

## 歩行ロボットの足首トルク制御の研究 Ankle joint control for walking robots

益山篤, 水戸部和久, 那須康雄

Atsushi Masuyama, Kazuhisa Mitobe, Yasuo Nasu

山形大学工学部

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), 制御 (control),  
足首 (ankle joint)

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

現在さまざまな手法で、歩行ロボットの研究が数多く行われている。その中で、ZMP<sup>[1]</sup> (Zero Moment Point) の概念が歩行ロボットの研究において重要であり、広く使われている。ZMP は、ロボットの足底の密着条件と関係が深く、主にロボットの運動計画において用いられている。従来研究の大部分において、ZMP はロボット全体の運動と関係付けられて議論されてきた。

一方で、床との作用・反作用における力の授受が重力以外でロボットに加わる外力のす

べて<sup>[2]</sup>であり、床と接する部分 (足部) における力の授受のみに注目して ZMP を表現することができる。また、床と接する部分に隣接するジョイント (足首) のトルクの指令によって ZMP を積極的に操作することが可能であると考えられる。

本研究では、足部における力の関係による ZMP の表現 (センサ位置、得られる力情報によりどのように ZMP を操作する方法) および、ZMP の操作法<sup>[3]</sup> (センサ情報に基づき足首トルク指令を与えることで、ZMP を操作する方法) に関して議論を行う。また、このようにして足首トルク入力を定めることと、ロボッ

ト全体の歩行運動制御の関係について考察する。

## 2. 足首トルクとZMPの関係

### 2.1 床反力および

#### 足首トルクの求め方

床反力および足首トルクを求めるために、図1のように足首をモデル化する。

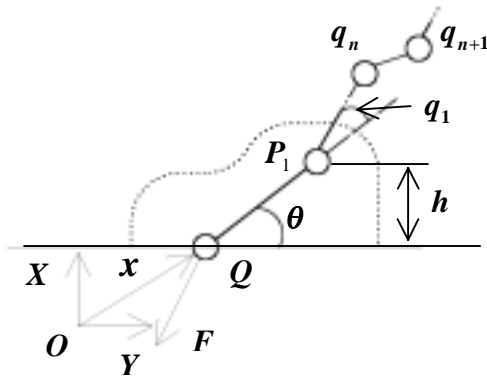


図1 足底における力の関係

座標原点は図1のように取り、二次元座標  $X$ 、 $Y$  で考え、実線は床面を表し、点線は足の外形を表す。足底の任意の点を  $Q$  とし、 $Q$  点における力およびモーメントを求める。足首ジョイントの床面からの高さを  $h$ 、ジョイントの位置を  $P_1$ 、床面からなす角を  $\theta$ 、 $Q$  点に働く力を  $F$ 、 $Q$  点の座標を  $x$  とする。

ロボットのジョイント変数に図1の  $\theta$ 、 $x$  を付加し、(1)式を一般化座標とする。

$$\tilde{q} = \begin{bmatrix} q \\ \theta \\ x \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $q$  はロボットのジョイント変数

(1)式を用いてロボットの運動方程式を

書くと、(2)式になる。

$$M\ddot{\tilde{q}} + C\dot{\tilde{q}} + G = \begin{bmatrix} \tau \\ \tau_0 \\ F_N \\ F_T \end{bmatrix} \quad (2)$$

第1項の  $M$  は慣性項、第2項の  $C$  は遠心力とコリオリ力を含む項、第3項の  $G$  は重力と摩擦の項を表す。足が床面に固定されている事を考え  $Q$  点を固定、 $\theta = \text{一定}$  の拘束条件を考えると拘束は(3)式になる。

$$D = \begin{bmatrix} \theta - \theta_0 \\ x \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

この拘束のもとで、(2)式の右辺の拘束力  $\tau_0$ 、 $F_N$ 、 $F_T$  が、それぞれ  $Q$  点まわりのモーメント、鉛直床反力、摩擦力に相当する。一般的に足首ジョイントのトルク  $\tau_1$  は、先に求めた  $F_N$ 、 $F_T$  および ZMP の位置  $\delta$  と  $h$  を用いて、足首まわりのモーメントの釣り合いから(4)式で表される。

$$\tau_1 = F_N \cdot \delta + F_T \cdot h \quad (4)$$

- $\tau_1$  : 足首ジョイントのトルク
- $F_N$  : 鉛直床反力
- $F_T$  : 摩擦力
- $\delta$  : ZMP の位置
- $h$  : 足首ジョイントの高さ

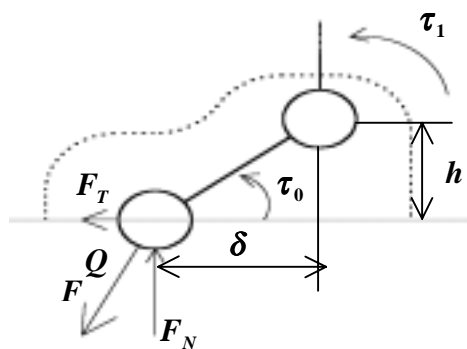


図2 足首トルクと拘束力

## 2.2 足首にセンサを 取り付ける場合

図3のように、足首に多軸の力センサを取り付けた場合に得られるセンサ信号および足首トルクとZMPの関係について考える。 $X$ 軸、 $Y$ 軸を図3のように定める。 $Y$ 軸と足のリンクがなす角を $\alpha$ 、リンクと足首にかかる力 $F$ のなす角を $\beta$ とすると(4)式は、次式のように表わせる。

$$\begin{aligned} \tau_1 &= F_N \cdot \delta + F_T \cdot h \\ F_N &= F \cos(\alpha + \beta) \quad (5) \\ F_T &= F \sin(\alpha + \beta) \end{aligned}$$

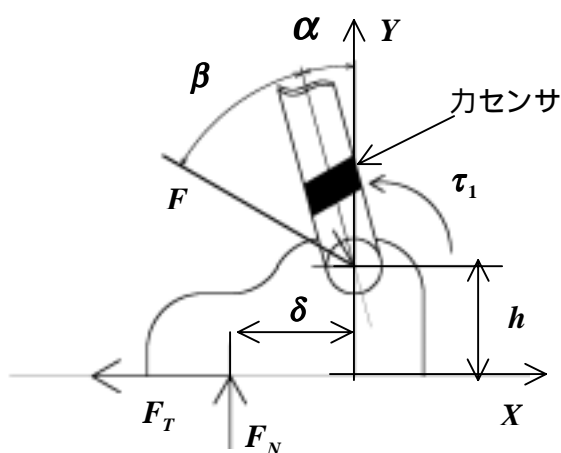


図3 足首にセンサをつけた場合

(5)式を用いて、センサの力情報に基づ

き足首トルクを指令することによって、ZMPを目標位置に操作することが可能である。

次に、実際にZMPを目標位置に操作する方法について考える。まず、図4のように足首ジョイントを床面に限りなく近づけた場合、足首ジョイントの高さ $h$ をゼロと考えられるので足首トルクは、(5)式になる。

$$\tau_1 = F_N \cdot \delta \quad (6)$$

このことから、足首ジョイントを床面に近づけることにより、足首トルクとZMPの関係式を(6)式のように簡略化できる。

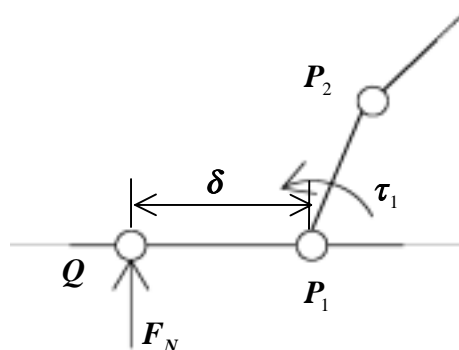


図4 足首ジョイントを床面に近づけた場合

以上の考えをもとに、本研究で考案した足首にセンサを取り付ける場合の、足首トルク操作の概念図を図5に示す。

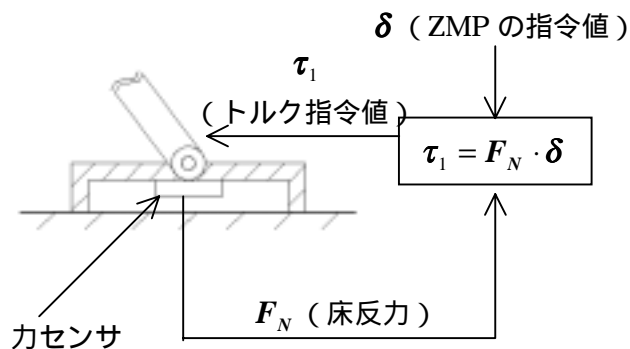


図5 足首トルク操作の概念図

図5に基づき、試作した基礎実験装置を図6に示す。力センサーにはひずみゲージを使用し、梁のたわみを利用して床反力の検出を行う。ZMPの指令はパソコンから出力し、トルクの乗算はアナログ回路で行い、電流指令アンプを通して足首モータに出力する。試作した足首で、上部構造（振り子）が静止したときに、ZMPを指定可能かどうか検証する実験を行った。実験結果を図7、図8に示す。

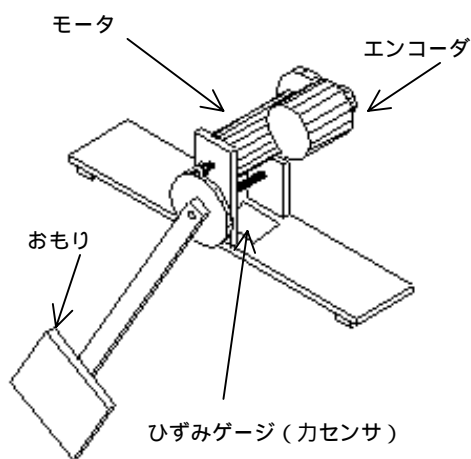


図6 基礎実験装置

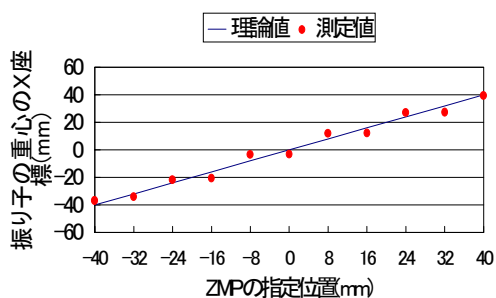


図7 ZMPの指定（踵からつま先方向）

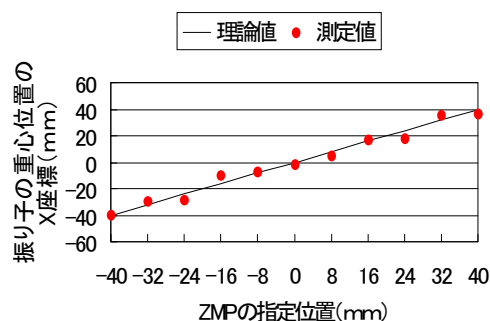


図8 ZMPの指定（つま先から踵方向）

実験結果より、踵からつま先方向、つま先から踵方向ともに測定値が理論値に近い値を示している。このことから、上部構造が静止している場合において、足首トルクによってZMPを指定することが可能であると考えられる。

### 2.3 足底にセンサを取り付ける場合

次に、足底にセンサを取り付けた場合に得られるセンサ信号、足首トルクとZMPの関係について考える。図9にZMPと足首トルクの関係を示す。センサ部分を図10に示す。センサには、シート型の圧力センサを用いる。

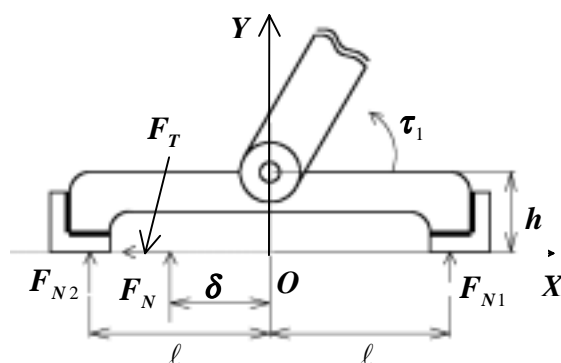


図9 ZMPと足首トルクの関係

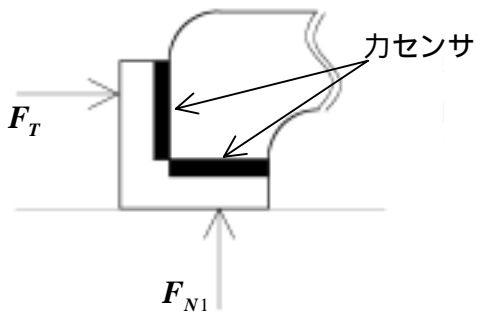


図 10 足底に取り付けた力センサ

まず、ZMP の位置  $\delta$  について考える。座標軸  $X$ 、 $Y$  を図のように取り、座標原点  $O$  からセンサの中心までの距離を  $\ell$ 、ZMP までの距離を  $\delta$  とする。力センサで検出した床反力  $F_{N1}$ 、 $F_{N2}$  を用いて、床反力総和  $F_N$  を表わすと、式 (7) になる。

$$F_N = F_{N1} + F_{N2} \quad (7)$$

ZMP の位置  $\delta$  は、床反力  $F_{N1}$ 、 $F_{N2}$  とセンサの位置と ZMP の位置から (8) 式で表される。

$$F_{N1}(\ell + \delta) - F_{N2}(\ell - \delta) = 0 \quad (8)$$

(7) 式を用いて整理すると、(9) 式になる。

$$\delta = \frac{F_{N1} - F_{N2}}{-F_N} \ell \quad (9)$$

したがって、鉛直方向の床反力情報があれば ZMP の位置を求めることが可能である。

次に、ZMP を操作する方法について考える。足首トルクは、(5) 式で表される。この式から、ZMP を操作するためには鉛直床反力と摩擦力が必要であることが分かる。このため、

力センサーを図 10 のように縦方向と横方向の両方向の力を検出するように取り付ける。検出した力情報をもとに足首トルクを (4) 式を用いて足首のモータに出力することによって、ZMP を操作することが可能であると考えられる。また、足首にセンサを取り付けた場合と同じように、足首ジョイントの高さ  $h$  を低くすれば足首トルクの式を (6) 式のように簡略化できる。

以上のことから、足底にセンサを今回提案した方法をもとに取り付け、(6) 式を用いて足首トルクを操作することにより、ZMP の位置の検出を行い、かつ ZMP を目標位置へ操作が可能であると考えられる。

### 3. ZMP を利用した制御

次に、足首トルクによる ZMP の操作を経由して歩行ロボットの制御を行う方法<sup>[3]</sup>について考える。簡単な例として、図 11 に示す倒立振子を用いる。ここで、振り子の長さ  $\ell$  は直動関節により伸縮するものとする。 $X$  軸を床面、トルク  $\tau$  を足首トルク、力  $F$  を歩行による蹴り力と考えれば、この倒立振子は歩行運動の非常に単純なモデルと考えることができる。ロボットの運動方程式は、質点位置  $(x, y)$  を用いて (10) 式で表わされる。

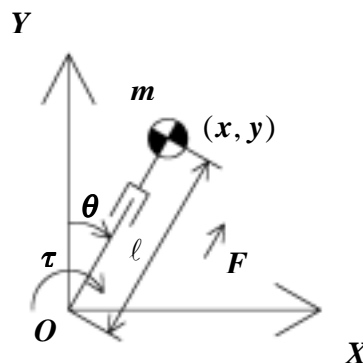


図 11 モデル化した直動関節ロボット

$$\begin{aligned} m\ell c\ddot{x} - m\ell s\ddot{y} - mg\ell s &= \tau \\ ms\ddot{x} + mc\ddot{y} + mgc &= F \\ \because s &= \sin\theta, c = \cos\theta \end{aligned} \quad (10)$$

さらに ZMP の位置  $\delta$  は、 $\tau$  と  $F$  を用いて (11) 式で表わされる。

$$\delta c\ell F + (\ell - \delta s)\tau = 0 \quad (11)$$

また、直動関節ロボットの重心位置に作用する力は、図 12 のようになる。質点に作用する力を基に運動方程式を表わすと、(12) 式になる。

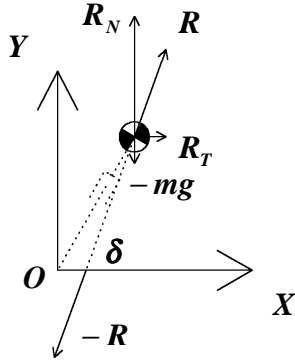


図 12 重心に作用する力

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= R_T \\ m\ddot{y} &= R_N - mg \end{aligned} \quad (12)$$

また ZMP の位置  $\delta$  は、足首ジョイントが床面に近ければ  $\tau$  と  $R_N$  を用いて (13) 式で表わされる。

$$\tau = R_N \cdot \delta \quad (13)$$

これらの関係より、質点座標を目標位置

$(x_{ref}, y_{ref})$  に制御することを考える。はじめに、鉛直方向の位置制御について考える。(12) 下式より、 $R_N$  を次式で与えれば制御が可能と考えられる。

$$R_N = y_{ref} - y - \dot{y} + mg \quad (14)$$

このとき  $y$  は、

$$m\ddot{y} + \dot{y} + y = y_{ref} \quad (15)$$

(15) 式を満足するので、 $y$  は指数関数的に  $y_{ref}$  に収束する。このように  $R_N$  を与えることは、(11) (12) (13) 式より、

$$F = \frac{\ell + \delta s}{\ell c R_N} \quad (16)$$

(16) 式で表されることを利用して、力  $F$  を供給することにより可能である。次に、水平方向の位置制御について考える。(10) 上式、(13) 式より、

$$m\ell c\ddot{x} - \ell s(m\ddot{y} + mg) = \tau \quad (17)$$

図 12、(12) 式より (17) 式は、(18) 式となる。

$$m\ddot{x} - x R_N = R_N \delta \quad (18)$$

(18) 式は、(19) 式のように整理できる。

$$m\ddot{x} = R_N (x + \delta) \quad (19)$$

鉛直方向の制御により、 $y \rightarrow y_{ref}$ 、 $R_N \rightarrow mg$  と収束することを考慮すれば、十分時間の経過した後は、 $x$  は次式に従う。

$$\frac{y_{ref}}{g} \ddot{x} = x + \delta \quad (20)$$

そこで、 $\delta$  を次式の通り与える。

$$\delta = -2x - \dot{x} + x_{ref} \quad (21)$$

このとき、 $x$  の運動は、

$$\frac{y_{ref}}{g} \ddot{x} + \dot{x} + x = x_{ref} \quad (22)$$

を満足し、 $x$  は  $x_{ref}$  に収束する。

以上は、簡単な倒立振子を用いての議論である。この考え方を多自由度の一般的な歩行ロボットへ応用出来れば、以下の点において有用であると考えられる。

- 歩行の安定性の問題を実時間制御で解決できる。(従来はあらかじめ運動計画を行う方法<sup>[1][4][5]</sup>が用いられている。)
- 計画された軌道への高精度の追従が必要とされないので、人間に近い柔軟な歩行運動が可能と考えられる。

## 4 . おわりに

本研究では、足部における力の関係による ZMP の表現および、ZMP の操作法を提案した。また、提案をもとに足首トルク入力を定め、ロボット全体の歩行運動制御の関係につ

いての考察を行った。

今後は、ZMP の操作法を多自由度の一般的な歩行ロボットについて、検討していく予定である。

## 参考文献

- [1]加藤他訳 Vukobratovic.歩行ロボットと人間の足.日刊工業新聞社,1975.
- [2]小幡,藤本,河村,ZMP 制御に基づく 2 足歩行ロボット制御.日本機械学会[No.99-9]ロボティクス・メカトロニクス講演会 '99 講演論文集,1999.
- [3]水戸部,那須,二足歩行ロボットのゼロモーメント点を制御入力として用いる制御則,第 14 回日本ロボット学会学術講演会, pp.187-188, 1996.
- [4]高西,石田,山崎,加藤,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 巻 4 号, pp.325-336, 1985
- [5]山口,高西,加藤,上体運動により 3 軸モーメントを補償する 2 足歩行ロボットの開発,日本ロボット学会誌,11 巻 4 号, pp.101-106,1993