

非干渉化制御を用いた上半身を有する 3次元2足歩行ロボットのリミットサイクル歩行

武蔵工業大学 宮原 謙太郎, 原田 譲, 金宮 好和, 佐藤 大祐

Decoupled Control for Limit Cycle Walking of a 3D Biped Robot with an Upper Body

Kentaro MIYAHARA, Yuzuru HARADA, D. N. NENCHEV
and Daisuke SATO, Musashi Institute of Technology

Abstract—The aim of our research is walking pattern generation for humanoid robots based on the Limit Cycle Walking concept. In this work, we discuss the possibility for extending the concept to generate a walking pattern for a three-dimensional model with an upper body. To solve the problem, we apply decoupled control for separate motion generation in the sagittal and frontal planes.

Key Words: Limit Cycle Walking, Passive Dynamic Walking, Decoupled control

1. 緒言

現在, 2 足歩行の最適化の指標として McGeer の受動歩行 [1] と呼ばれる歩行方法が注目されている. 受動歩行とは, 下り斜面において歩行動作により得られる回復エネルギーと遊脚と床面との衝突による損失エネルギーが平衡状態になることで実現するリミットサイクル歩行 [2] の一種である. その特徴は, 歩行エネルギーが重力ポテンシャルからのみ供給され, 外部入力は一切必要としない点である.

しかし, リミットサイクルを利用した 2 足歩行を議論する際に用いられるロボットのモデルは, ピッチ運動のみに限定された平面モデルがほとんどであり, 実際の人型ロボットへの応用には 3 次元運動への拡張が必要である. 3 次元運動への拡張の研究として, Wisse ら [3] によるロール, ピッチおよびヨー運動が可能な 2 足歩行ロボットモデルの受動歩行がある. これは, ドーム型の上半身を用いてヨーおよびロール運動を受動的に補償し, ピッチ運動では平面における受動歩行の挙動を再現し歩行生成する手法がある.

本研究では, 人型ロボットへの適用を念頭に置き, 特別な形状をしたリンクをもたず制御入力により歩行制御を行う. 本稿では, ロールおよびピッチ運動が可能な 2 足歩行ロボットモデルを扱う. そして, その歩行制御法はピッチ運動とロール運動を非干渉化する制御入力を与え, ピッチ運動では平面の受動歩行の挙動を再現, ロール運動では追従制御を行う. つまり, リミットサイクルを利用したピッチ運動と静的に安定したロール運動を組み合わせた歩行制御法である.

2. 2 足歩行ロボット

2.1 ロボットのモデル

本稿では Fig. 1 に示す上半身を有する 3 次元 2 足歩行ロボットモデルを扱う. 本モデルは支持脚の足首関節に 2 自由度, 腰関節に 3 自由度を持ち各関節でトルクを発生できるものとする. また, 上半身のピッチ関節 Joint 4 に関しては浅野らによって提案された Bisecting

Hip Mechanism [4] と同じ効果を持つ機構が設置されているものとする. したがって, 本モデルは計 4 自由度の 2 足歩行ロボットとなる.

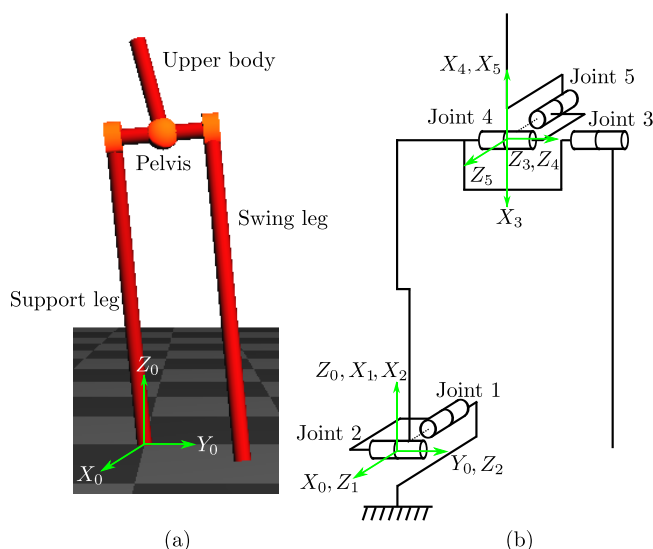


Fig.1 Our biped model: (a) rendered view, (b) kinematic structure.

2.2 運動方程式

Fig. 1 に示す 2 足歩行ロボットモデルの一般化座標を $q = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5]^T$ とすると, 片足支持期の運動方程式は

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau + J_H^T \lambda_H \quad (1)$$

$$\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3 \ \tau_4 \ \tau_5]^T \quad (2)$$

で表される. ただし, 各リンクの慣性モーメントと関節の粘性摩擦は無視できるものとする. 式に含まれる記号 $H(q) \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$ は慣性行列, $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$ は遠心力・コリオリ力に関する行列, $g(q) \in \mathbb{R}^5$ は重力に関する

る行列, $\tau \in \mathbb{R}^5$ は制御入力である．また, $J_H \lambda_H \in \mathbb{R}^5$ は $q_4 = q_3/2$ なる幾何学的拘束を満たす拘束力である．

2.3 衝突方程式

遊脚と床面との衝突は完全非弾性衝突を仮定し, 遊脚と支持脚は瞬時に切り替わるものとする．したがって, 衝突前後の関節速度の関係は上半身のピッチ運動の拘束力を考慮した角運動量保存則により表される．

3. 非干渉化制御

ピッチ運動において平面の受動歩行の挙動を再現するために, ロール運動とピッチ運動の干渉成分をフィードフォワード的に補償し運動の非干渉化を行う．Eq. (1) の運動方程式中の慣性行列 $H(q)$, 遠心力・コリオリ力に関する行列 $C(q, \dot{q})$ のロール運動とピッチ運動の干渉部を取り出した行列を $H^*(q) \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$, $C^*(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$ とすると非干渉化の制御入力 $\tau_{dcp} \in \mathbb{R}^5$ は

$$\tau_{dcp} = H^*(q)\ddot{q} + C^*(q, \dot{q})\dot{q} \quad (3)$$

で算出される．

4. 重力環境の再現

平面における受動歩行の挙動を再現するためには, 重力環境を平面の場合と一致させる必要がある．ここで, Eq. (1) の運動方程式中の重力に関する行列 $g(q)$ において腰リンク長を含む項を取り出した行列を

$$g^*(q) = \begin{bmatrix} g_1^* & g_2^* & g_3^* & g_4^* & g_5^* \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

とすると, 重力環境再現の制御入力 τ_g は

$$\tau_g = \begin{bmatrix} 0 & g_2^* & g_3^* & g_4^* & 0 \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

となる．これにより, Fig. 1 に示す 2 足歩行ロボットモデルのピッチ運動における重力環境を平面の場合と一致させることができる．

5. ロール運動制御

ロール運動の制御入力 $\tau_{roll} \in \mathbb{R}^5$ は, 足首および腰のロール関節について PD 制御および遠心力・コリオリ力, 重力補償を行う．PD 制御の目標軌道は時間関数

$$q_1^{ref} = A \sin^2(2\pi t/T) \quad (6)$$

$$q_5^{ref} = -B \sin^2(2\pi t/T) \quad (7)$$

を用いた．式中に含まれる A, B は振幅, T は周期である．

6. 数値シミュレーション

非干渉化制御入力 τ_{dcp} , 重力環境再現の制御入力 τ_g , ロール運動制御入力 τ_{roll} を統合した制御入力 τ

$$\tau = \tau_{dcp} + \tau_g + \tau_{roll} \quad (8)$$

を Eq. (1) に代入し, リミットサイクル歩行のシミュレーションを行った．傾斜角は $\phi = 0.02$ rad とした．Fig. 2 にシミュレーション結果を示す．Fig. 2(a) は関節角度と関節速度の相図である．毎ステップで周期的

な軌道となり, 安定したリミットサイクルになっている．Fig. 2(b) は制御入力の時間変化である．ピッチ運動に関する制御入力 τ_2, τ_3, τ_4 は比較的低トルクである．これは, ロール運動からピッチ運動への干渉が弱いためである．一方, 足首ロール関節の制御入力 τ_1 は他の制御入力と比較すると高トルクとなった．これは, ロール運動がピッチ運動とは異なりリミットサイクルを利用したものではなく, 追従制御により強引に生成した運動であることが原因である．

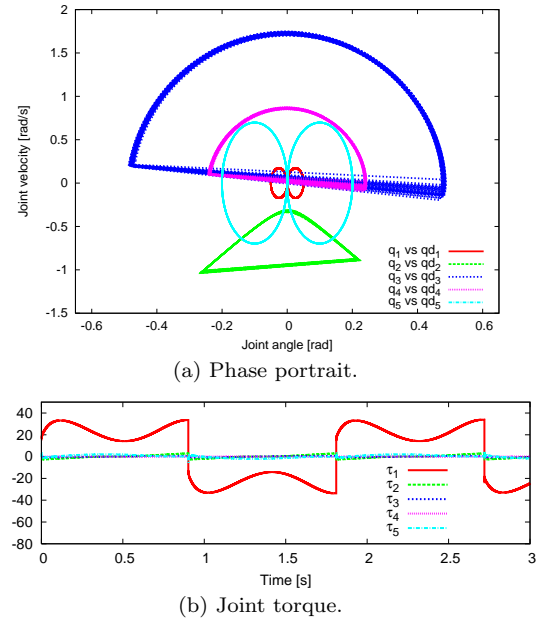


Fig.2 Simulation results of Limit Cycle Walking of 3D biped model with an upper body.

7. 結言と今後の課題

本稿では非干渉化制御を用いることで上半身を有する 3 次元 2 足歩行ロボットモデルのリミットサイクル歩行生成法を提案した．ロボットのピッチ運動に関しては, 平面モデルの受動歩行の挙動を再現することで比較的低トルクな制御入力で駆動している．しかし, ロール運動制御には追従制御を用いたため, ピーク値においてはピッチ運動制御入力と比較すると約 8 倍の値であった．今後は, 上半身のロール運動制御による省トルクなロール運動について研究を行っていく．

参考文献

- [1] T. McGeer, "Passive Dynamic Walking," *The Int. J. of Robotics Research*, vol. 9, no. 2, pp. 62–82, 1990.
- [2] D.G.E. Hobbelen and M. Wisse, "Ankle Actuation for Limit Cycle Walkers," *The Int. J. of Robotics Research*, vol. 27, no. 6, pp. 709–735, 2008.
- [3] M. Wisse, A. L. Schwab, R. Q. vd. Linde, "A 3D Passive Dynamic Biped with Yaw and Roll Compensation," *Robotica*, vol. 19, pp. 275–284, 2001.
- [4] F. Asano and Zhi-Wei Luo, "Underactuated Virtual Passive Dynamic Walking with an Upper Body," *Proc. of the IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 2008, pp. 2441–2446.