままとなる(図6)。位相調整が大き過ぎる場合、重心が行き過ぎる結果となる(図8)。適当な位相調整を行った結果、図7のように重心位置と遊脚位置が同位相となり、バランスの良い移動が可能となった。

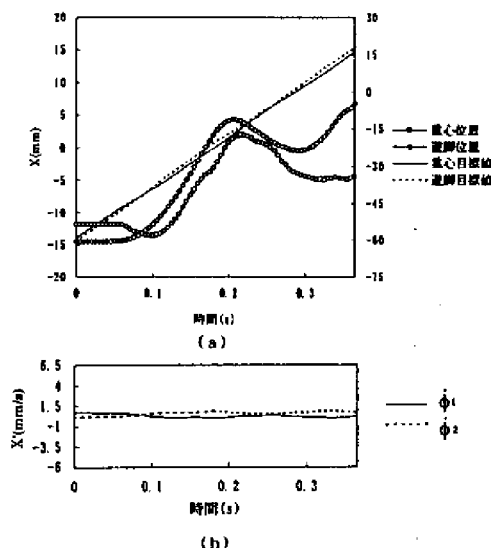


図6 実験結果1

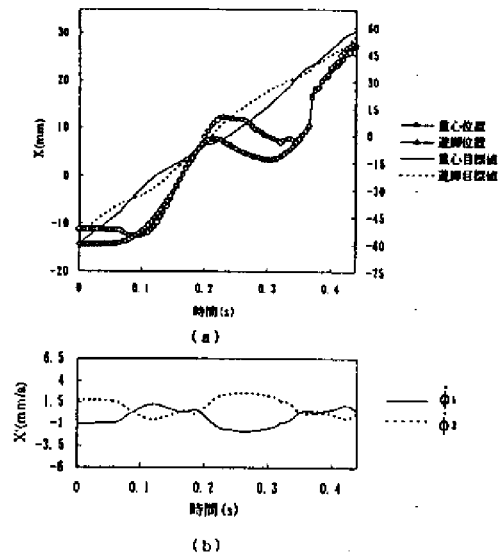


図7 実験結果2

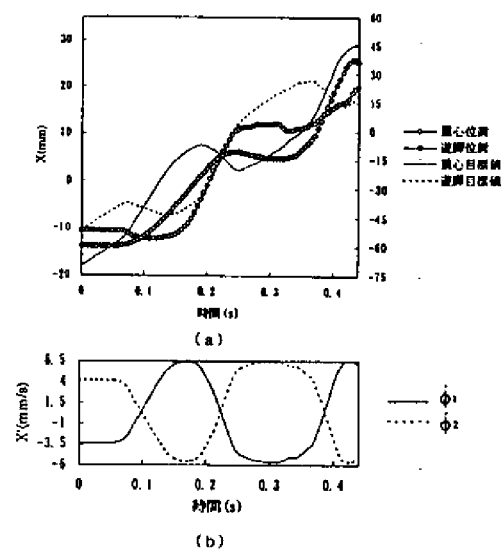


図8 実験結果3

#### 5. 終わりに

二足歩行ロボットの重心移動と遊脚移動のバランス問題に焦点をおき、位相方程式を用いた軌道の生成法について考察を行った。また、歩行ロボットを用いて実験を行い、位相調整の有効性を確かめた。

#### 参考文献

- 1) 蔵本由紀他：パターン形式、朝倉書店(1991)
- 2) 公文誠：位相ダイナミクスを応用した二足歩行ロボットの歩行生成法(1996)、京都大学修士論文