6軸力センサを用いた2足歩行ロボットの ZMP 測定システムの開発

李 清 華* 高 西 淳 夫** 加 藤 一 郎**

Development of ZMP Measurement System for Biped Walking Robot Using Universal Force-Moment Sensors

Qinghua LI Atsuo TAKANISHI Ichiro KATO

The authors have been using the ZMP (Zero Moment Point) as a criterion to distinguish the stability of walking for a biped walking robot. If the ZMP during robot walking can be measured, it is possible for a biped robot to realize stabler walking by a control method that makes use of the measured ZMP.

In this paper, a method that measures the ZMP throughout the whole walking phase is proposed. A ZMP measurement system using two universal force-moment sensors is developed and installed into a biped walking robot. The accuracy of the ZMP measurement system is experimentally confirmed, and the ZMP throughout the whole walking phase is measured.

Key Words : Biped Walking Robot, Stability of Biped Walking, ZMP Measurement

1. は じ め に

2足歩行は、人間が持ついろいろな優れた機能の一つであり、これを機械で実現するのは、たいへん興味深い研究テーマである。2足歩行ロボットの制御は、現代制御理論、機械メカニズム、バイオメカニズムなどいろいろな視点で研究が行われてきた^{1~4)}。

筆者らは、バイオメカニズムの視点から、人間の歩行のメカニズムを解明することを最終目標としている。1986年、路面の凹凸や外乱に対応するために、上体を歩容安定化の機構として利用する2足歩行ロボットWL-12を開発した。その制御方式として、ZMP規範⁵⁾を用いた上体補償型2足歩行制御方式を採用している⁶⁾。その概略は、まず歩行前に路面の地形に合わせて任意の下肢運動パターンを作成する。次に、足部と路面との接点が形成する支持多角形(安定領域内)に入るようにZMP

軌道を設定する。さらに、それを動的に補償する上体部運動パターンを既にわれわれが提案している計算スキーム⁶⁾を用いて算出する。そして、歩行中にそれらの運動パターンを用いてロボットをプログラム制御することで歩行を実現するというものである。

しかし、上記の歩行制御方式では、歩行中の実際のZMPを計測・利用しているわけではない。もしZMPを実測できれば、それを利用した歩行制御が可能となり、より安定性の高い歩行の実現にとって有効であると考えられる。

これまでのところ、人間の歩行解析などにおいてフォースプレートやPLC(Pylon Load Cell)などを用いてこれを計測した例はあるが^{7,8)}、歩行ロボットにおいてこれを実現した例はまだない。

そこで、われわれは6軸力センサを用いたZMP測定システムを開発し、そのシステムを2足歩行ロボットに搭載し、歩行中のZMPの測定を実現することを本研究の目的とした。

原稿受付 1991年12月21日

* 早稲田大学大学院理工学研究科

** 早稲田大学理工学部

2. ZMP 測定システムと計算スキーム

2.1 ZMP 測定システム

ZMP の測定はオフラインで行われる。歩行中の ZMP の測定には、6 軸力センサ (Universal Force-Moment Sensor, UFS) システムを 2 セット使用している。6 軸力センサではセンサ本体からのアナログ信号が増幅され、高周波ノイズが除去される。さらに、アナログ信号はデジタル信号に A/D 変換され、プロセッサボードでデータ間のクロスカップリングの除去、デジタルフィルタリングなどの処理がなされ、最終的に精度が高いデジタル出力が得られる。

6 軸力センサは 2 足歩行ロボットの両脚の下腿部に設置され (Fig. 1), 歩行中のロボットの下腿部にかかる 6 軸力データはシリアル通信回線を介してロボットの制御用コンピュータに送られ、メモリにストアされる。さらに歩行後、制御用コンピュータに蓄えられた 6 軸力データはパソコンにロードされる。そして、以下に述べる計算スキームを用いて歩行中の ZMP 軌跡が再現される。

2.2 6 軸力による ZMP の算出

6 軸力センサから得られたデータは 6 軸力データであり、このデータを用いて ZMP を計算する手続きが必要である。

ロボットの足が着地している際、センサより上にある部分が路面に対し作用する力とモーメントが 6 軸力センサにより測定される。しかし、センサより下にある足部が路面に対し作用する力とモーメントは、6 軸力センサによって測定することができない。したがってその分は Fig. 2 のモデルを用いて ZMP を計算することにした。6 軸力センサ S に、ロボット各部の運動および重力により並進力 F とモーメント M がかかっているものとする。このとき、支持脚の足底面内の任意の点 P についての運動方程式は、d'Alembert の原理を用いると次のようになる。

Fig. 1 Photograph of the lower-limbs with UFSs

Fig. 2 Model of ZMP calculation using force-moment data

$$\vec{PS} \times \vec{F} + \vec{M} + \vec{PA} \times m(\vec{G} + \vec{a}) + \vec{M}_p = 0 \quad (1)$$

ただし、

m : 足首 A の質量

$G = (0, 0, g)$: 重力加速度

$F = (F_x, F_y, F_z)$: 6 軸力センサ S にかかる並進力

$M = (M_x, M_y, M_z)$: 6 軸力センサ S にかかるモーメント

$S = (x_s, y_s, z_s)$: 6 軸力センサ S の位置

$A = (x_a, y_a, z_a)$: 足首 A の位置

$a = (\ddot{x}_a, \ddot{y}_a, \ddot{z}_a)$: 足首 A の加速度

その床反力モーメントのうち $M_{px} = M_{py} = 0$ となる点が ZMP である。この条件を入れて式 (1) を変形すれば、ZMP の式 (2) を導くことができる。

$$\left. \begin{aligned} X_{zmp} &= \frac{x_a m(\ddot{z}_a + g) - m \ddot{x}_a z_a + x_s F_z - z_s F_x - M_y}{m(\ddot{z}_a + g) + F_z} \\ Y_{zmp} &= \frac{y_a m(\ddot{z}_a + g) - m \ddot{y}_a z_a + y_s F_z - z_s F_y + M_x}{m(\ddot{z}_a + g) + F_z} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

この式を用いることで、支持脚の ZMP をその脚の 6 軸力センサにかかる 6 軸力データにより算出することができる。

一般に 2 足歩行においては、単脚により支持されている単脚支持相と両脚により支持されている両脚支持相との 2 つの相が交互に現れる。そのために、全歩行周期におけるロボットの ZMP の算出をするには、単脚支持相と両脚支持相それぞれの場合において、以下のようなスキームで計算を行う。

(1) 単脚支持相

単脚支持相においては、遊脚側は足部から直接路面に対し力を作用することはない。このときロボットは開いたシリアルリンク機構と見なせ (Fig. 3 参照), 式 (2) を用いて立脚側の ZMP を計算することで、ロボット全体の ZMP を求めることができる。

(2) 両脚支持相

両脚支持相においては、左右両脚が足部を介して直接

Fig. 3 Calculation of ZMP in a single support phase

Fig. 4 Calculation of ZMP in a double support phase

路面に力を作用している。そこで、まず式(2)を用いて左右の脚それぞれの6軸センサで測定された6軸力により、各々の脚のZMPを算出する。次にロボット全体のZMPは、左右の足のZMPを合成することにより得る。合成する方法として、各足の足底のZMPの位置を始点とした床反力ベクトルをFig. 4のように合成し、合成された床反力ベクトルと床面との交点がロボットのZMPとなる。これは式(3)により求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} X_p &= \frac{F_{z1}X_1 + F_{z2}X_2}{F_{z1} + F_{z2}} \\ Y_p &= \frac{F_{z1}Y_1 + F_{z2}Y_2}{F_{z1} + F_{z2}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Fig. 5 Photograph of WL-12 R III

ただし、

$ZMP = (X_p, Y_p, 0)$: ロボット全体の ZMP

$ZMP_1 = (X_1, Y_1, 0)$: 右足の ZMP

$ZMP_2 = (X_2, Y_2, 0)$: 左足の ZMP

$F_1 = (F_{x1}, F_{y1}, F_{z1})$: ZMP_1 における床反力

$F_2 = (F_{x2}, F_{y2}, F_{z2})$: ZMP_2 における床反力

3. ZMP 測定実験

ZMP 測定システムを2足歩行ロボット WL-12 R III (Waseda Leg-12 Refined III) に搭載し、ZMP 測定実験を行った。

3.1 2足歩行ロボット WL-12 R III と制御システム

2足歩行ロボット WL-12 R III の写真を Fig. 5 に示す。その自由度構成は、片脚につき腰・膝および足首各、ビッチ軸の3自由度、上体ビッチ・ロール軸の2自由度、合計8自由度である。上体に30[kg]の重りを搭載し、総重量103[kg]となっている。

アクチュエータとしては、油圧式の RA (Rotary Actuator) とサーボ弁を組み合わせた電気-油圧サーボシステムを採用している。各アクチュエータにはレゾルバを取り付けることで、各関節の角度と角速度の同時検出を可能としている。

本ロボットの制御システムの概略を Fig. 6 に示す。この制御システムには、4台の16ビットマイクロコンピュータを使用している。3台のコンピュータはそれぞれ右脚のアクチュエータ、左脚のアクチュエータ、上体のアクチュエータを直接制御しており、各々ローカルに位置(角度)フィードバックを行っている。もう1台のコンピュータは、他の3台のコンピュータの上位にあり、メインコンピュータとして、ホストコンピュータとの通

Fig. 6 Control system of WL-12 R III

信や、出力角度パターンの補間、ロボットの全体のモータなどを行っている。

3.2 片足X方向一点接地の ZMP 測定実験

ZMP 測定システムの有効性を確かめるため、片足はX軸方向一点接地させ、もう片足は全点接地させた状態で (Fig. 7 参照) ロボットに外力を加えたときの ZMP を測定した。このとき、X軸方向一点接地側の足が、路面に対し作用する力は、X軸方向では接地点に拘束され

Fig. 7 State of one-leg-full-support with one-point-ground-touch

Fig. 8 ZMP trajectories on X axis in the state of one-leg-full-support with one-point-ground-touch

ている。すなわち、その足の ZMP はX軸方向では接地点に限定されていると考えられる。

これを確認するために、ロボットを片足 (左足) X 方向一点接地、片足 (右足) 全点接地の状態 で静止させ、ロボットの腰部を後方から人間が引っ張ることにより外力を加えるときの ZMP 測定実験を行った。その結果 (Fig. 8), ロボットの全点接地側の足のX軸方向の ZMP は外力を加えることによっても変化しているが、X軸方向一点接地側の足のX軸方向の ZMP は、ロボットが倒れない限り、任意の外力を受けても、その接地点で動かずに拘束されている。このことは、先の考え方と一致している。これにより、ZMP 測定システムの有効性を確認した。

3.3 全歩行周期における ZMP 測定実験

2 足歩行ロボット WL-12 R III を使い、いろいろな速度で歩かせて、全歩行周期において ZMP を測定する実験を行った。制御方式としては、第 1 章で述べた上体補償型 2 足歩行制御方式を適用している。ロボットの腰部位置に対する相対的な ZMP として、その結果を Fig. 9 に示す。実験結果によると、

(1) ロボットの実測の ZMP は安定領域に入っていることがわかる。つまり、ロボットが歩行するためには、ZMP が安定領域内に入らなければならないという ZMP 規範と一致している。

(2) ロボットの歩行速度が速くなると、実測 ZMP の振動が大きくなるという傾向が現れている。これは、歩行が速くなるにしたがって、ロボットが不安定になっていってしまうということがいえる。実際に、2 足歩行ロボットの歩行の実現は、低速の静歩行より高速の動歩行の方が困難であるという事実があるが、この傾向は、この事実を裏付けていると考えられる。

(3) 実測 ZMP と設定 ZMP との間にはかなり誤差

Fig. 9 ZMP trajectories on the moving coordinate throughout the whole walking phase with step length 30[cm] and various walking speeds

があることが確認できる。この誤差が生じる原因として、実際の機械モデルと計算モデルとの各種物理パラメータの誤差、またはロボットの構造部材の弾性によるたわみ、あるいは足が接地する際生じる衝撃などが考えられる。

4. 結 論

結論としては、6軸力センサを用いて2足歩行の全歩行周期におけるZMPを測定する方法を提案し、実際にZMP測定システムを開発した。また、このシステムを搭載したロボットを用いて全歩行周期においてZMPを実測することに成功した。今後は、この実測したZMPを利用してロボットの運動を制御し、さらに安定な歩行を実現したいと考えている。

参 考 文 献

- 1) T.Mita, et al., "Realization of a high speed biped using modern control theory", Int. J. Control, Vol.40, No.1, pp.107-119, 1984.
- 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, pp.459-466, 1990.
- 3) H.Funabashi, et al., "Synthesis of leg-mechanisms of biped walking machines (part 1: synthesis of ankle-path-generator)", Bull. JSME, Vol.28, No.237, pp.537-543, 1985.
- 4) 高西, 他, "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巻4号, pp.325-336, 1985.
- 5) M.Vukobratović, et al., "On the stability of biped

- locomotion," IEEE Trans. on Biomedical Engineering, Vol.BME-17, No.1, 1970.
- 6) 高西, 他, "上体補償型2足歩行制御方式", 第26回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 1987.
 - 7) 江原, 他, "歩行の効率", バイオメカニズム9, pp.93-104, 東京大学出版会, 1988.
 - 8) 森本, 土屋, "移動式義足歩行機能計測システム", バイオメカニズム8, pp.251-263, 東京大学出版会, 1986.
 - 9) 高西, 他, "6軸力センサを用いた2足歩行ロボットのZMPの測定法, ~単脚支持相におけるZMPの実測~, 第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.689-690, 1989.
 - 10) Q. H. Li, et al., "A Biped Walking Robot Having A ZMP Measurement System Using Universal Force-Moment Sensors," Proc. of IROS '91, pp.1568-1573, 1991.

李 清華 (Qinghua LI)

1965年12月24日生。1986年中国上海交通大学自動制御学科卒業。1989年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程入学。1991年同課程修了の後、博士課程入学。現在に至る。2足歩行ロボットに関する研究に従事。(日本ロボット学会学生会員)

加藤一郎 (Ichiro KATO)

1925年5月2日生。1950年早稲田大学理工学部電気工学科卒業。現在同機械工学科教授。ロボット学、サイボーグ学などの研究に従事。

(日本ロボット学会名誉会員)

高西淳夫 (Atsuo TAKANISHI)

1956年4月12日生。1985年早稲田大学大学院理工学研究科博士課程修了。同年同大理工学部助手。1988年同専任講師を経て、1990年より同助教授。2足歩行ロボット、咀嚼ロボットなどヒューマノイド関連の研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会、バイオメカニズム学会などの会員。工学博士。

(日本ロボット学会正会員)