「ながら-3」の歩行パターン生成に関する検討

久冨 茂樹 光井 輝彰 稲葉 昭夫

Walking Pattern Generation for Humanoid Robot 'NAGARA-3'

Shigeki KUDOMI Teruaki MITSUI Akio INABA

あらまし 福祉や介護といった民生分野で作業をするロボットは,これまでの産業用ロボットとは違い,人間 と同じ空間で作業をしなくてはならない.人の生活環境を改造することなくそのままの状態で自由に動き回るた めには,ロボットの移動形態として二足歩行が適していると考えられる.安定した二足歩行の実現には歩行パタ ーンの生成方法が重要な要素である.本年度は,「ながら-3」の歩行パターンに三次元線形倒立振子モードを 採用し,さらに,歩行の最初と最後の運動について見直しを行った.シミュレーションと実機での歩行実験によ って,より安定した歩行が実現できることを確認した.

キーワード ヒューマノイドロボット,2足歩行,線形倒立振子

1.はじめに

福祉や介護といった民生分野で作業をするロボットは, これまでの産業用ロボットとは違い,人間と同じ空間で 作業をしなくてはならない.人の生活環境を改造するこ となくそのままの状態で自由に動き回るためには,ロボ ットの移動形態として二足歩行が適していると考えられ る.安定した二足歩行の実現には歩行パターンの生成が 非常に重要である.

二足歩行ロボットの歩行パターン生成に関しては、これまでいろいろな手法が提案されている^{[1]-[5]}.これらの 多くはオフラインであらかじめ各関節の軌道を計算する 手法である.しかし、ロボットが環境に適応して歩行し たり、人の行動に対して歩行を伴ったリアクションを返 したりするためには、実時間で歩行パターンを生成する 必要がある.このような理由から、本研究では、制御則 が単純で歩行パターンの実時間生成が可能な線形倒立振 子モード^[3]を規範とした手法を採用している^[6].

これまでは、問題を簡単化するため、ロボットの運動 を側面および正面から見た2次元平面(Sagittal Plane, Lateral Plane:図1)に投影した運動に分解し、Sagittal Planeの運動は倒立線形振子モード、Lateral Planeの運 動は倒立振子の運動にそれぞれ基づいて歩行パターンを 生成してきた.しかし、実際のロボットの歩行ではLateral Planeにおいてバランスを崩すことが多く見受けられ、 パラメータのチューニングに多くの時間が必要であった. そこで、本年度は、Lateral Planeの運動にも線形倒立振 子モードを取り入れた三次元線形倒立振子モード^[7]を 「ながら-3」の歩行パターンに導入した.また、歩行 の最初と最後の運動について見直しを行い、より安定な 歩行パターンの生成について報告する.

2.三次元線形倒立振子モードの導入

これまでの「ながら」の歩行パターンは,ロボットの 運動を側面および正面から見た2次元平面(Sagittal Plane, Lateral Plane)に投影した運動に分解し,それぞ れの平面で定義した運動を基に生成してきた^[6].Sagittal Planeの運動に関しては,線形倒立振子モードを規範とす ることで,ZMPが支持脚足首位置となる歩行パターンを 生成していた.一方,Lateral Planeの運動に関しては両足 の中間を支点とする倒立振子の運動に基づいていたため, ZMPが支持脚足裏内に納まることを保証しているわけ ではなかった.そのため,Lateral Planeにおいて歩行中に バランスを崩すことが多く見受けられ,試行錯誤で決定 するパラメータ調整に多くの時間を要していた.

そこで,本研究では梶田が提案している三次元線形倒 立振子モード(3D-LIPM)^[7]を導入することでパラメー 夕調整に頼ることのない歩行パターン生成を試みる. 3D-LIPMでは,重心を唯一の質点としたモデルに対し, Sagittal Plane, Lateral Planeの運動は,それぞれ式(1),式



(2)で表すことができる.

$$\ddot{x} = \frac{g}{z_c} x \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (1)$$
$$\ddot{y} = \frac{g}{z_c} y \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (2)$$

ただし, z_c: 重心高さ, g: 重力加速度で, 歩行中の腰の 高さは一定である.

式(1)の解析解は次のようになる.

$$x = X_0 \cosh\left(\frac{t}{T_c}\right) + T_c V_{0x} \sinh\left(\frac{t}{T_c}\right) \cdot \cdot \cdot \cdot (3)$$

ここで, $T_c \equiv \sqrt{z_c/g}$ であり, X_0 , V_{0x} は,前後のパターンの歩幅と時間によって決定される初期位置,初期速度である.

また,同様に式(2)の解析解は次のようになる.

$$y = Y_0 \cosh\left(\frac{t}{T_c}\right) + T_c V_{0y} \sinh\left(\frac{t}{T_c}\right) \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4)$$

図2のような座標系を考えると,右足支持の場合,

$$\begin{cases} Y_0 = s \\ V_{0y} = -V_{\max} \end{cases}$$
 (5)

左足支持の場合,

$$\begin{cases} Y_0 = -s \\ V_{0y} = V_{\max} \end{cases}$$
 (6)

ただし,

$$V_{\max} = \frac{s}{T_c} \cdot \frac{\cosh\left(\frac{T_s}{T_c}\right) - 1}{\sinh\left(\frac{T_s}{T_c}\right)} \cdot \cdots \cdot (7)$$

$$\alpha = \cosh\left(\frac{T_s}{2T_c}\right) - \frac{T_c V_{\max}}{s} \sinh\left(\frac{T_s}{2T_c}\right) \cdot \cdot \cdot (8)$$

s:両足の間隔の1/2である.

式(3),式(4)と,次の拘束条件から,逆運動学を解いて, 各関節の角度を求める.

- < 拘束条件 >
 - 常に上体の姿勢が一定になるようにする。
 - ・ 足裏が常に地面と平行になるようにする.

3.最初と最後の歩行パターン

両足支持の静止状態から最初の一歩の運動をすると きには,重心を支持脚に移動させてから遊脚の運動を開 始しないとバランスを崩してしまうことがこれまでの研 究からわかっている.「ながら-3」の歩行パターンにお



図2 Lateral Plane での運動

いても,最初の一歩について,腰の運動の遅れと遊脚の 運動の遅れをそれぞれ独立に設定できるようにする.

また,Lateral Planeでの線形倒立振子モードでは,重心 が体の中心線を通るとき速度最大となり,最大振幅のと き速度が0になる.したがって,重心が体の中心線の位 置(中立位置)で,両足を着床させ停止しようとすると, 大きな加速度を発生させることになり,停止が不安定に なる.そこで,歩行の停止時は,Lateral Planeでの腰振幅 が最大の位置で両足を着床させ,ZMPの許容範囲が広い 両足支持の状態で中立位置まで運動する歩行パターンと する.この運動は,停止時の速度および加速度がゼロと なる境界条件を満たす4次関数で与える.

4.シミュレーション

まず、「ながら-3」の形状データ、質量データから、 三次元CAD(Solid Works)を用いて、モデルの作成を行った.このモデルを用いて、機構解析ソフトウェア (COSMOS MOTION)により、歩行シミュレーションを 行った.足裏と地面との間に接触条件を定義し、各関節 に強制変位を与えることで歩行を行った.

まず,2章で述べたように三次元線形倒立振子モード



図3 Sagittal PlaneでのZMP(シミュレーション)



図4 Lateral PlaneでのZMP(シミュレーション)



図5 改良前の歩行パターンでの重心位置



図6 改良後の歩行パターンでの重心位置

を用いて歩行パターンを作成した.5歩の歩行シミュレ ーションを行ったときのSagittal PlaneでのZMPを図3に, Lateral PlaneでのZMPを図4にそれぞれ示す.ZMPは足裏 (長さ:0.15[m],幅:0.10[mm])内にほぼおさまってお り,転倒することなく歩行することができた.三次元線 形倒立振子モードを用いることで,パラメータを調整す ることなく,安定した歩行パターンの作成が可能になっ た.

次に3章で述べた最初と最後の歩行パターンを用い てシミュレーションを行った.7歩目で停止した後,そ のままの関節角度を4秒間保持して,ゆれの状態を確認し た.図5に改良前の歩行パターンでの重心位置(lateral Plane)を示す.また,図6に改良後の歩行パターンでの 重心位置を示す.ただし,中立位置を原点としている. 改良後のパターンでは,停止後のゆれが小さく,より安 定に停止することができた.

5.実機での歩行実験

実験では3章で述べた歩行パターンを用いてロボット を前進させ,その際に6軸力センサ(ビーエルCentimセ ンサ)で計測した左右の足首の力情報を基にZMPの計算 を行った^[9].図7に歩行実験の様子を示す.なお,実験 では電源は外部電源を使用(ロボット全重量約20kg)し, 歩行コマンドの入力は外部のPCから行った.歩行条件は 以下の通りである.

- ・歩幅:0.15[m]
- ・遊脚足上げ高さ:0.03[m]
- ・左右足間隔 (2S): 0.125[m]
- ・一歩の時間(最初と最後以外の一歩):1[s]
- ・歩数:7[歩]

実験結果として,歩行パターンにおける支持脚中心の 軌跡(理想値)と実測したZMPの軌跡について,スター ト時の支持脚中心を基準としたSagittal Planeにおける位 置(x)を図8に,両足の中心を基準としたLateral Plane における位置(y)を図9にそれぞれ示す.歩行の一歩目を 見ると,前半の両足支持期に両足の中心にあったZMPが, 支持脚の左足下にスムーズに移行していることが確認で きる.一方,最終歩の歩行を見ると支持脚の左足下にあ ったZMPが,遊脚の右足が着床して両足支持期に移行し た際にSagittal Plane, Lateral Plane共に揺れており,シミ ュレーションほどの効果は確認できなかった.それ以外 の2歩目以降最終歩までは,ZMPは支持脚の足裏内にほ ぼおさまっており,その軌跡からおおむねパターン通り に支持脚が切り替わり安定して歩行が行われたことが推 測される.ただし,計測結果を詳しく見ると左足の着床 が若干早く 特に4歩目の着床後の支持脚の切り替えにお いて乱れを確認することができる.この乱れは本実験の 範囲内ではロボットがバランスを失うほどのレベルでは なかったが,ロボットの動作条件によっては転倒につな がる危険性がある.こういった乱れを補正し歩行を安定 化することは今後の課題である.



図7 歩行実験の様子(7歩前進)



図8 Sagittal PlaneでのZMP(実機)



図9 Lateral PlaneでのZMP(実機)

6.まとめ

「ながら-3」の歩行パターン生成に三次元線形倒立 振子モードを採用した.さらに,歩行の最初と最後の運 動について見直しを行った.シミュレーションと実機で の歩行実験によって,より安定した歩行が実現できるこ とを確認した.

謝 辞

本研究を遂行するにあたり,多くの有益な助言をいた だいた川崎重工株式会社 久司一博氏に深く感謝する.

文 献

- [1] 山口仁一,高西淳夫,加藤一郎"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", 本ロボット学会誌, Vol.11, No.4, pp.581-586, 1993
- [2] 西脇光一,北川知伸,杉原知道,加賀美聡,稲葉雅 幸,井上博允,"ZMP導出の線形・非干渉化,離散 化によるヒューマノイドの動力学安定軌道の高速生 成",第18回ロボット学会学術講演会予稿集, pp.721-722,2000
- [3] 梶田秀司 "線形倒立振子モードを規範とする動的2 足歩行ロボットの実時間制御",機械技術研究所報告, 第171号
- [4] 遠藤謙,山崎文敬,北野宏明,前野隆司,"進化的計

算法を用いた2足歩行ロボットの形態と歩行パターンの生成",第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.519-520,2001

- [5] Jiang Shan, Fumio Nagashima, "Biologically Inspired Spinal locomotion Controller for Humanoid Robot", 第 19回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.517-518,2001
- [6] 稲葉昭夫,光井輝彰,西村太志,千原健司,田中等 幸"ヒューマノイドロボット基本ハードウェアの開 発"岐阜県生産情報技術研究所報告No3,pp.1-8,2002
- [7] Shuuji Kajita, Osamu Matsumoto, Muneharu Saigo "Real-time 3D walking pattern generation for a biped robot with telescopic legs ", Proc. of the 2001 IEEE International Conf. on Robotics & Automation, pp2299-2306, 2001
- [8] 千原健司,稲葉昭夫,光井輝彰,小川行宏"ヒューマノイドロボット「ながら」の歩行技術に関する改良",岐阜県生産情報技術研究所報告No4,pp.7-10,2003
- [9] 李清華,高西淳夫,加藤一郎"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",日本 ロボット学会誌,Vol.10,No.6,pp.828-833,1992