

## 直動関節を用いた歩行ロボットの支持脚切り換え制御

Control of a prismatic jointed walking robot during the support change phase

長沢 洋司, 仲野隆司, 水戸部和久, 那須康雄

Hiroshi Nagasawa, Takashi Nakano, 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)

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

2足歩行ロボットが不整地を含むさまざまな路面状況に対応して歩行するためには, 遊脚の着地点を路面状況に応じて選択可能とすることが望ましい. そのためには路面状況に応じて, 一步あたりの歩幅を変更する必要がある. また, 広い範囲の歩行速度で歩行するためには, 歩行速度に応じて歩幅を変更することで, 効率的で安定した歩行が可能になると考えられる.

一般に歩幅を広くとれば, ロボットの歩行

は動的歩行となり歩行速度も速くなるために, 安定性を確保しながらの制御は難しくなる. この問題を考察するために, ロボットの重心が地面に対して一定の速度を持つように歩行する場合を考える. このとき, 地面反力の中心 (ZMP) [1] は重心の地面への投影点となる. ZMPは常に足底の範囲内に存在しなければならないので, 歩幅を足底長さよりも長く取るとは不可能となる. 例えば, 図1の状況では重心位置の地上面への垂直投影点は足底外に存在するために足底の浮き上がりが起こる. 人間は足底の浮き上がりを巧みに利用して支持脚の切り換えを行う.

しかしロボットの歩行制御においては、足底が常に地面に密着することにより、バランス確保のための制御が行いやすい。このため、歩行の全周期において、足底と地面との密着が保たれることが望ましい。

本研究では、直動関節を用いた2足歩行ロボットを用いて、重心位置の地上面への垂直投影点が足底領域外に存在する場合における歩行制御方法に関する考案を行う。また、その結果に基づき、安定な支持脚切り換えを行うためのアルゴリズムを示し、安定した2足歩行の実現を目的とする。

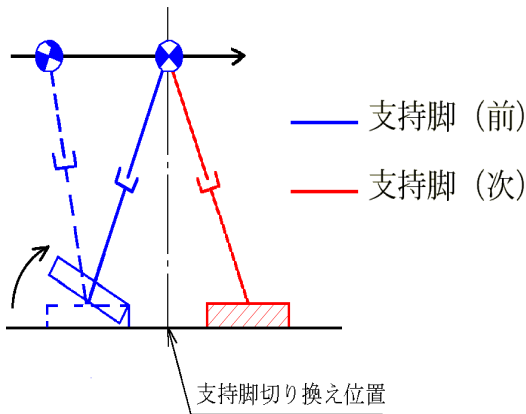


図1 歩幅を広くした時の持脚切り換え

## 2. ZMP を固定した時の重心運動

歩幅が足底長さを越える場合に、足底の浮き上がりを生ずることなく支持脚を切り換えるためには、支持脚切り換えの前後において重心速度を加速および減速する必要がある。この運動をスムーズに発生するために、本研究では足底内の一点にZMPを固定し足底の浮き上がりを防ぎながら、重心移動の制御を行うことにした。この運動は、人間が切り換え前の支持足のつま先から、切り換え後の支持足の踵へ床圧の中心をスイッチすることと類似である。ZMPを一点に固定した

場合の重心運動は、図2のようにZMPを支点とした倒立振子の運動となると考えられる。そこで、ZMPを固定した時の重心運動について考察する。

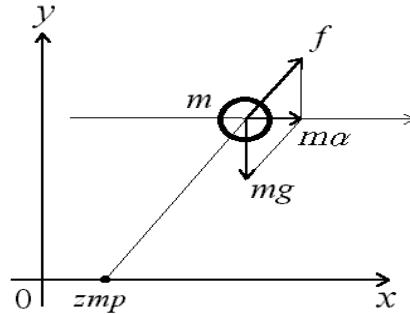


図2 地面と重心との間に作用する力の関係

以下の議論では、重心の運動を一質点の運動と考え問題を簡単化する。この場合、ZMPは図2の関係から次式で与えられる。

$$X_{ZMP} = \frac{x(\ddot{y} + g) - y\ddot{x}}{\ddot{y} + g} \quad (1)$$

さらに、簡単のために重心の地面からの高さを一定とすると、 $\ddot{y} = 0$ であり

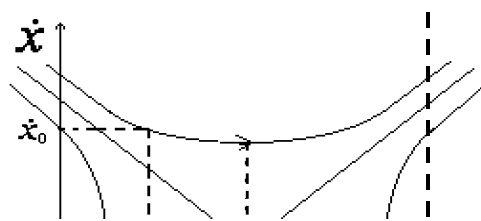
$$\left(\frac{y}{g}\right)\ddot{x} - x + X_{ZMP} = 0 \quad (2)$$

(2)式を重心の水平方向位置  $X$  と水平方向の速度  $\dot{X}$  で表すと、

$$\dot{x}^2 - \left(\frac{g}{y}\right)(x - X_{ZMP})^2 = C \quad (3)$$

但し、定数  $C$  は  $X_{ZMP}$  を固定した瞬間の重心状態より求めることができる。

(3)式より  $X - \dot{X}$  平面上で重心の動きを表すと図3のような初期値に依存して変化する双曲線となる。



支持脚切り換え位置  
 $(x_0, \dot{x}_0)$  は ZMP を固定した時の初期状態  
 図3 ZMP を固定した場合の重心軌道

$X_{ZMP}$  は足底内であれば任意の位置に固定可能である。このため  $X_{ZMP} = 0$  とした場合より、 $X_{ZMP} > 0$  で固定すると次の支持脚切り換え位置と比較すると重心速度は遅くなる。また  $X_{ZMP} < 0$  で固定した場合には重心速度は速くなる事が図3より確認できる。よって ZMP の操作により倒立振子の運動を行う重心に対して重心速度の調節が可能である。

同様に支持脚切り換えに対して図4のように定常歩行を設定する。この定常歩行に対して支持脚切り換え時に ZMP を踵側に移動させると図5のように支持脚切り換え前よりも重心速度は加速し、つま先側に移動させると図6のように定常歩行の重心速度に対し減速となる。この速度調節と荷重方法の関係は人間が実際に歩行時に行っている事と似ており興味深い事である。

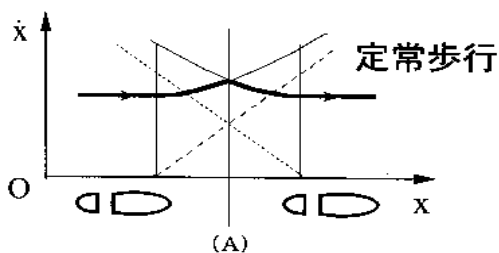


図4 定常歩行における重心軌道

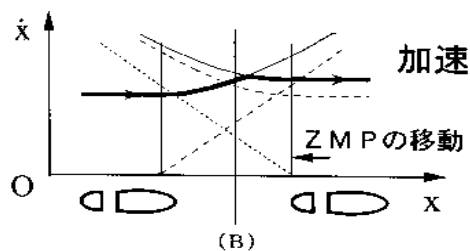


図5 ZMP の移動による重心速度の加速

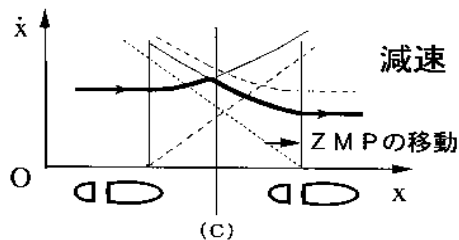


図6 ZMP の移動による重心速度の減速

倒立振子の運動を行う重心に対して重心速度を調節可能であることにより、動的歩行を行う歩行ロボットの姿勢を安定に保ち、安定した支持脚切り換えが可能になると考えられる。

### 3. 支持脚切り換え制御

#### 3.1 ZMP を操作量とした重心位置の制御

本研究では2節での考えに基づき、直動関節を有する2足ロボットの重心移動制御を行う。支持脚切り換え時には ZMP を固定するため、重心軌道は初期状態 (ZMP を固定した瞬間) に依存する。したがって、安定な歩行を維持するためには支持脚切り換えに移る瞬間の初期状態を正確に制御する必要がある。この条件を満足するために、支持脚切り換え時期以外 (重心の垂直投影点が支持足底内に存在する場合) には重心軌道が安定軌道となるように制御する。問題とする2足ロボットは図7のように簡便な機構および運動モデルを有するため、容易にそのような制御を実現することが可能である[2]。図8に制御則のブロック線図を示す。

本制御則は制御量である重心位置の座標を ZMP の位置へフィードバックすることにより重心位置の制御を行うものである。ZMP を操作するために制御系内にマイナーなフィードバックループを設ける。マイナーフィードバックでは(4)式を満足するような拘束を入力トルクに与える。

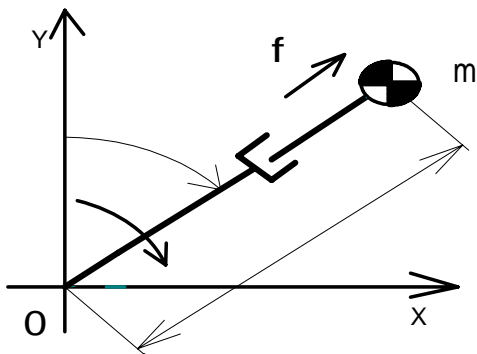


図7 支持脚のモデル化

- 拘束条件式 -

$$f\delta l \cos \theta + (l - \delta \sin \theta)\tau = 0 \quad (4)$$

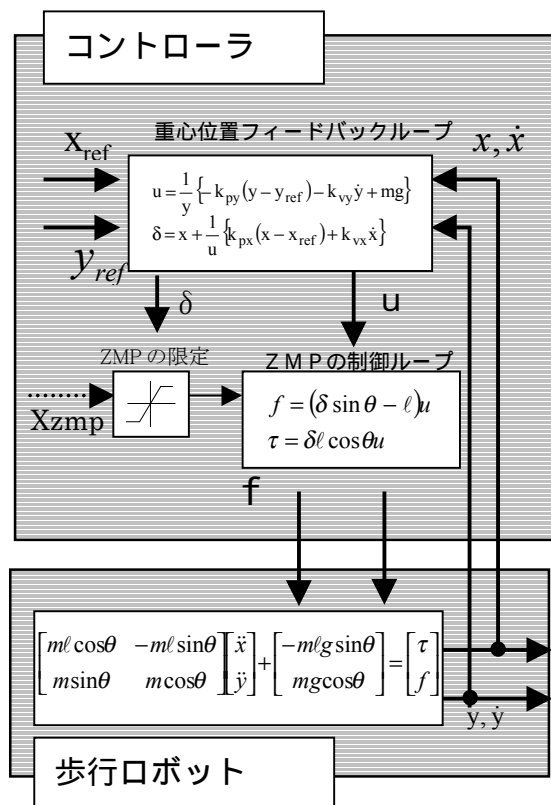


図8 制御則のブロック線図

### 3.2 支持脚切り換え制御

歩幅が広い場合における支持脚切り換え制御を考案するために2節での考察の結果を用いる事にした。支持脚切り換え時には重心位置のフィードバックを行わず、ZMPの制御のためのマイナーフィードバックループのみにより制御を行い、ZMPの固定位置を直接入力することにした。また、支持脚切り換えを行うまで固定したZMPの位置は変えないことにした。

## 4. 実験

### 4.1 直動関節を有する2足歩行ロボット

実験に用いた2足歩行ロボットを図9に示す。このロボットの高さは400mm、幅200mm、全重量1750gである。1脚あたり直動、回転の2自由度を有しており、上下動する胴体部からも足首にトルクが伝達可能とするために胴体部、脚部ともに平行リンクとした。また遊脚の着地を調べるために足底にスイッチを取り付けた。足底の進行方向の幅は80mmである。

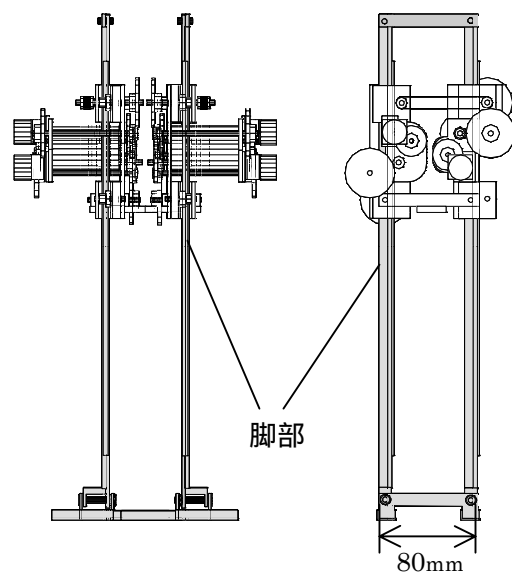


図9 2足歩行ロボットの外観

## 4.2 実験結果

本研究では考案した支持脚切り換え制御方法の有効性を確認するために実験を行った。まず ZMP を踵側やつま先側に移動させた時に、重心速度の調節が可能であるか確認するために実験を行った。

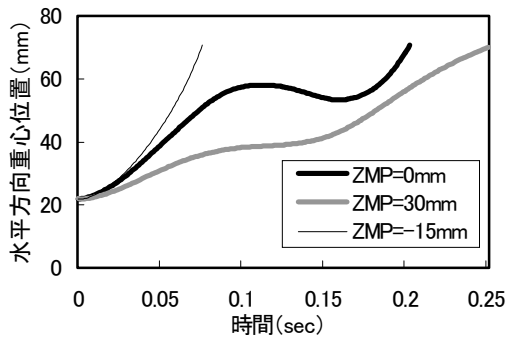


図 10 ZMP を固定した時の実験結果

図 10 に ZMP を固定した時の実験結果を示す。図 10 のグラフでは横軸を時間、縦軸を水平方向の重心位置とした。支持足底の中央が座標原点である。図 10 のグラフから、 $X_{ZMP} > 0$  とすると時間の経過に対して重心位置の変化が小さい。つまり、重心速度は  $X_{ZMP} = 0$  としたときに比べ遅くなっている事がわかる。 $X_{ZMP} < 0$  とすると短時間で重心位置が大きく変化しており重心速度が加速されている事がわかる。実験結果より、ロボットの機構に存在する摩擦や、遊脚の運動が影響している所があり理論的な軌道上を重心が移動しないことがわかった。しかし、ZMP の操作に基づき十分に重心速度の加減速が可能であると思われる。よって本研究で考案した支持脚切り換え制御が歩幅の広い歩行において適用可能と考えられる。

## 4.3 考案した制御による歩行実験

次に本研究では、考案した制御を用いて支持脚切り換えが安定に行えるかを確認するために、歩行実験を行った。支持脚に対する重心位置を図 11 に示すように 3 つの区間に分け、遊脚の着地による重心速度の影響をできるだけ小さくするために進行方向に対して図のように ZMP の与え方を変化させる。また、歩行は単脚支持の連続として重心位置制御を行った。

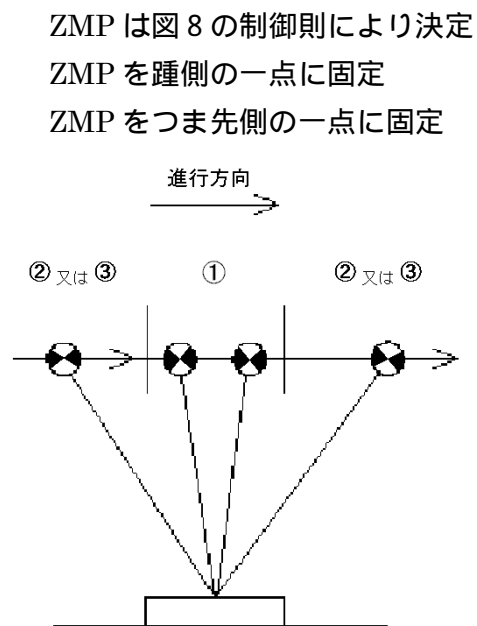


図 11 1 歩行における重心制御

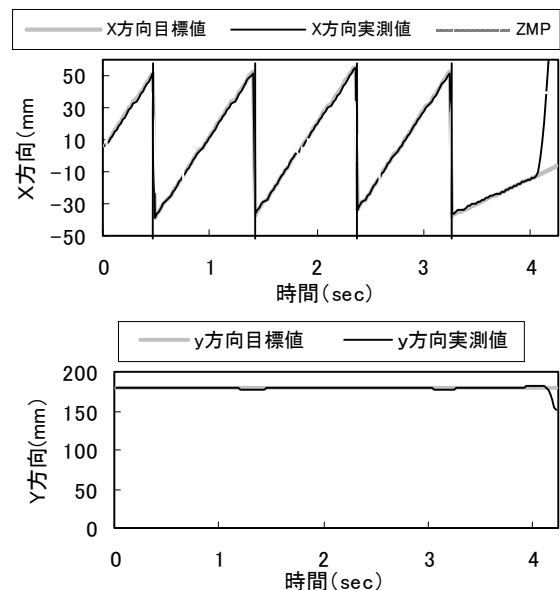


図 12 実験結果 (ZMP の固定区間なし)

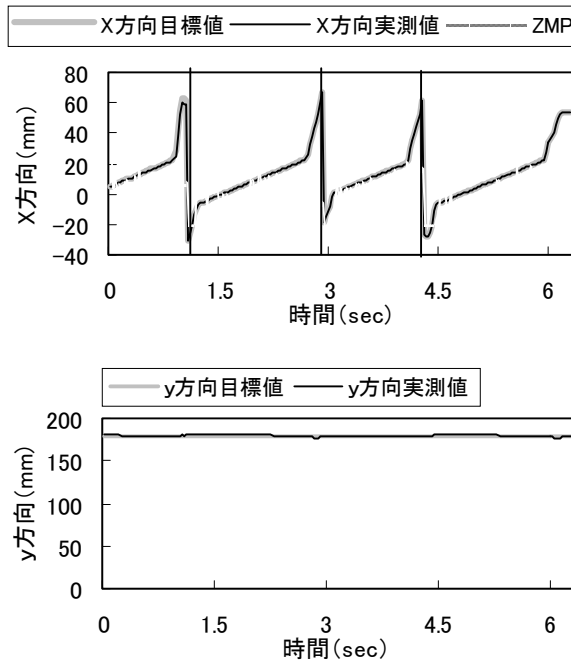


図 13 実験結果 (ZMP の固定区間あり)

比較のため ZMP の固定区間を設けず の制御のみでの歩行実験も行った .歩行実験の結果を図 12 , 図 13 に示す .

図 12 , 図 13 はそれぞれ , ZMP の固定区間なし , 固定区間を設けた時の重心位置のグラフである . 横軸を時間 , 縦軸を進行(X)方向 , および地面からの高さ(Y)方向とし , 支持脚足底から見た相対座標系で重心位置を表した . ZMP を固定した区間では重心位置の目標値が存在しないので目標値の代わりに実測値で表した . ZMP は足底の範囲から外れないように  $\pm 40\text{mm}$  の範囲に限定した . また進行方向重心位置のグラフにある縦線は支持脚切り換えを表しており , 最初の縦線が右足から左足への切り換えとなる .

図 12 のグラフにおいて , 支持脚切り換え前後に ZMP が足底の一端に移動しており , 足底が不安定な状態にあることがわかる . つまり , 動的歩行を行う場合 , の区間だけの歩行では安定した支持脚切り換えを行うこ

とは難しいと考えられる . ZMP の固定区間を持つ場合 , 歩行実験を行った結果 , 4 歩までの歩行が行える事を確認した . この結果 , 歩幅の広い歩行において考案した制御を用いることによって支持脚切り換えが安定して行えることが確認できた .

図 13 のグラフにおいて の区間から の区間に重心位置が移動する際に ZMP が急激に移動しているところがあるが , この原因として重心速度の急激な変化によるものと考えられる . の区間では重心速度の目標値を一定としているために , の区間での重心速度に対し の区間では減速を行うことになる . このために から 間では の重心速度を滑らかに での重心速度にする重心軌道を考える必要がある .

## 5. 終わりに

本研究では直動関節を用いた歩行ロボットの支持脚切り換え制御を考案し , 考案した制御の有効性を確認した .

考案した制御方法を用いて歩幅の取りうる範囲を広げ不整地の移動が実現可能とすることが今後の課題である .

### 参考文献

- 1) Vukobratovic h , M(加藤一郎 , 山下忠 訳) : 歩行ロボットと人間の足 , 日刊工業新聞 , 1975
- 2) 直動関節を用いた二足歩行ロボット , 水戸部和久 , 矢島克知 , 那須康雄 , 日本ロボット学会誌 , Vol. 18, No.1, (2000),(掲載予定)