バネ-質点系による ZMP 制御および
その準受動歩行ロボットへの応用*後 藤 篤 祉^{*1}, 木 田 智 晃^{*2}, 水 戸 部 和 久^{*3}A ZMP Controlling Mechanism by Using a Spring Mass System and
Its Application to a Powered Passive Walking RobotAtsushi GOTO, Tomoaki KIDA and Kazuhisa MITOBE^{*4}^{*4} Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University,
4-3-16 Jyounan, Yonezawa-shi, Yamagata, 992-8510 Japan

On the purpose of achieving a human-like high energy efficient walking robot, many research projects use actuators attached on the waist or ankle joints of passive dynamic walking mechanisms. While on the other hand, we developed another type of semi-passive walking robot that is driven by the harmonic oscillation of a spring-mass system. In the mechanism, spring forces are generated at both sides of the robot by the simple harmonic motion of a spring-mass system which is oscillated by a small sized servo motor. The spring forces control the ZMP (Zero Moment Point) in the lateral direction, in sync with the swing leg, which is generated by the same forces as well. Choosing the gait cycle at the resonance frequency, significant decrease of the motor power and energy consumption is possible. Gyros, micro switches and wire displacement sensors are attached to the robot for measuring the angle of the legs, foot contact and spring extension. Gait cycle, spring forces, ZMP in the lateral direction are analyzed based on the measurements.

Key Words: Passive Dynamic Walking, Biped Robot, Zero Moment Point, Spring Mass System, Motion Control, Legged Locomotion, Mobile Robot

1. 結 言

二足歩行ロボットの制御において、床面反力を集約するゼロモーメント点 (ZMP) に適切な目標軌道を与えることで動的バランスを確保する方法がある^①。多くの研究では ZMP の目標軌道を実現するようにロボット全体の運動計画を行い、歩行制御の実行において計画された運動軌道への追従制御を行う方法がとられている。追従制御においては産業用ロボットと同様な精密位置決め制御が行われる。一方で、人間の歩行においては、腕の振りや左右方向への上体の振動などを有効に利用して歩行時の動的バランスが自然に保たれ滑らかな歩行が実現されており、ロボットへ応用する研究が行われている^②。そこで、本研究ではバネ-質点系の振動を利用して軌道制御によらずに簡便に左右方向への ZMP 制御を行う機構を製作し、歩行ロボットへの応用を試みる。これまでも、ロボットの関節

への補償入力や補償用おもりを用いて ZMP を補償する方法が提案されているが^③、本研究の方法は質点の運動方向を上下方向のみとし、重心の水平方向への移動を伴わない点およびバネ質点系の固有振動を利用することで、比較的低出力のサーボモーター一個のみで歩行生成されるメリットがある。

歩行ロボットの柔軟化やエネルギー効率の向上などを目的として、関節にアクチュエータのない受動歩行機械を応用する研究がある。受動歩行のメカニズムに関して、運動の軌道が安定な周期軌道になるための条件を路面の傾斜角度や機構の物理パラメータやポアンカレ写像の平衡点の安定性より解析する研究^{④⑤}、周期運動に非線形システムに特有の分岐現象やカオスが発生することを解析した研究^⑥などがある。また、足や膝などの機構に工夫をほどこし、実証的に受動歩行機械を実現する研究により自然な歩行形態が実現されている。^{⑦⑧}

受動歩行機械に近い自然な動きを保ちながら、アクチュエータを搭載して能動的に歩行制御を行う研究には、力学的エネルギーを規範として入力量を決定する方法^{⑨⑩}、周期運動の引き込み現象が生じるように

* 原稿受付 2008 年 11 月 11 日。

^{*1} 学生員, 山形大学大学院理工学研究科(〒992-8510 米沢市城南 4-3-16)。^{*2} 山形大学大学院理工学研究科。^{*3} 正員, 山形大学大学院理工学研究科。

E-mail: mitobe@yz.yamagata-u.ac.jp

加振入力を与える方法⁽¹¹⁾, 運動の初期状態のいくつかのセットに応ずる受動運動の軌道をデータベースとして, 現在状態に応じて最適な軌道を目標軌道として設定する方法⁽¹²⁾, 脚切り換えタイミングを安定化するための遅延フィードバック⁽¹³⁾を導入した研究などがある。実機レベルでの研究においては, 通常のロボットと異なり関節摩擦を小さくするために DD モーターを利用すること⁽¹⁴⁾や, 関節の柔軟性を保ちながら重量バランスをも適当に設定するために空気圧による人工筋を応用する方法などが研究されている⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。

本研究で提案する ZMP 制御方法は軌道計画および追従制御によらない ZMP 制御なので, 準受動歩行ロボットへの応用に適している。これまで受動歩行に関する多くの研究においては, ZMP が顕に考慮されてこなかった。本研究では足と床面との相互作用を考慮するツールとして ZMP を利用し, ロボットの ZMP をバネ-質点系よりの入力により簡便に制御し受動的な歩行制御を行う。

本論文の構成は以下のとおりである。2 章で提案するロボットの機構および加振系よりの作用と歩行運動の関係を説明し, 3 章で ZMP の条件および遊脚が発生する条件を説明する。4 章で実験結果を示し, 5 章で結論を述べる。

2. バネ-質点系により ZMP を操作する歩行ロボット

本研究では, 簡単な構造の受動歩行ロボットに, 提案する ZMP 操作機構を取り付けることで, 図 1 に示す歩行ロボットを製作した。詳しい構造を図 2 に示す。脚部は膝関節を持たない単純な構造であり, 腰部の軸に左右の脚がそれぞれベアリングを介して取り付けられている。ベアリングを脚部品に取り付けるケーシングはゴムブシュを用いており, 脚の回転軸は腰部の軸に対して厳密に固定されていない。これにより関節の横方向への自由度を与え, 遊脚を地面から浮かせることが可能となっている。ロボットの前傾および遊脚の振り出しがスムーズに行われるように, 足部は曲率 600mm の円弧となっている。ただし, 足部は脚に固定されており, 衝撃吸収のためのゴムシートを敷いた床面上では, 手で支えない状態でも静止して立つことができる。横方向に張り出した左右のビーム先端にプーリーを介してワイヤーによりゴムひもおよび重りがつり下げられ, バネ質点系を形成している。ロボット胴体部分に取り付けられたラジコン用サーボモータがワイヤー中央部を左右に往復運動させることで, ゴムひも-重りにより構成されるバネ振動系が加振される。

左右のゴムひもは一本のワイヤーでつながっている

ので, 重りが静止している状態ではモーター軸に重力負荷がかからず, モーター出力は振動を与える役割を果たしている。バネ質点系よりの作用力はバネ質点系が加振されると, バネの張力はビームの先端に作用する。作用力により ZMP を支持脚側へ移動し, 同時に遊脚が地面から浮きあがる。ロボット重心は静止状態において前傾するように調整してあるため, 遊脚は前方へ振り出される。

足部には遊脚の振り角度を測定するためのジャイロセンサ(近藤科学社製, KRG-3)と, 接地を検出するためのタッチスイッチが取り付けられており, 歩行の状態を検出できるようになっている。また, 左右の軸端には, ゴムひもの伸びを測定するためのワイヤー型変位センサ(MICRO-EPSILON 社製, WPS-250-MK30-P10)を取り付けてある。左右のゴムひもの伸びを測定することによって, あらかじめ求めておいたゴムひもの伸びと力の関係から, バネ質点系によって左右の軸端にかかる力を求めることができる。サーボモーターの駆動は, 胴体部のマイコンから, 目標角度指令値を与えることで制御されている。また, もう 1 つのマイコンでシリアルケーブルをとおしてセンサ情報を PC へ送ることができる。

Fig.1 Powered passive walking robot actuated by a spring-mass system

Fig.2 Mechanism of the robot

3. バネ質点系と ZMP および遊脚の条件

バネ質点系よりの作用力は, ZMP の支持脚方向への振動を引き起こし, 同時に遊脚を浮かせる働きをする. 2つの作用を図3のモデルにもとづいて考察する.

はじめに ZMP の横方向変位についての関係を示す. 両脚支持状態における ZMP は簡単に図4のモデルにもとづく静力学の関係として考える. ZMP からプーリーが取り付けられているビームの左右先端までのベクトルを $\mathbf{r}_\ell$ および $\mathbf{r}_r$ とし, ZMP から重心までのベクトルを $\mathbf{r}_G$ とする. バネ質点系から左右のビーム先端へ働く力を f_ℓ および F_r , ロボットの重心に働く重力を G_x とする. ZMP のまわりでこれらのモーメントの和が0になるので,

$$\mathbf{r}_r \times \mathbf{F}_r + \mathbf{r}_\ell \times \mathbf{F}_\ell + \mathbf{r}_G \times \mathbf{G}_x = 0 \quad (1)$$

この式の鉛直軸方向成分は次式となる.

$$(-L + x_z)f_r + (L + x_z)f_\ell + x_z mg = 0 \quad (2)$$

ただし, L はロボット中心からビーム先端までの水平距離, f_ℓ および f_r は $\mathbf{F}_\ell$ および $\mathbf{F}_r$ の鉛直軸方向の成分であり $\mathbf{F}_\ell$ および $\mathbf{F}_r$ は鉛直成分のみを含むものとする. (2)式より, 横方向 (X 軸方向) の ZMP の座標は以下のとおりとなる.

$$x_z = \frac{L(f_r - f_\ell)}{f_r + f_\ell + mg} \quad (3)$$

ここで, m はロボット全体の質量である. 振動系の運動により f_ℓ および f_r は正弦波状に変動するので, 作用力の鉛直方向成分 f_r および f_ℓ は同周期で位相が 180 度ずれている正弦波状の力と仮定し, これらの間に

$$f_r = m_w g + A \sin \omega t \quad (4)$$

$$f_\ell = m_w g - A \sin \omega t \quad (5)$$

の関係があるものとする. ここで, m_w はおもりの質量である. (3), (4)および(5)式によれば ZMP は次式のとおり左右へ振動する.

$$x_z = \frac{2LA}{(2m_w + m)g} \sin \omega t \quad (6)$$

(6)式によれば, ロボットの質量が大きくなるほど ZMP の変位量は小さくなるため, ロボットの中心からバネ質点系までの距離 L を大きくとる必要がある.

バネ質点系の重りは上下動のみするので, このような方法での ZMP 操作はロボット重心の水平方向へ移動を伴わない. 歩行運動のためには支持脚の切替と同期して支持脚側の足底に移動する必要がある.

次に, 遊脚が床面から離れた単脚支持状態での ZMP の横方向 (X 軸方向) への変位について, 簡単に, 遊脚重心の X-Y 平面内の並進運動のみ考慮して考察する.

図 4 においてビームを含め支持脚を除く部分を遊脚と
考え、遊脚重心の横方向および鉛直方向の座標を x_f お
よび y_f とする。このとき重心の並進の運動方程式は、
遊脚の質量を m' とすれば、

$$\begin{aligned} m'\ddot{x}_f &= -f_x \\ m'\ddot{y}_f &= -f_y + f_\ell + f_r - m'g \end{aligned} \quad (7)$$

と表される. ここで, f_x および f_y は H_1 点を經由して支持脚から遊脚へ伝えられる力の横および鉛直方向成分である. 支持脚の質量を m_s とすれば, 支持脚部品へ作用する力の釣り合いより床反力 R の横方向および鉛直方向成分 R_x および R_y は,

$$\begin{aligned} R_x &= -f_x = m\ddot{x}_f \\ R_y &= -f_y - m_s g = m'\ddot{y}_f - f_\ell - f_r + m'g - m_s g \\ &= m'\ddot{y}_f + (m' + m_s - 2m_w)g \end{aligned} \quad (8)$$

さらに、 H_1 点は摩擦等のない非駆動関節であることを仮定し、支持脚へ作用する各によるモーメントの釣り合いを考えれば、 $R_{1y}\delta + R_{1x}l = 0$ を満足する。

Fig.3 ZMP and the Applied forces

Fig.4 ZMP and the forces from the spring-mass system

ここで、 δ は図 4 に示すとおり、 H_1 より地面への投影点から ZMP までの距離、 l は H_1 の鉛直高さである。したがって、

$$\delta = \frac{lm'\ddot{x}_f}{(2m_m - m' + m_s)g - m'\ddot{y}_f} \quad (9)$$

により ZMP の位置を表すことができる。(9)式によれば、遊脚重心の運動が鉛直方向に限定される場合には、ZMP の横方向位置は H_1 点の真下に限定される。

次に遊脚が浮く挙動について考える。左右それぞれの遊脚は関節 H_1 および H_2 まわりの回転により形成されるので、それぞれの関節まわりのモーメントを考えることで遊脚条件を求めることができる。図 4 において、バネ質点系より作用する力 F_r および F_ℓ とロボットの支持脚を除いた部分に働く重力 $m'g$ による H_1 点まわりのモーメント M_1 を考える。両脚支持脚状態では、 M_1 は反時計まわりのモーメントであり、 H_2 側の足よりの反力によるモーメントと釣り合う。 M_1 が時計まわりのモーメントとなったときに遊脚は浮き上がる方向に加速されている。支持脚を除く部分の重心までの中心からの距離を r_c 、ロボットの中心から支持脚までの距離を D とすると、 H_1 点まわりのモーメント M_1 は、次式で表される。

$$\begin{aligned} M_1 &= (r_h + D)f_\ell - (r_h - D)f_r + (r_c + D)m'g \\ &= -2r_h A \sin \omega t + 2Dm_{uv}g + (r_c + D)m'g \end{aligned} \quad (10)$$

遊脚の浮き上がりが生ずる条件は M_1 の振幅により

与えることができる。以上の関係を時間軸に対して表した図 5 を用いて歩行のシーケンスを説明する。

Fig.5(a) Applied forces F_r and F_l

Fig.5(b) Lateral ZMP position

Fig.5(c) Moment about waist joints

振動系からの作用力は静止状態における重力を中心とした正弦波振動と仮定し、図 5(a)に表す。これと対応させて(3)式の ZMP の変動を図示すれば図 5(b)のグラフとなる。振動系からの力および遊脚の重力による H_1 点まわりのモーメント M_1 は図 5(c)のように図示される。 M_1 が負となる時間帯 T_1 において H_1 点回りの角運動量変化率は負となり、遊脚は浮く方向に回転する。また、 M_1 が正に戻った時点で遊脚は着地方向への運動へ転じる。脚が接地しかつ M_1 が正の状態では、床からの反力によるモーメントが M_1 と打ち消しあい、 H_1 点まわりの回転は静止状態となる。もう一方の足の浮く条件も同様に H_2 点まわりのモーメント M_2 を考えることで求めることができる。ただし、この場合には遊脚重力の作用点は H_1 の場合と逆側に r_c 離れた点である。モーメント M_2 が正の時間帯 T_2 において、 H_2 点の回りで遊脚は浮く方向に回転する。このように左右の遊脚が交互に生成される。

遊脚が前方へ振り出されるように、図 6 のようにロボット上体には前傾を与えている。静止状態において、脚の部品は鉛直軸に対し数度傾くように調整されている。この前傾角度が大きいほど遊脚重力による腰部の

関節まわりのモーメントが、遊脚を振り出す方向に大きく働き、歩幅が大きくなる。このことは実験結果により示す。

Fig.6 Inclination of the body

4. 歩行実験

製作したロボットの歩行の連続写真(約 0.5[s] 間隔)を図 7 に示す。

Fig.7 Experimental walking of the robot

サーボモーターへの加振は時刻 $t=0$ から始まり、モーター軸角度を ± 20 度で三角波状に往復運動させている。サーボモーターによる加振がはじまり約 2 秒後にロボットの歩行が開始する。ロボットへの動力供給はバネ質点系を加振するサーボモーターのみであり、固有振動数付近で加振し共振させることで、小型のラジコンサーボモーター(最大トルク $0.035[\text{kg}\cdot\text{m}]$)のみで駆動される。

歩行実験から得られた各センサのデータの解析結果を、以下の図 8 から図 10 に示す。なお今回の実験条件は、おもりの重さを $0.5[\text{kg}]$ 、ゴムのバネ定数を約 $58[\text{N/m}]$ 、足首角度を $3[\text{deg}]$ とした。

Fig.8 Swing Angle of the legs when the amplitude of the servo motor is 40 deg.

図 8 は足部に取り付けたジャイロセンサにより取得した角速度データを積分して求めた、左右の遊脚の初期の姿勢からの傾き角度を表わしている。このグラフからは、バネ-質点系からの振動を受けて、約 1 秒後からロボット本体が徐々にゆれ始め歩行を開始し、約 2 秒後から左右の脚が交互に大きく振れ始めている様子がわかる。6 から 8 秒付近において、交互の足の触れが乱れているのは、ロボット胴体の前進に伴い、バネ質点系の鉛直方向の振動に加えて、質点の前後方向への振れが発生し外乱となったことが原因と考えられる。

Fig.9 Moment of force around the waist joints and touch sensor signal

図 9 はワイヤー型変位センサを用いて、左右の軸端にかかる力を求め、その軸端の力を式(10)の第一式の F_r, F_l に代入し、求めた左右の腰関節周りのモーメントの変化の様子である。なおタッチセンサは左足接地が $+$ 、右足接地が $-$ 、両足接地が 0 になっている。グラフの様子をわかりやすくするため、2~4[s] の間の様子を下に拡大した。

このグラフからは、接地の判断を行うシステムが、片足につきタッチセンサ 2 つで構成された単純なものであるため、センサが ON, OFF する時刻に誤差があると考えられるが、第 3 章で解説した図 5(c) とほぼ同じように、モーメントが $0[\text{N}\cdot\text{m}]$ をまたいで、M1 の値が負の値になると、それまでの一時的な両足支持の状態から、右の脚に浮く力が働き、左足支持の状態になっていることがわかる。同様に M2 の値が $0[\text{N}\cdot\text{m}]$ をまたいで正の値になると、左の脚に浮く力が働き、右足支持の状態へと移っていく様子がわかる。

Fig.10 Lateral ZMP position

図10は式(3)を用いて求めた、ZMPの横方向の位置の変化を表したものである。なお、式(3)はロボットの横方向の運動の影響を無視して、バネ質点系よりの力及び重力を考慮した式となっているが、脚が接地する瞬間など比較的大きな加速度が生じている時間以外で ZMP の大まかな推移を示しているものと考えられる。この図からは、第3章で示した図5(b)のように、ZMPが支持脚の範囲を飛び出すことなく、左右に振動していることがわかる。また ZMP が左右に移動するのと同時に支持脚も左右が切り換わり歩行を行っていることもわかる。

これまでの結果は、前述した力学的解析の際に考えたものと同様の結果を示している。このことから、今回導いた力学的見解は、今回製作した準受動歩行ロボットにおいて応用可能であることがわかる。

なお、本ロボットは静止時においても転倒しない安定な形状なため、歩行可能なバネ質点系の振動周期においては比較的大きな許容範囲がある。図11にはゴムひもを変更し、周期を0.8[s]から1.0[s]とした場合の図8に対応する歩行結果を示す。

Fig.11 Experimental result for a walking cycle

次に、ロボットの傾角度の大きさが歩行に与える影響を調べるために、傾角度を2~4[deg]の間で変えて歩行実験を行った。図12に左右の脚の相対角度の変化の様子を示す。なお、その他の実験条件は、おもりの重さを0.5[kg]、ゴムのバネ定数を58[N/m]とした。

Fig.12 Effect of variation in the inclination of the upper body

図12からは、ロボットの傾角度が大きくなるにつれて、左右の脚の間の相対角度、つまりロボットの歩幅が大きくなっていることがわかる。また、ロボットの歩行周期には変化がないこともわかる。

また、この歩行実験では、左右の軸端の力、腰関節周りのモーメント、左右方向のZMPの移動など、そのほかの取得可能なデータについては、傾角度の変化による大きな変更はみられなかった。

以上の実験結果から、ロボットの傾角度を変えることで、歩行周期などのその他のパラメータに変化を与えることなく、ロボットの歩幅を変化させることができることがわかった。これは傾角度が大きいほど、遊脚を振り出す重力モーメントが大きく働くためだと考えられる。

5. 結 言

バネ-質点系の振動により簡便に ZMP を横方向へ振動させる機構を提案し、受動歩行を利用した歩行ロボットの制御へ応用可能であることを実験的に示した。本方法の利点は装置の簡便さおよび同一の装置において遊脚の発生も制御可能であること、さらにバネ-質点系の固有振動を利用することで、小さなアクチュエータによる小さな動力で歩行運動を発生させることが可能である点である。

今後の研究課題は、膝関節を有する脚機構への拡張および、足の接触や上体姿勢などのセンサー情報を利用して歩行周期や速度にバリエーションを持たせるこ

となどがあげられる

文 献

- (1) M, Vukobratovic., B, Borovac., D, Surla., and D, Stokic., *Scientific fundamentals of robotics 7. Biped locomotion: Dynamics, stability, control and application*, (1990), Springer-Verlag, New York.
- (2) Iida, F., Raja, D., Chandana, P., Design and Control of a Pendulum Driven Hopping Robot, *Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2002), pp.2141-2146.
- (3) Li Q., TAKANISHI, A., and KATO, I., Learning Control of Compensative Trunk Motion for Biped Walking Robot based on ZMP Stability Criterion, *Journal of the Robotics Society of Japan* Vol.11, No.4(1993), pp.557-563.
- (4) T, McGeer., Passive Dynamic Walking; *Int. J. Robotics Research*, Vol. 9, No.2(1990), pp.62-82.
- (5) Ikemata, Y., Sano, A., and Fujimoto, H., Generation and Local Stabilization of Fixed Point based on a Stability Mechanism of Passive Walking, *Journal of the Robotics Society of Japan* Vol.24, No.5(2006), pp.632-639.
- (6) Osuka, K., and Kiriara, K., Motion Analysis and Experiment of Passive Walking Robot Quartet II, *Journal of the Robotics Society of Japan* Vol.18, No.5(2000), pp.737-742.
- (7) S, Collins., A, Ruina., R, Tedrake. and M, Wisse., Efficient bipedal robots based on passive dynamic walking; *Science*, Vol. 307(2005), pp. 1082-1085.
- (8) S, Collins., and A, Ruina., A bipedal walking robot with efficient and human-like gait, *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2004), pp. 4656-4661.
- (9) A, Goswami., B, Espiau. and A, Keramane., Limit cycles and their stability in a passive bipedal gait, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1996), pp. 246-251.
- (10) F, Asano., M, Yamakita., N, Kamamichi. and Z, W, Luo., A novel gait generation for biped walking robots based on mechanical energy constraint, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 20, No. 3(2004), pp.565-573.
- (11) K, Osuka. and Y, Saruta., Development and Control of New Legged Robot Quartet III, *Proceedings of the IEEE/ISJ International Conference on Intelligent Robots and Symposium*, (2000), pp. 991-995.
- (12) Miyakoshi, S., Bipedal Walking with a Memory-based Motion Controller, *Journal of the Robotics Society of Japan* Vol.24, No.5(2006), pp.623-631.
- (13) Osuka, K., Sugimoto, Y. and Sugie, T., Stabilization of Semi-Passive Dynamic Walking based on Delayed Feedback Control, *Journal of the Robotics Society of Japan* Vol.22, No.2(2004), pp.193-199.
- (14) M, Wisse. and J, van., Frankenhuyzen., Design and construction of MIKE; a 2D autonomous biped based on passive dynamic walking; *Proceedings of the 2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Mechanics*,(2003).
- (15) Hosoda, K., Biped Walking Utilizing Robot's Dynamics with Antagonistic Pairs of Pneumatic Actuators, *Systems, Control and Information* Vol. 49, No. 10(2005), pp411-416.