

非線形振動子に基づくヒューマノイド DARwIn-OP の 実時間歩行パターン生成と安定化

○河 寅勇, 田村 雄介, 浅間 一 (東京大学), 李 玘鎬 (Robotis)

Real-time Gait Pattern Generation and Stabilization

for Humanoid DARwIn-OP Based on Non-linear Oscillators

○Inyong HA, Yusuke TAMURA, Hajime ASAMA(The University of Tokyo) and Jungho Lee(Robotis)

Abstract: To achieve the balanced walking of humanoid, it is necessary to estimate dynamic stability of the system. However, in a small size humanoid which has restricted system resources, it is hard to satisfy the performance level desired by dynamic analysis such as on-line ZMP estimation. Therefore, in this paper, we proposed the feasible method of gait pattern generation and stabilization based on non-linear oscillators and sensory feedback which does not require high system performance. The suggested method was tested on the open humanoid platform DARwIn-OP for evaluation, and the result showed that the gait pattern can be generated in 0.008sec with retaining of walking balance.

1. 序論

二足歩行ロボットの円滑な歩行を実現するためには多様な移動性を持つ歩行パターンを生成してその動的な安定性を確保しなければならない。これまで、生成された歩行パターンの安定性を検証する方法としてZMP(Zero Moment Point)制御理論[1]が幅広く用いられてきた。また、近年パターンを生成した後安定性を検証するのではなく、ZMP軌跡をあらかじめ考慮して歩行パターンを生成する方法が提案されている[2]。一般的に高い自由度を持つ二足歩行ロボットにおいて、動力学モデルに基づいて実時間でZMPを算出してこれを満たす歩行パターンを生成することは高いシステム性能を要求するため、倒立振子モデルや三質量モデルのような単純化された動力学モデルを導入しこの問題を取り扱ってきた[3]。しかし単純化された程度によってはモデリング誤差が発生して歩行安定性を損なってしまうし、安定性を確保できる位にモデルを詳細化する場合には再び相当な水準のシステム処理能力が必要となってしまう[4]。一方、歩行パターンを生成した後オフラインで安定性を検証する方法は、システム性能の制約が比較的小さいが多様な移動性を持つ歩行パターンに対してその都度安定性検証を経ることは、非効率的なだけでなく存在するモデリング誤差やモデリングが容易ではない地面の摩擦、地形、アクチュエータの偏差などに対応しにくいという問題がある。

したがって本稿では、多様な歩行移動性と均衡調節性を持つ非線形振動子に基づいた歩行パターン生成器を設計してシミュレーションでZMP安定性を一次的に



Fig. 1. Open humanoid platform DARwIn-OP

検証する。そしてセンサーフィードバックによって非線形振動子の均衡調節成分を制御する方法で処理能力に制限があるシステムでも多様な移動性と動的な安定性の達成が可能な歩行パターン生成及び安定化アルゴリズムを提案する。提案する方法は Fig.1 の ROBOTIS 製オープンヒューマノイドプラットフォーム DARwIn-OP に実装してその性能を検証した。

2. 非線形振動子を用いた歩行パターン生成

本章では Fig.2 のようにロボットの立脚期での中心の軌跡と遊脚期での該当遊脚の足裏の軌跡を非線形振動子グループで実現してこれを統合することで歩行移動成分と均衡調節成分が分離された歩行パターン生成器を設計した。両振動子グループは三次元空間上の位置と姿勢に対応する 6 個の個別振動子で構成されており、左右を合わせて 12 個の振動子が存在する。システム内の計 24 個の結合された非線形振動子によって歩行

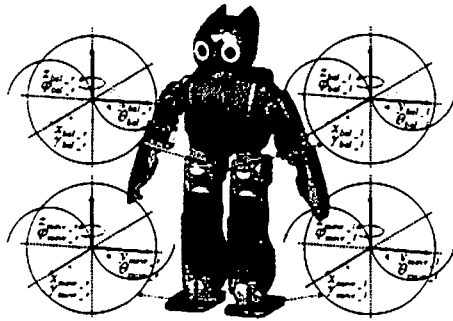


Fig. 2. Non-linear oscillator model

パターンが生成される。式(1)のように個別振動子には振幅、周期、位相差、オフセットが存在しこれは歩行の幅、方向、周期、均衡調節量に対応する。

$$Osc = A \sin(\omega t + \alpha) + B \quad (1)$$

式(2)に歩行移動成分グループの振動子と均衡調節成分グループの振動子の結合を示す。重心の軌跡に該当する均衡調節成分グループ振動子は座標系一致のために位相を反転して、移動成分グループ振動子と結合される。全体歩行周期を T 、立脚期の比率を r にして x 軸の軌跡を計算する

$$Osc_{total} = A_{move} \sin(\omega_{move} t + \alpha_{move}) + B_{move} + A_{bal} \sin(\omega_{bal}(t - \pi) + \alpha_{bal}) + B_{bal} \quad (2)$$

$$A_{move} = x_{move_l} / 2$$

$$\omega_{move} = 2\pi / \{T(1-r)\}$$

$$\alpha_{move} = -Tr / 4$$

$$A_{bal} = -x_{bal_l} / 2$$

$$\omega_{bal} = 2\pi / T$$

$$B_{move} = \alpha_{bal} = B_{bal} = 0$$

生成されたパターンによる足裏と重心の軌跡を Fig.3 に示す。最終的に得られた軌跡情報を用いて解析的方法で逆運動学を解いて各関節角度を導出し、これ



Fig. 3. Foot and center of mass trajectory

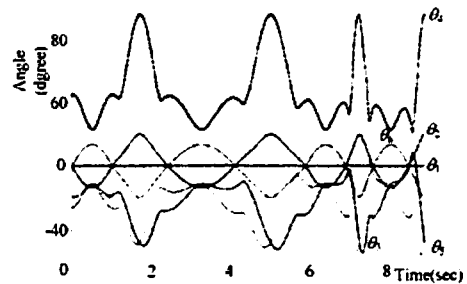


Fig. 4. Target position of joint angle

をアクチュエータの目標指令値として出力する。Fig.4 に出力する目標指令値と示す。

3. ZMP による歩行安定性検証

生成された歩行パターンの安定性を検証するために多物体 ZMP 計算方法を利用する。式(3)を適用して DARwIn-OP の運動学情報及び動力学情報を用いて ZMP 軌跡が支持多角系中に存在するように歩行の均衡調節成分に対応する非線形振動子のパラメータを設定する。

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (z-g)x_i - \sum_{i=1}^n m_i xz_i}{\sum_{i=1}^n m_i (z-g)} \quad (3)$$

$$y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (z-g)y_i - \sum_{i=1}^n m_i yz_i}{\sum_{i=1}^n m_i (z-g)}$$

現段階での歩行の移動成分振動子のパラメータは足踏みである基準歩行パターンに対応するように固定し、全体振動子の周期は歩行のエネルギー効率性を確保するために DARwIn-OP の固有振動数と一致するように設定した。Fig.5 に算出された ZMP と重心の地面に対する投影点を示す。

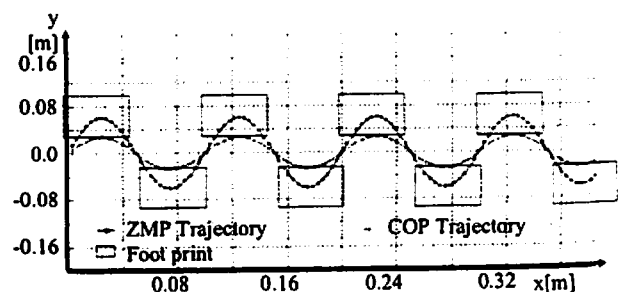


Fig. 5. ZMP and center of pressure trajectory

4. センサーフィードバックによる歩行安定化

まずZMP軌跡の検証を通じて安定性確保が可能な歩行パターンを生成した。しかしこれはモデリング誤差や、地面摩擦、地形、アクチュエータ偏差などのモデリング不可能な要素が考慮されていないため、実際にDARwIn-OPに適用した際に、設計されたZMP軌跡を追従することが困難であるという問題点がある。それだけでなく、安定性検証の範囲も基準歩行パターンに限定されているため、歩行の移動成分でも周期が変わった場合、円滑な歩行を実現するのが困難である。

本章では人間の平衡感覚器官に対応する角速度センサのデータと関節角センサから導出されたロボットの姿勢データを利用してフィードバック制御器を構成することで問題点を解決する手法を提案する。

Fig.6に設計された制御システムを示す。角速度センサのデータをバンドパスフィルタと積分器を通過させてロボットの姿勢の角度を抽出する。その上、関節角度値から運動学方程式を解いて地面と水平方向の重心変位を求める。この導出された二つのフィードバックデータは設計された歩行パターンと比較されてPDコントローラに入力され、対応する歩行均衡調節成分グループ振動子のパラメータを調整する。式(4)にPDコントローラを示す。

$$Osc_{rotate} = A_{rotate} \sin(w_{rotate}(t - \pi) + \alpha_{rotate}) + B_{rotate} \quad (4)$$

$$A_{rotate} = K_{rotate_p} \left(-\int_0^t S_{gyro} dt \right) + K_{rotate_d} (-S_{gyro})$$

$$Osc_{shift} = A_{shift} \sin(w_{shift}(t - \pi) + \alpha_{shift}) + B_{shift}$$

$$A_{shift} = K_{shift_p} f_{fk} (S_{j\dot{int}}) + K_{rotate_d} \dot{f}_{fk} (S_{joint})$$

S_{gyro} は角速度センサ値、 S_{joint} は関節角度値、関数 f_{fk} は運動学方程式を意味する。 Osc_{rotate} はロボットの姿勢角度、 Osc_{shift} はロボットの重心変位に対応する振動子で均衡調節振動子グループに属する。 K_{rotate_p} 、 K_{shift_p} と K_{rotate_d} 、 K_{shift_d} はPDコントローラの利得を意味する。

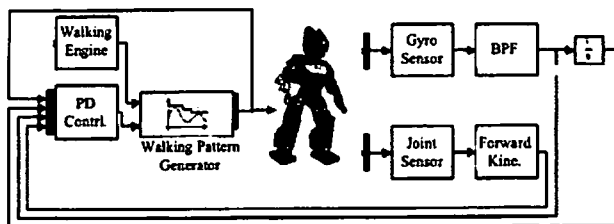


Fig.6. Walking stabilizer with sensory feedback

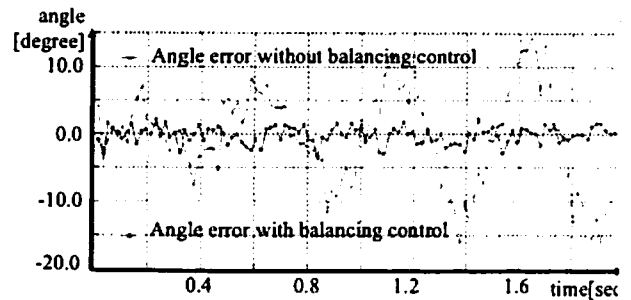


Fig. 7. Sensed angle and displacement error

5. 実験及び考察

提案した非線形振動子に基づいた歩行生成器とセンサフィードバックによる歩行安定器を、オープンヒューマノイドプラットフォームである DARwIn-OP に搭載して実験を行った。Ubuntu Linux 上でC++を利用してアルゴリズムを実装した。また、open-DARwIn SDK でアクチュエータ及びセンサ等のデバイスにアクセスした。詳細な DARwIn-OP のシステム仕様を Table 1 に示す。歩行制御周期をデバイス通信速度と歩行生成器及び安定器の実行速度を考慮して 128Hz に設定した。またアクチュエータは内部的に 1kHz で駆動された。

まず生成された基準歩行パターンで歩行実験を試み

Table.1. DARwIn-OP general specification

Category	Description	Data
Dimension	Height	0.455m
	Weight	2.8Kg
DOF	Head	2 DOF
	Arm	2 x 3 DOF
	Leg	2 x 6 DOF
Main Controller	CPU	Intel Atom Z530 @1.6GHz
	RAM	1GB DDR2
	Disk	4GB Flash Disk
	Network	Ethernet/WiFi
Sub Controller	USB Port	2 x USB2.0
	CPU	ARM 32-bit Cortex-M3
	Frequency	72MHz
Actuator RX-28M	Flash Memory	512KB
	SRAM	64KB
	Holding Torque	24kgf.cm @ 12V
Sensor	Speed	45RPM @ No Load
	Position Sensor	Magnetic Potentiometer
	Resolution	0.072°
	Command interface	Serial 4.5MBPS
Software	Gyroscope	3-Axis
	Accelerometer	3-Axis
	Pressure-meter	2 x 4 FSR in Foot
	Camera	2MP HD USB
Software	O/S	Linux Ubuntu
	Framework	open-DARwIn SDK
	Language	C++ / Java
Compiler	GCC	

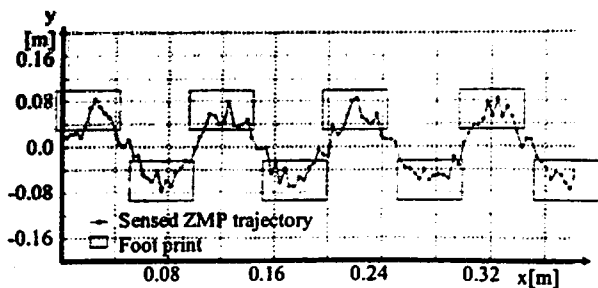


Fig. 8. Sensed ZMP trajectory with default gait pattern

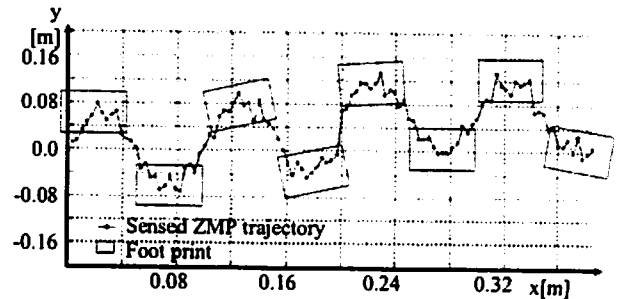


Fig. 9. Sensed ZMP trajectory with transient gait pattern

た。安定器の動作有無によって歩行安定性が確保されるのを確認するために、角速度センサから抽出したロボット姿勢の角度位誤差を比べた。この結果を Fig.7 に示す。

また、歩行時にセンシングされた関節角データをもとに、オフラインで ZMP 軌跡を検証した結果を Fig.8 に示す。また上記実験をロボットの歩行方向を任意に変化させながら行った。これに対するオフライン ZMP 軌跡検証結果を Fig.9 に示す。実験結果から類推できるように、歩行安定器が動作するとロボットの姿勢角度及び水平変位誤差が減少し、ZMP 軌跡も安定的な領域に収束し歩行安定性が確保されることを確認した。Fig.10 に DARwIn-OP の歩行の様子を毎秒 60 フレームで撮影したものを示す。

6. 結論

本稿では多様な歩行移動性と均衡調節性を持つ非線形振動子歩行パターン生成器とセンサフィードバックによって、非線形振動子の均衡調節成分を制御する歩行安定器の設計方法を提案した。提案した方法をオープンヒューマノイドプラットフォームである DARwIn-OP に実装してその性能を検証した結果、リアルタイムに生成される多様な歩行パターンに対して安定的な歩行が達成できることを確認した。提案した方法は高いシステム性能を要求しないという特徴があるた

め、システム資源を上位レベルのタスクに優先的に割り当てることができるようになり、ヒューマノイドの活用度を高めるのに寄与できると考えられる。

参考文献

- [1] M. Vukobratović and J. Stepanenko, "On the Stability of Anthropomorphic Systems". *Mathematical Biosciences*, Vol.15, Oct., p.1-37, 1972.
- [2] K. Nagasaka, Y. Kuroki, S. Suzuki, Y. Itoh, and J. Yamaguchi, "Integrated Motion Control for Walking, Jumping and Running on a Small Bipedal Entertainment Robot". In *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, New Orleans, 2004, pp. 3189-3194.
- [3] T. Takenaka, T. Matsumoto, T. Yoshiike, "Real Time Motion Generation and Control for Biped Robot -1st Report: Walking Gait Pattern Generation". In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009.
- [4] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi, and H. Hirukawa, "Resolved Momentum Control: Humanoid Motion Planning based on the Linear and Angular Momentum". In *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Oct. 2003, pp. 1644-1650.
- [5] T. Sugihara and Y. Nakamura, "A Fast Online Gait Planning with Boundary Condition Relaxation for Humanoid Robots". In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Apr., 2005, pp. 306-311.

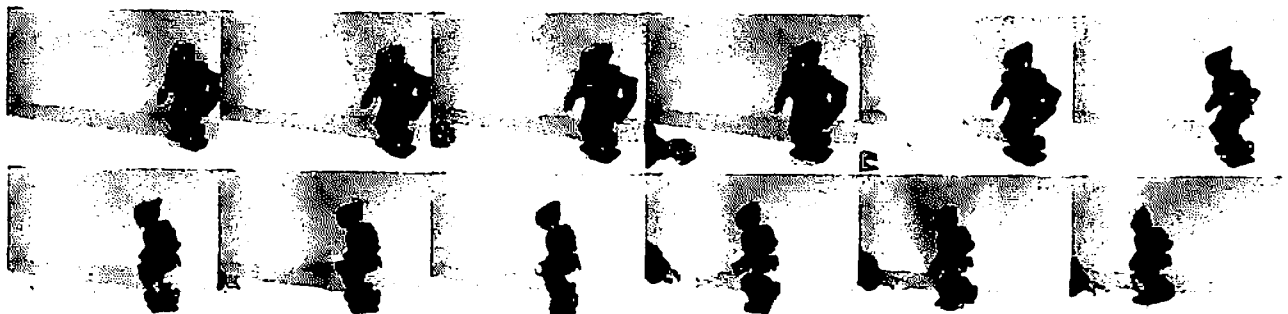


Fig. 9. Real-time gait pattern generation and stabilization features of DARwIn-OP

23nd SICE Symposium on Decentralized Autonomous Systems
January 29-30, 2011, Hokkaido

第 23 回自律分散システム・シンポジウム

資 料

期 日：2011年 1月29日(土), 30日(日)

会 場：北海道大学中央キャンパス総合研究棟 1号館

SICE[®]

企 画：自 律 分 散 シ ス テ ム 部 会

主 催：公益社団法人 計測自動制御学会 システム・情報部門

The Society of Instrument and Control Engineers

協 賛：システム制御情報学会、電子情報通信学会、電気学会、情報処理学会、
人工知能学会、日本ロボット学会、日本機械学会、精密工学会、
日本神経回路学会、日本生体医工学会、応用物理学会、
日本生物物理学会、化学工学会、Japan Chapter of IEEE Control Systems
Society、Japan Chapter of IEEE Systems, Man, and Cybernetics、
日本比較生理生化学会、ニューロエソロジー談話会

カタログ番号 11 SY 0002