

直動関節を用いた歩行ロボットのリアルタイム軌道計画

Real time motion planning method for a prismatic-jointed walking robot.

山形大学大学院 理工学研究科

川合 馨, 水戸部和久, 山野 光裕, 木田 智晃, 安喰 友彦

Kaoru Kawai, Kazuhisa Mitobe, Mitsuhiro Yamano, Tomoaki Kida and Tomohiko Ajiki

Keywords: walking robot, zero moment point, motion planning, real time control.

1. はじめに

歩行ロボットの運動計画において安定で自然な歩行を目的として、ロボットのゼロモーメント点 (ZMP) を考慮する方法が知られている[1][2] ZMP は床圧の中心に相当し、歩行ロボットの研究では、ロボットの動的バランスを考慮して目標となる ZMP 軌道を設定し、それを満足するようにロボット全体の運動を計画することが多い。

しかし、人間型ロボットのように多くの自由度を持つロボットにおいては、運動計画が複雑なものとなるため軌道計画は複雑な問題となる。そこで、運動計画における計算量の多さを克服し、実時間制御を可能とするための効率的な計画方法が開発されつつある。二足歩行ロボットの研究においては、古くから倒立振り子による簡便なモデルを用いて直感的な運動制御を行う研究が多く行なわれている。倒立振り子モデルにおいては、ロボット全体の運動に関して支配的な自由度のみをモデル化することで、地面对ロボットの相対運動を直感的に理解できる利点がある[3][4]。この方法は自由度の大きな人間型ロボットの制御の詳細を与えるものではないが、重心運動や角運動量などのおおまかな運動計画の上で見通しのよい方針を与えるものと考えられる[6][7]。

また、ロボットの構造を工夫することで、倒立振り子モデルに基づく制御の実装を容易化することも可能である[7][8]。本研究ではロボットの構造及びそれを利用しながらの設計指針の単純化により運動計画を大幅に簡略化することで実時間的な機敏な歩行運動の実現を目指す。互いにスライドする平行リンクを組み合わせた構造の直動脚を用いて、モータなどの重量物を胴体位置に集中させることができる。簡便な構造を持つ直動脚を用いて4足ロボットを構成することで、床圧と重心座標の関係が単純化されるためロボットの運動モデルを単純な質点移動としてモデル化することが可能となる。このようなモデルでの軌道計画は比較的容易なため、ZMP を考慮しながら実時間的な運動計画を簡単に行うことが可能となる。

本研究では提案するロボットの運動計画の詳細について述べ、ZMP、床圧及び重心の運動に基づいて、歩行速度、歩幅が簡単に計画できることを示し、歩

行開始、加速、減速及び停止時の運動計画についても実験的に検証する。

Table.1 Specifications of experimental robot.

Weight	4.5 kg
Actuator	20W DC Motor ×8
Sensor	Rotary encoder ×8
Gear ratio	Silde direction 1 : 20 Role direction 1 : 250
Operation range of slide direction	0 mm ~ 300 mm
Operation range of role direction	- 42° ~ + 42°

Fig.1 Dimensions of experimental robot.

2. 直動関節脚を持つ4足歩行ロボットの機構

Fig.1, Table.1に対象とするロボットについて示す。各脚はFig.2に示すような互いにスライドする平行リンクで構成される。

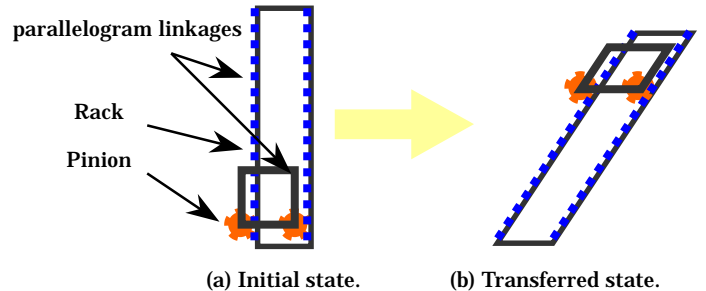


Fig.2 Motion of the leg composed of a pair of parallelogram linkages.

内部の平行リンクの底辺部品にモータが2つ取り付けられており、内部リンクと外部リンクとの間のスライドにより脚が伸縮する。また、内部リンクの角度を変形させることにより外部リンクの変形が生ずる。この自由度は足首関節の自由度に相当するものである。本機構による脚は文献[8]に詳細が示されている。モータ、センサ及び減速機などの比較的重量の大きな部品は内部平行リンクの底辺に取り付けられている。各脚の底辺リンクを連結することで4足ロボットを構成する。この底辺リンク及び連結部分を胴体部と呼ぶことにする。

Fig.1のように各脚を剛体リンクで連結固定した状

態においては、ロボットの運動は進行方向平面内に限定される。本研究では前進および後退する問題のみを対象とする。胴体部のリンクは外部リンクの底辺すなわち足底リンクに対して常に平行に保たれるため、足底全体が床と接触している状態では床面に対して一定の姿勢を保つ。そこで、ロボットの重量の多くを占める胴体部の移動を床に対する平行移動とみなす。更に、対角に位置する2脚の傾き及び直動の変位を同じく保ち、平面内における2足ロボットとしてモデル化する。

Fig.3に足底に取り付けたタッチセンサの位置を示す。対角に位置するセンサが同時に押下されたときに支持脚が接地していることを判別できる。

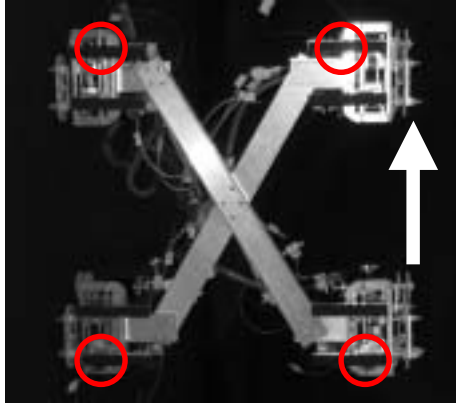


Fig.3 Location of touch sensors

3. 簡便なモデルに基づく重心軌道計画

ロボット重心はFig.4に示す1質点の運動でモデル化する。

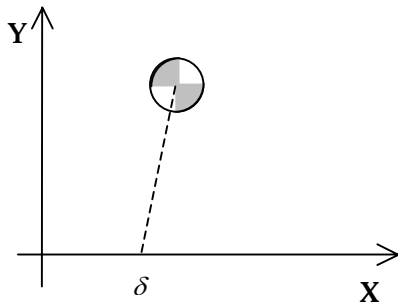


Fig.4 Center of mass and the zero moment point

このような簡便なモデルでは、地面上で重力及び慣性力によるモーメントが釣り合うゼロモーメント点 (ZMP) は次式のとおり簡単に表される。

$$(x - \delta)\ddot{y} - y\ddot{x} + (x - \delta)g = 0 \quad (1)$$

ここで x, y は重心座標のX及びY成分, m, g は質量及び重力加速度の大きさ, δ はZMPの座標のX成分である。重心高さが一定であることを仮定し, $y = h (= const), \dot{y} = \ddot{y} = 0$ を代入すれば(1)は次のように簡単化される。

$$h\ddot{x} - (x - \delta)g = 0 \quad (2)$$

本研究は(2)式により生成される重心軌道の諸性質について、位相平面上の軌道より考察する。 $v = \dot{x}$ とおき, x および v の関係として(2)式を解けば次式となる。

$$v^2 = (x - \delta)^2 \frac{g}{h} + C \quad (3)$$

ただし、ここで C は積分定数であり、ZMP座標 δ および初期条件により決定される。(3)はFig.5のように

$$\frac{v}{x - \delta} = \pm \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (4)$$

を漸近線とする双曲線である。ただし、図は $C < 0$ の場合である。

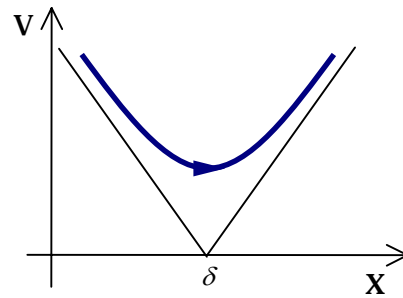


Fig.5 Phase plane trajectory of the center of mass under fixed y and ZMP

支持脚の切り替えが瞬間的に行なわれることを仮定し、この軌道を歩幅の周期で繰り返し用いることにより定期的な歩行軌道が生成される。Fig.6にそれを示す。図の中で $\delta_i (i = 1, 2, \dots)$ は支持脚を切り替えることでジャンプするZMPである。

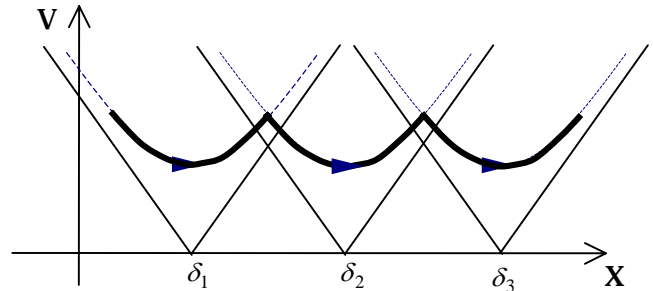


Fig.6 Phase plane trajectory of the center of mass for a steady periodic walk.

このような軌道の性質について以下にまとめる。双曲線及びその漸近線の傾きは重心高さ及び重力加速度に依存し、質量には依存しない。重心高さ h , 歩幅 W および初期条件, 例えば, 脚切り替え時における重心速度を与えれば軌道は一意に決定する。

ここで、設定可能な歩幅の範囲について考える。脚切り替え時における重心位置及び速度を x_0 および v_0 とおく。この点は位相平面上において右側の漸近線よりも上に存在しなければ定常歩行が維持できない。これを遊脚着地点は x_0 より右側になることと併せて $W = 2(\delta - x_0)$ を用いて表すと次式となる。

$$0 < W < 2v_0 \sqrt{\frac{h}{g}} \quad (5)$$

歩幅を大きくするためには、初速度 v_0 を大きくするか重心高さ h を高くしなければならない。

4. 加速及び減速軌道

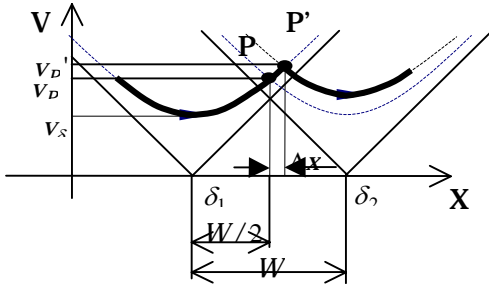


Fig.7 Acceleration of the center of mass by changing the point P

歩行速度の加速及び減速は、軌道曲線(3)式における定数 C を変更することと考えられる。 C を大きくすれば加速、小さくすれば減速する。そのために調整する具体的なパラメータとして以下の二通りが考えられる。

- 支持脚切り替えのタイミングを変更する方法。
- 歩幅を変更する方法。

両方の変更は同時に行うことができる。以下では δ_1 及び δ_2 のみの変更による方法を図示する。ここでは加速軌道の場合を示す。減速の場合も同様に図で示すことができる。この方法は支持脚切り替え時の重心位置を Fig.7 に示す通り進行方向へ変更する。図の P 点から P' 点への変更である。このときの変化量を Δx とすれば、定数 C の変化量は以下の通りとなる。切り替え前の軌道は(3)式および $x = \delta_1$ において $v = v_\delta$ より次式で表される。

$$v^2 = (x - \delta_1)^2 \frac{g}{h} + v_\delta^2 \quad (6)$$

一方切り替え後の軌道を次式で表す。

$$v^2 = (x - \delta_2)^2 \frac{g}{h} + C' \quad (7)$$

歩幅を W とおき、P' 点における状態を(6)式及び(7)式に代入すれば、 $x - \delta_1 = W/2$ 及び $x - \delta_2 = W/2 - \Delta x$ より、次式が得られる。

$$C' = v_\delta^2 + 2W \cdot \Delta x \frac{g}{h} \quad (8)$$

したがって、定数 C の変化量は $2W \cdot \Delta x \frac{g}{h}$ となり、加速していることが分かる。

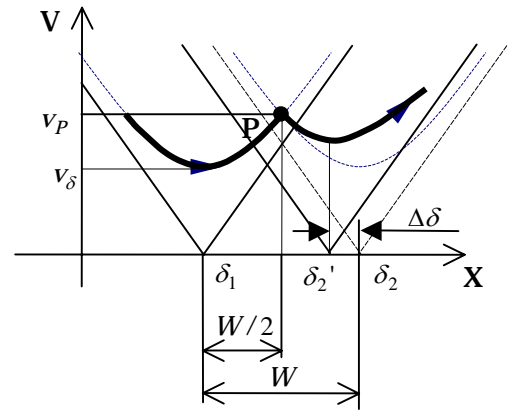


Fig.8 Acceleration of the center of mass by the stride change

の考え方に基づく加速軌道を Fig.8 に示す。支持脚切り替え後における ZMP の位置を、定常歩行における δ_2 から $\Delta \delta$ 手前へ変更する。ZMP は支持脚足の中央に選んでいるので歩幅が小さくなることに相当する。支持脚切り替え前後の軌道を前述と同様に(6)及び(7)式で表し、P 点における状態をそれぞれに代入し整理すれば次式が得られる。

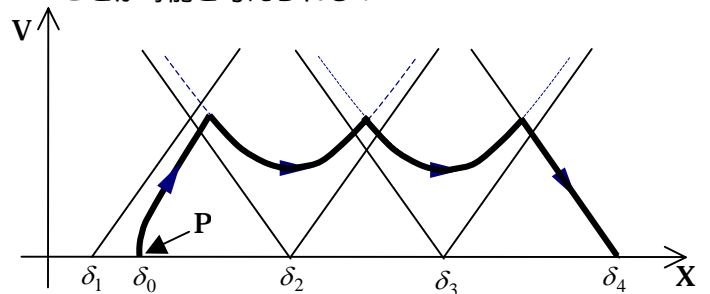
$$C' = v_\delta^2 + (W - \Delta \delta) \Delta \delta \frac{g}{h} \quad (9)$$

歩幅と ZMP の関係より $W - \Delta \delta$ は正の値をとる。定数 C の増分は $(W - \Delta \delta) \Delta \delta g / h$ となる。

5. 始動及び停止のための軌道

静止状態から歩行の始動時には(3)式において定数 C が負の値の曲線を用いる必要がある。また、歩行停止を行うためには、(3)式の C が負またはゼロの曲線を用いる。この様子を Fig.9 に示す。静止時には ZMP は重心の鉛直下にあり $x = \delta_0$ である。重心が動き出すために加速度が必要なので、ZMP を後方の δ_1 へスイッチしなければならない。定数 C の大きさは ZMP の移動量 $\Delta \delta = \delta_0 - \delta_1$ により決定し、 $C = -\Delta \delta^2 g / h$ となる。漸近線そのものは X 軸上の静止時において加速度 0 の平衡状態となるため、始動のための軌道として用いることはできない。ZMP の移動量は支持脚足底の範囲から出ないように設定する必要がある。

停止するための軌道においては、(3)式において $C = 0$ とすることができる。このとき、ZMP の一は Fig.9 において δ_4 の位置にあり、漸近線に沿って停止する軌道となる。ZMP は停止後も δ_4 のままなので、重心加速度に不連続な変化が無く、滑らかに静止することが可能と考えられる。



5. 実時間性を考慮した軌道計画 for top walking

歩行中の外乱として、遊脚着地時の衝撃による重心の追従誤差及び遊脚着地点の目標との間の誤差の影響は比較的大きなものである。また、モデルの単純化によって軌道計画は簡単化できるものの、モデル化誤差の影響も大きい。こういった外乱の影響にはロボットの状態によって実時間的に運動計画を修正することで対応することが可能であると考えられる。外乱などによる状況変化及びプログラムレベルでの実装の容易さの観点から考察する。

軌道の修正は外乱の影響を受けやすい支持脚切り替え点と、重心速度が最低となるため脚の慣性などの外乱の影響が小さいため正確な情報が得られると考えられる重心がZMP上を通過する点の2点で行う。

6. 実験

検討した方法の実ロボットへ応用性を実験結果により検討する。Fig1に示したロボットに始動軌道 - 定常歩行軌道 - 加速軌道歩行 - 停止軌道の一連の軌道を与え実験を行った。Fig10及びFig.11には重心位置の時間変化及び位相平面状の軌道を示す。これらの結果は関節のロータリーエンコーダよりのデータに基づいて計算したものである。絶対的なロボット重心位置との間には多少の誤差がある。

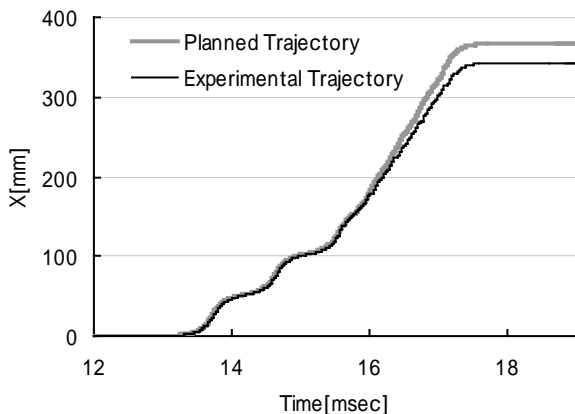


Fig.10 Position of the center of mass during walking

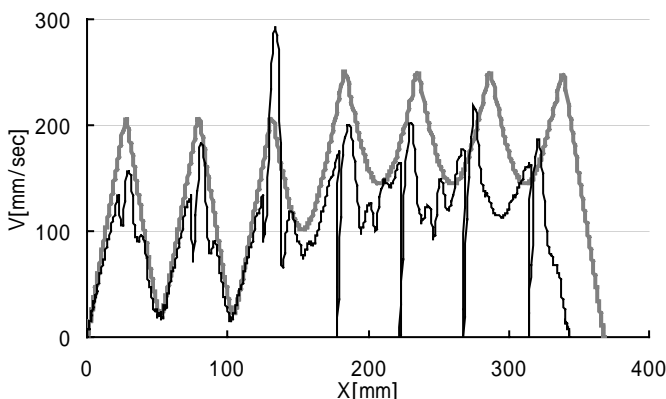


Fig.11 Experimental phase plane trajectory

Fig.10に示したように、重心位置の応答では計画された移動が良好に実現されている。歩行の進行につれて計画軌道と実際とのずれが拡大しているのはFig.11で示したように、歩行の後半で速度の追従誤差

が大きくなっているためであると考えられる。また、制御の実行が各関節のサーボ系により行われており、一步目の支持脚地点を基準として歩行全体にわたる絶対位置を制御に考慮していないためである。遊脚着地点のばらつきが蓄積され歩数が増えると初期の目標軌道との間の誤差は蓄積される。

位相平面上での軌道では、始めの定常歩行までは良好な追従をしており、目的の歩行が達成されているものと判断できる。移動速度が最大となる地点で速度が振動的となっているのは、これらの点がちょうど支持脚切り替えの点であり、遊脚着地による衝撃の影響と考えられる。加速軌道に移行後はこの影響が更に顕著に現れている。これは遊脚を運ぶ速度が上がり、急激な加速が要されるようになったためにモデルにおいて無視した脚質量の影響が大きく現れたと考えられる。

以上のことから、本方法による歩行制御はロボットのモデル化誤差が顕著に表れない速度範囲であれば、有効に運用できるものと判断される。

7. おわりに

脚機構の工夫によりモデル化を簡単化した歩行ロボットにおいて、重心地位及び速度を位相平面内の軌道連結により簡便に行う方法を示した。ZMPを支持脚の足中心に固定し、定常歩行、加速、減速の起動設計方法を示した。加速及び減速は軌道を与える式における定数の変更により行われ、変更した軌道への遷移においては、支持脚切り替え時の重心位置の調整により行うことができる。

このような軌道計画は容易に軌道計画の修正が可能であり、実時間性及び計画の容易さの面からも有効であると考えられる。本方法は基本的には、ZMPを規範とする通常の歩行運動計画と同等であるが、モデルが簡単化されたため、重心移動の加減速や歩幅計画の考え方が理解しやすくなっている。

軌道への追従性能が十分に得られればZMPは支持脚の足の中心に固定されるため、動的バランスが容易に保たれることが期待される。単純なモデルにより重心移動の性質が分かりやすい反面、モデルが単純すぎるためモデル化誤差の影響が大きいものと考えられ、実用上はこれに対する定量的な評価が必要である。

参考文献

- [1] 生物型システムのダイナミクスと制御，日本機械学会編，養賢堂，2002
- [2] M. Vukobratovich ,B. Borovac ,D. Surla and D. Stokic : Biped Locomotion, Dynamic, Stability, Control and Application. Springer-Verlag, 1990.
- [3] 古莊純次，山田誠，：“角運動量を考慮した2足歩行ロボットの動的制御”，計測自動制御学会論文集，Vol. 22, No. 4, pp.451-458,1986
- [4] H.Miura and I. Shimoyama: "Dynamic Walk of Biped" Int. J. of Robotics Research, 3-2, 60-74, 1984
- [5] 梶田，小林：“位置エネルギー保存形軌道を規範とする動的2足歩行の制御”，計測自動制御学会論文集，vol.23, no.3, pp.281-287, 1989.
- [6] 梶田，谷：“凹凸路面における動的2足歩行の制御について 線形倒立振子モードの導出とその

応用 ”, 計測自動制御学会論文集, vol.27, no.2, pp.177-184, 1991.

- [7] 梶田, 谷: “線形倒立振子を規範とする凹凸路面上の動的 2 足歩行制御”, 計測自動制御学会論文集, vol.31, no.10, pp.1705-1714, 1995.
- [8] 水戸部和久, 矢島克知, 仲野隆司, 長沢洋司, 那須康雄 “直動関節を用いた 2 足歩行ロボット”, 日本ロボット学会誌 Vol. 18 No. 1, pp.120~125, 2000
- [9] 広瀬, 米田, 飯山: “4 足歩行機械の間歇トロット歩容 前方向歩行の動的制御”, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.6, pp.881-886, 1996.
- [10] 広瀬, 米田: “4 足歩行機械の動歩行時の姿勢安定化制御”, 日本ロボット学会誌, vol.19, no.3, pp.380-386, 2001 .
- [11] 木村, 下山, 三浦: “四足動歩行ロボットの力学的解析”, 日本ロボット学会誌, vol.6, no.5, pp.367-378, 1988 .
- [12] 広瀬, 米田: “4 足歩行機械の静動融合歩容とその連続軌道生成”, 日本ロボット学会誌, vol.9, no.3, pp.267-275, 1991 .