

脚移動ロボットのための角運動量制御則

An Angular Momentum Control Law for Walking Robot

川田義猛, 柴田辰夫, 水戸部和久 (山形大学工学部)

Yoshitake kawada, Tatu shibata, Kazuhisa mitobe (Yamagata University)

キーワード: 歩行ロボット (walking robot), ゼロモーメント点 (zero moment point)
角運動量 (angular momentum)

連絡先: 〒992 8510 米沢市城南 4 - 3 - 16 山形大学工学部機械システム工学科 水戸部和久

Tel : (0238)26-3232 , Fax : (0238)26-3205 , E-mail : mitobe@mnasu2.yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

歩行ロボットの制御において、ロボットが床から受ける圧力の中心点であるゼロモーメント点 (ZMP) の操作を経由して上体の制御を行うことは、人間が足の踏ん張り方を操作してバランスをとることに類似しており、自然な方法と考えられる¹⁾。この考え方によれば、脚の自由度が低く脚質量を胴体に比べて無視できる場合には、胴体重心位置を被制御量として選ぶことが出来る。しかし、一般的なロボットに対して制御の安定性を理論上保証することは難しい。そこで、本研究では角運動量を時間で微分すればトルクになるという力学的性質から、被制御量としてロボットの角運動量を用いる方法を提案する。角運動量というのは、歩行ロボットを実時間制御するための制御量として早くから注目されている²⁾が、ZMP の操作を経由して制御することによりロボット全体のバランスを確保しながら

ら効率的な制御が可能となることが考えられる。

2. 本研究で提案する制御則

本研究で提案する制御則は 2 段階に分けて考えていく。まず、足首トルクを用いて ZMP 位置の操作を行うことを考える。この考え方は、上体運動に関わらずに足首関節の制御のみで ZMP を操作することを目的とする。

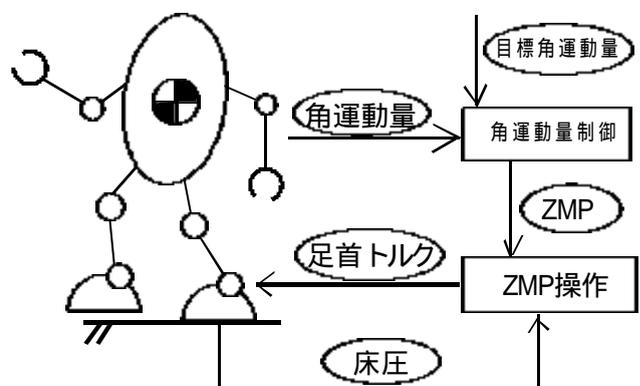


図 1 . 制御構想図

次にこの様に操作した ZMP を入力信号として角運動量を制御していく。そして、この制御と並行して他の関節制御を行い歩容を生成する。また、これら 2 つの制御を独立に行っても、角運動量制御系は安定に働くので目標の角運動量を実現することは出来ると考えられる。

3. 足首トルクによる ZMP 操作

本研究では、提案する制御則を実行可能にするために足首トルクによる ZMP 操作を考える。

足首に加わる外力を図 2 に示すように定義する。



図 2 . 足首のモデル図

F は上体から足首関節を經由して足部に加わる力、 R は床圧（反力および摩擦力を ZMP に集約して考えたもの）、 G は足部の重力である。足部が床に対して静止している状態で外力はつり合うので、

$$F + R + G = 0 \quad (1)$$

足部の質量を m として、式(1)を垂直および水平成分に分けると

$$F_N + R_N - mg = 0 \quad (2)$$

$$F_T + R_T = 0 \quad (3)$$

次に足首まわりのモーメントのつり合いを考えると次式が得られる。

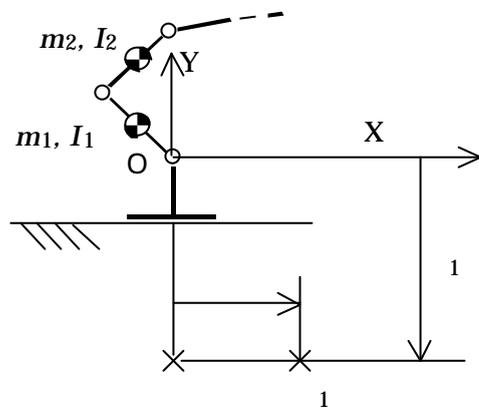
$$\mathbf{t} = -R_N \mathbf{d} - R_T h + \mathbf{m}g \quad (4)$$

式(4)は、ZMP の位置、床反力、摩擦力および足首トルクの関係を表す。この関係を利用して、センサにより測定された床圧に基づいて足首トルクを供給することで ZMP の位置をアクティブに制御することが可能である。

4. 角運動量制御則

ここでは、床面下の任意点まわりでのロボットの角運動量を目標値へ制御する方法を考える。本制御の基本的な考え方は、上記の方法で操作される ZMP の座標を、ロボット全体の角運動量フィードバックによって与えるものである。

ロボットの片足支持の状態を平面内で、モデル化し、各リンクの質量、慣性モーメント、重心位置を $m_i, I_i, (x_i, y_i)$ としたものを図 3 に示す。



- m_i : 質量
- I_i : 慣性モーメント
- (x_i, y_i) : 重心座標
- k_y : 点回りの角運動量
- k_{ref} : 目標角運動量

図 3 . ロボットのモデル図

このとき、角運動量を計算する基点 および目標角運動量は目的とする歩容に依存して

決める．例えば，ロボットの静止時のバランス制御は目標角運動量をゼロとすればよい．また，点までの距離 f_1 を大きく取り，目標角運動量を一定にすれば，ロボットの運動は一定速度での並行運動に近くなる．すなわち，一定速度での歩行に応用可能であると考えられる．

Ψ 点を含む水平線上で Ψ 点からの距離が f_1 の点 Ψ_1 まわりで，ロボット全体へ働く慣性力および重力によるモーメント M_{Ψ_1} を計算すれば次式となる．

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M_{\Psi_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sum I_i \sum \ddot{\mathbf{q}}_i \end{bmatrix} + \sum m_i \begin{bmatrix} \ddot{x}_i \\ \ddot{y}_i \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{d} - x_i \\ \mathbf{J}_1 - y_i \\ 0 \end{bmatrix} + \sum m_i \begin{bmatrix} 0 \\ -g \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{d} - x_i \\ \mathbf{J}_1 - y_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで， Ψ 点まわりの角運動量を k_Ψ で表すと次式となる．

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_\Psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sum I_i \sum \dot{\mathbf{q}}_i \end{bmatrix} + \sum m_i \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -x_i \\ \mathbf{J}_1 - y_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

よって， k_Ψ を微分したものである \dot{k}_Ψ は Ψ まわりのモーメントとなるので，式(5)は以下のようなになる．

$$M_{\Psi_1} = \dot{k}_\Psi - \sum_i m_i (\ddot{y}_i - g) \mathbf{d} - \sum_i m_i x_i g \quad (7)$$

ここで， $-\sum_i m_i (\ddot{y}_i - g)$ は床反力を表しているため， R_N とおくことができる．また，点 Ψ_1 を $M_{\Psi_1} = 0$ となるような点に選べば次式が成

り立つ．

$$\dot{k}_\Psi = -R_N \mathbf{d} + \sum_i m_i x_i g \quad (8)$$

このような点 Ψ_1 は床面上の点ではないので，通常用いられる ZMP とは異なる．しかし，足底が床面と密着している状態では ZMP と同様に足首トルクを用いて操作できると考えられる．よって，先程の式に基づき以下のフィードバック則を用いて角運動量を制御する．図4はその角運動量制御則のブロック線図である．

$$\mathbf{d} = \frac{1}{R_N} \left(k_\Psi - k_{ref} + \sum_i m_i x_i g \right) \quad (9)$$

ここで， k_{ref} は角運動量の目標値であり定数とする．

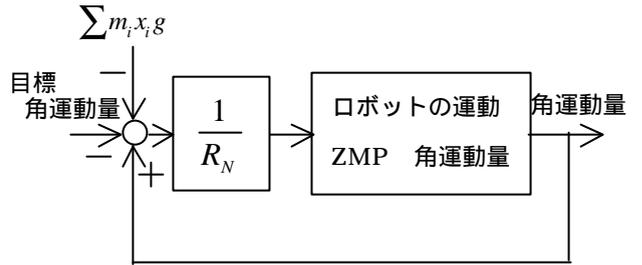


図4．角運動量制御則

角運動量の目標値との誤差を $e = k_y - k_{ref}$ とすれば，

$$\dot{e} + e = 0 \quad (10)$$

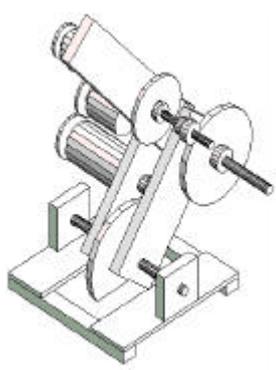
を満足するので，角運動量は目標値に収束することがわかる．

この制御則は，足首関節へのトルク指令によって実現し，足首以外の関節はこの制御とは独立に行うことが可能である．したがって，ロボット全体の運動制御をバランス確保の問題と分離して，実時間制御を行うことに有効であると考えられる．

5. 実験ロボット

本研究を行うにあたって，図5に表すような片足ロボットを製作した．

足底の4角には，床圧センサ（ニッタ株式会社の FlexiForce を使用：形式 A101-25）を取り付けてあり床反力を検出できるようになっている．



足底の幅 140mm
足底の奥行き 140mm
ロボットの最大高さ 325mm

図5．片足ロボット

6. 実験

はじめに，足首トルクによる ZMP 操作の実験を行った．この実験では，片足ロボットの上関節を取り除き，足首軸に振り子を取り付けて行った．簡単なモデル図を図6に示す．なお，今後は実験ロボットの足首高さを非常に小さいものと仮定し， h をゼロに近似して ZMP 操作則で

ある式(4)を以下のように単純化して用いることにする．

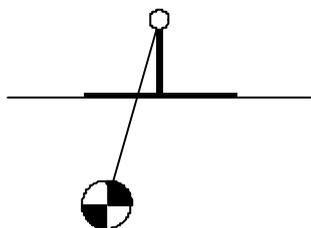


図6．概略図（ZMP 操作）

$$\mathbf{t} = -R_N \mathbf{d} \quad (11)$$

この実験は，指令 ZMP を床面上で左右させ足首トルクを入力し ZMP を操作している．この

実験の結果を図7に示す．

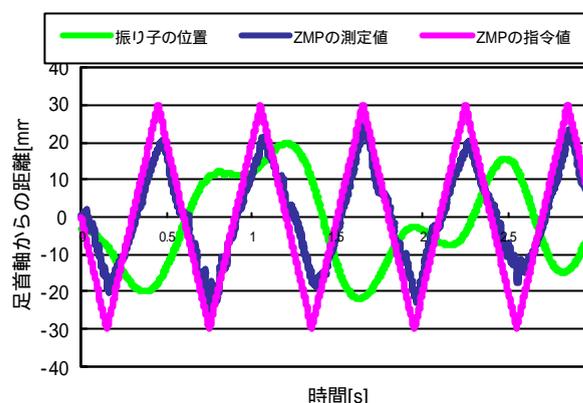


図7．足首トルクによる ZMP 操作

圧力センサより計測された ZMP がほぼ目標値に追従している．測定値がやや振動的になっているのは，センサノイズやギアのカタによる影響であると考えられる．

次に，角運動量制御の実験である．これは，床面上で ZMP を操作するという条件のもとでいくつか実験を行った．

1つ目は目標角運動量をゼロとしたバランス制御を行った．ここでは，制御式(9)に比例ゲイン K_k を付加した次の式を用いる．

$$\mathbf{d} = \frac{1}{R_N} \left\{ K_k (k_\psi - k_{ref}) + \sum_i m_i x_i g \right\} \quad (12)$$

この実験では，図8に示すように上関節の角度を -15 度から 15 度の範囲のサイン関数で動作実験を行った．実験結果を図9に示す．

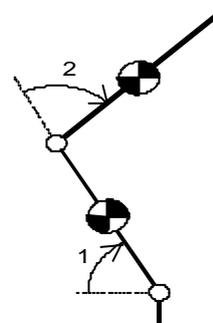


図8．概略図(バランス制御)

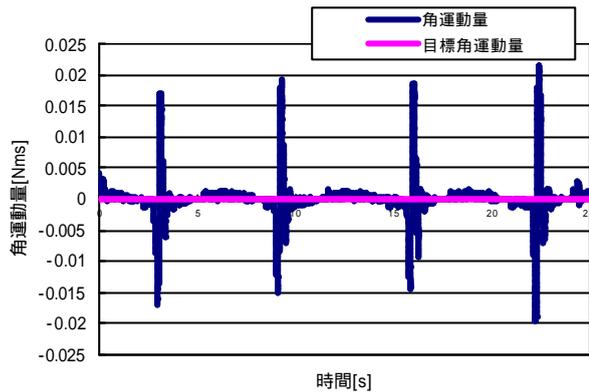


図9．実験結果（バランス制御）

図9より，角運動量は目標値に追従していることがわかる．また4回ほど上部アームに手で外乱を加えてみてが，十分に目標角運動量に追従していることもわかる．

2つ目に目標角運動量をゼロ以外に設定して実験を行った．この実験では，図11に示すように上部関節ま

っすぐに固定して一本のアームと見なした．また，制御には追従性を良くするため式(12)に積分補償を加え，制御則を次式のようにした．

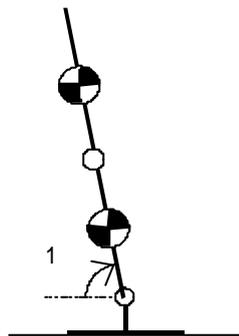


図10．概略図(目標値一定)

$$\mathbf{d} = \frac{1}{R_N} \left\{ K_k (k_\psi - k_{ref}) + \sum_i m_i x_i g + K_I \int (k_y - k_{ref}) dt \right\} \quad (13)$$

角運動量制御則に積分補償を付加した理由は，ZMP 操作則の足首高さをゼロと近似したことで足底の摩擦が無視されたため追従誤差が大きく現れると予測したからである．

目標角運動量を 0.005Nms として行った実験の結果を図11に示す．0.005Nms は1秒間でおよそ10度進む角運動量である．

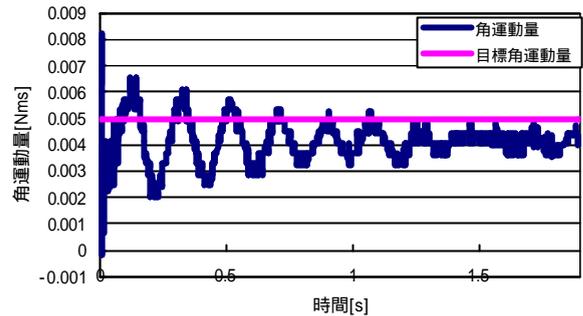


図11．実験結果（目標値一定）

図11より，角運動量に若干の追従誤差が残るものの，ほぼ目標の角運動量に追従させることができた．

7．おわりに

本研究では，ZMP 位置の操作による歩行ロボットの角運動量制御則を提案した．そして，提案した制御則によって片足ロボットのバランス制御の動作実験を行った．これにより，ZMP 操作による角運動量制御則の有用性を確認した．

本実験では，足底の摩擦力を無視して実験を行ったので，今後摩擦力を検出できる機構を考える．また，歩行ロボットに適応できるように両足支持のような2点以上の接地点がある場合の角運動量制御則を考えていく予定である．

【参考文献】

- 1) 水戸部，矢島，那須：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 Vol.18,No.3,p.359-365 (2000)
- 2) 佐野，古荘：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 Vol.26,No.4,p.459-466 (1999)