膝関節駆動によるパラメータ励振に基づく 2 脚歩容生成

Biped Gait Generation based on Parametric Excitation by Knee-joint's Actuation

○原田祐志 (名古屋大学) 浅野文彦 (理化学研究所 BMC)
羅志偉 (神戸大学, 理化研究所 BMC) 田地宏一 (名古屋大学)
宇野洋二 (名古屋大学)

Yuji HARATA, Nagoya University, y_harata@nuem.nagoya-u.ac.jp
Fumihiko ASANO, BMC RIKEN
Zhi-Wei LUO, Kobe University/ BMC RIKEN
Kouichi TAJI, Nagoya University
Yoji UNO, Nagoya University

Abstract— The restoration of mechanical energy lost during the collision between a leg and the ground is requisite for a steady and continuous gait. One principle to do this is the parametric excitation. Recently, Asano et al. applied this principle to a biped robot with telescopic legs, and succeeded in generating a sustainable biped gait in a computer simulation. In this paper, we deal with a model of a biped robot that has semicircular feet and actuated knees. Though this robot has no actuator at the hip, knee actuators can sustain gait by parametric excitation. We first verify that an actuated knee can cause parametric excitation and then show by computer simulation that the proposed biped robot can walk continuously with actuated knees only.

Key Words: Biped gait, Parametric excitation, Energy restoration, Knee-joint's actuation

1. はじめに

2 足歩行ロボットは遊脚が地面と衝突する際にエネルギー損失を生じる。そのため、継続した歩行の実現には力学的エネルギーの回復が必要不可欠である。受動歩行が斜面を下ることによるポテンシャルエネルギーから運動エネルギーへの変換によるエネルギー回復現象であると考え、これを平地へ応用した仮想受動歩行 [1] や、歩行時に一定に保たれるエネルギーレベルを参照軌道として設定し、平地でこれに追従させることで安定なリミットサイクルを生成するエネルギー追従制御 [3] はエネルギー回復を達成する手法である。これらに対して、浅野らは、人間がブランコに乗った際、体を上下運動させることで揺れ幅が大きくなるパラメータ励振原理に基づく手法を提案した。この手法は直動アクチュエータにより遊脚を伸縮させ、パラメータ励振の原理によりエネルギー回復を生じさせる。このとき、片脚支持期において遊脚が短くなるため、床を削るフットクリアランスの問題も同時に解決できる利点を持つ。

林ら [4] はこれまでに直動アクチュエータにより歩行を実現した方法を提案し、数値シミュレーションだけでなく、実機実験を通してその妥当性を検証してきた。本稿では回転駆動関節を持つ一般的な 2 脚歩行系への適用として、膝関節駆動によりパラメータ励振原理に基づきエネルギーを回復させる手法を提案する。まず、膝の屈伸により、遊脚重心を上下させることでエネルギー回復を生じることを示す。次に半円形状をした足部を持つ平面歩行 2 脚歩行モデルを用いて、その基礎的な挙動の解析を行い、シミュレーションで継続歩行ができることを示す。

2. 膝関節を有する 2 脚モデル

Fig. 1 に本稿で扱う 4 質点・3 自由度の平面 2 脚ロボットのモデルを示す。半円形状の足部を持ち、円弧の中心点は脚上にあるものとする。片脚支持期の運動方程式は

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta) = Su_K - J^T \lambda \quad (1)$$

Fig.1 Model of a planar kneed biped with semi-circular feet

で与えられる。ただし $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$ は一般化座標ベクトルである。ここで M は慣性行列、 D はコリオリ力、遠心力、 G は重力行列を表す。制御入力ベクトル Su_K の詳細については後述する。このモデルは膝と地面での衝突を生じ、以下の三相を持つ。

- I 相：単脚支持状態にあり、足裏と地面の接触点まわりに回転している状態で、膝が曲がった状態。
- II 相：単脚支持状態にあり、足裏と地面の接触点まわりに回転している状態で、膝が伸びた状態に拘束されているとき、I 相から II 相への移行に際しては、膝部での衝突が生じる。
- III 相：両脚支持状態にある。これは瞬間的に起きる状態と仮定し、この状態から脚の切り替えを行い I 相へ移行する。

Fig.2 Optimal trajectory of pendulum for parametric excitation

Fig.3 Two link model of a planar underactuated biped robot with telescopic legs

膝関節は支持脚交換直後にロックを解除され、再び $\theta_2 = \theta_3$ となった瞬間に完全非弾性衝突をし、その後、遊脚が床面と衝突する（次の支持脚交換が起こる）まで拘束力 $\mathbf{J}^T \lambda$ によりロックされ動かないものとする。 $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$ は膝関節の速度拘束条件 $\mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\theta}} = 0$ から導かれるヤコビ行列、 $\lambda \in \mathbb{R}$ はその拘束力である。

3. パラメータ励振原理

パラメータ励振とは、ブランコで人が重心を上下させることで、振れ幅を大きくするような現象のことをいう。文献 [6] に、その最適軌道が示されている。Fig. 2 に示した可変長振子の最適軌道は、最大振れ角 θ_0 を最大にするものであるとし、点 A, D, E では $\dot{\theta} = 0$ である。このとき振子の長さ l を瞬間的に変えることができるとすると、その最適軌道は $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ と移動させるものとなる。 θ_0 が最大となるということは力学的エネルギーが最大となることと等しいので、 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ と移動させることでエネルギー回復が最大となる。この最適軌道に準じた軌道をとることでエネルギー回復を生じさせる。浅野らは、遊脚の重心の上下に着目し、パラメータ励振原理からエネルギー回復を生じさせ、2脚歩行を実現した [2, 4]。Fig. 3 のような伸縮脚を持つ2脚歩行ロボットに対して、遊脚重心位置 b_2 の長さを変化させることで、エネルギー回復させ、歩行を実現する。 b_2 の目標軌道は $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ に準じた軌道として以下のよう

$$b_{2d} = \begin{cases} b - A_m \sin^3\left(\frac{\pi}{T_{set}}t\right) & (t \leq T_{set}) \\ b & (t > T_{set}), \end{cases}$$

ここではこのモデルに対する入力には示さないが、この入力によりエネルギー回復が生じ歩行が実現される。

Fig.4 Double pendulum and its equivalent 1-link model with prismatic joint

3.1 2重振子におけるパラメータ励振

伸縮脚においてエネルギー回復が生じたのと同様に、遊脚の重心位置をパラメータ励振の手法で制御することで、歩行の実現が可能ではないかと考えた。まず、回転駆動系に対してパラメータ励振原理によるエネルギー回復が可能かどうか確認するため、Fig. 4 に示した2重振子に対してシミュレーション実験を行う。片脚支持期において、伸縮駆動のパラメータ励振原理により振幅が増大することは確認された [4]。そこで、膝関節の屈折によりこれを実現することを考える。2重振子をFig. 4 のような回転軸と重心を結んだ仮想的な伸縮機構と考え、式 (2) のように重心を上下させる。簡単のため、今回は重心の運動に対しての目標軌道を設計するのではなく、リンク間の相対角度に対し目標軌道を設計する。その目標軌道を、

$$(\theta_1 - \theta_2)_d = A_m \sin^3\left(\frac{\pi}{T_{set}}t\right)$$

とし、その軌道に追従するような入力をリンク間にのみ加えた。さらに、歩行の形態を模倣するため、半周期においてのみ入力を加え、膝での衝突が起きると同様、リンクが伸びた瞬間に衝突が起きるとしてシミュレーションを行った。

本稿では紙面の都合上、力学的エネルギーの結果のみ Fig. 5, 6 に示す。Fig. 6 は Fig. 5 を拡大したものである。Fig. 6 より、振子を曲げるときにエネルギーが回復し、伸ばすとエネルギーが減少していることが分かる。さらに、振子が伸びきった瞬間に衝突がおき、エネルギー損失が起きている。一周期毎にエネルギー回復がおき、Fig. 5 のように、エネルギーが上昇していく。この結果から、遊脚の屈伸運動によりエネルギー回復を生じさせることができる。つまり、劣駆動回転駆動系において、遊脚の重心位置をパラメータ励振の手法で制御することで、歩行の実現が可能となると考えられる。

3.2 回転駆動系におけるパラメータ励振に基づく歩行

遊脚の重心位置は以下のように書き表せる。

$$L_{sc} = \frac{1}{m_2 + m_3} \sqrt{A + B \cos(\theta_2 - \theta_3)} \quad (2)$$

ただし、

$$A = m_2^2 r_2^2 + m_3^2 (a_2^2 + r_3^2) + 2m_2 m_3 r_2 a_2$$

$$B = 2m_3^2 a_2 r_3 + 2m_2 m_3 r_2 r_3$$

である。膝関節モデルでは膝での衝突および地面との衝突の2回の衝突がある。そこで、この2回の衝突におけるエネルギー

Fig.5 Total mechanical energy of double pendulum

Fig.6 Enlarged illustration of Fig. 5

の消散を小さくすること、できるだけ多くエネルギー回復をさせることが重要となってくる。そこで今回、重心の目標軌道を

$$L_{scd} = \begin{cases} a - A_m \sin^{11} \left(\frac{\pi}{T_{set}} t \right) & (t \leq T_{set}) \\ a & (t > T_{set}), \end{cases} \quad (3)$$

とした。パラメータ励振において、最適なエネルギー回復軌道は Fig. 2 のような軌道であるため、 $\sin$ の乗数を上げていき発見的に 11 乗という値を得た。また地面との衝突によるエネルギー損失を小さくするために、足裏半径を大きくとった。入力式 (2) に示す重心位置が目標軌道式 (3) に収束する様に設計する。そこで、

$$L_{sc} = L_{scd}$$

から式 (2) の $\theta_2 - \theta_3$ の目標軌道が計算でき、

$$(\theta_2 - \theta_3)_d = f(t) = -\arccos(FL_{vcsd}^2 - E) \quad (4)$$

となる。ここで、

$$E = \frac{A}{B}$$

$$F = \frac{(m_2 + m_3)^2}{B}$$

である。このとき、 $\mathbf{x} = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_2 - \theta_3 - f]^T$ とおくと、

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -f \end{bmatrix} = \mathbf{L}_K \mathbf{x} + \mathbf{N}$$

となる。また、

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{L}_K \dot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{N}}$$

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{L}_K \ddot{\mathbf{x}} + \ddot{\mathbf{N}}$$

Table 1 Physical parameters of the kneed biped model in Fig. 1

r_1	0.350	m	R	0.65	m
r_2	0.25	m	m_1	5.0	kg
r_3	0.25	m	m_2	1.0	kg
a_2	0.50	m	m_3	4.0	kg
a_3	0.50	m	m_H	5.5	kg
l	1.00	m	I	0.024643	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$

となる。これらを用いることで、式 (1) は、

$$\mathbf{M} \mathbf{L}_K \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{M} \ddot{\mathbf{N}} + \mathbf{C} \mathbf{L}_K \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{N}} + \mathbf{g} = \mathbf{S} \mathbf{u}$$

に変換される。Fig. 1 に示すように、ここでは膝関節トルクのみ用いることから、

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

である。行列 $\mathbf{K}$ を

$$\mathbf{K} = [\mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{1}] \mathbf{L}_K^{-1} [\mathbf{M}^{-1} \mathbf{S}]$$

と定義し、制御入力

$$\mathbf{u}_K = \mathbf{K}^{-1} (\mathbf{v} + \mathbf{R})$$

$$\mathbf{R} = [\mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{1}] \mathbf{L}_K^{-1} \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{M} \mathbf{N} + \mathbf{C} \mathbf{L}_K \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{N}} + \mathbf{g})$$

を用いると、

$$\ddot{\mathbf{y}} = \mathbf{v}$$

となる。ここで、 $\mathbf{y} = \theta_2 - \theta_3 - f$ である。この $\mathbf{v}$ に対して $\mathbf{y}$ を 0 に収束させる PD 制御入力を加えることで、目標軌道に収束させる。

3.3 数値シミュレーション

本稿で行うシミュレーションにおけるモデル (Fig. 1) の脚の長さ、質量等のパラメータの値を Table 1 に示した。また、膝が伸びきった状態である初期状態と終端状態において、式 (4) の f の時間微分が計算できなくなる。このとき、 $FL_{vcsd}^2 - E \equiv 1$ となっている。このため、この区間の入力 $\mathbf{u}_K$ を 0 とした。

膝関節駆動によるパラメータ励振歩行のシミュレーション結果を Fig. 7 に示す。この図は歩行開始から十分時間がたった 3 歩分を示しており、歩容が収束した状態である。各図はそれぞれ、(a) 関節角度、(b) 関節角速度、(c) 力学的エネルギー、(d) 膝関節トルク、(e) フットクリアランス、(f) 股関節から遊脚重心までの距離を示している。

結果より、膝関節トルクのみで歩行が実現されていることが確認できる。

Fig. 7(c),(f) をみると、膝関節トルクにより膝の曲げ伸ばしが生じ、膝を曲げるときにエネルギー回復を生じ、伸ばすときにエネルギーが減少している。これは、膝を曲げることによりポテンシャルエネルギーが増加し、伸ばすことで下がるためである。このエネルギーの増減の差が回復量となっている。また膝での衝突は、式 (3) で与えられる目標軌道を追従するため、膝でのリンク間相対速度が小さくなり、衝突による損失エネルギー小さくなっている。Fig. 7(d) を見ると歩行周期の間に入力が 0 の区間がある。これは膝が伸びていて入力が増えられない区間、および初期状態と終端状態付近の入力を 0 とした区間である。このとき、入力が加わっていないのでこの区間の力学的エネルギーは一定となっている。

伸縮脚においてパラメータ励振の手法は、脚を縮めることからフットクリアランスの問題も同時に解決できる利点があった。

Fig.7 Simulation results of revolutionary parametrically excited dynamic bipedal walking

本手法においても膝の曲げ伸ばしにより、この問題が解決できることが望まれたが、Fig. 7(e)を見ると、歩行周期の間に0を下回っていることがわかる。これはFig. 8を見るとわかるように半円形状の足部が大きいためである。

4. まとめと今後の課題

本稿では伸縮脚によるパラメータ励振の手法を、回転駆動系に適用することで、股関節トルクを用いることなく歩行が実現できた。

目標軌道を今回は股関節から遊脚重心間の距離に対して与えたが、これは膝が伸びきった状態の初期状態と終端状態において、式(4)の f の時間微分が計算できなくなるためである。今回はそのときの入力を0としたため、これが原因で目標軌道からのズレを生じる。さらに、 $\sin$ を11乗としたために $FL_{vcsd}^2 - E \approx 1$

Fig.8 Stick diagram of revolutionary parametrically excited dynamic bipedal walking

の区間が長くなり収束が妨げられる。そこで、膝関節角度に対して、

$$(\theta_2 - \theta_3)_d = \begin{cases} \theta_0 \sin^n \left(\frac{\pi}{T_{set}} t \right) & (t \leq T_{set}) \\ 0 & (t > T_{set}), \end{cases}$$

と目標軌道を設定することで、この問題を解決し、目標軌道に収束させることができるのではないかと考えられる。

今回衝突によるエネルギー損失を抑えるため、足部の半径が大きくした。このため、床を削っているという問題がある。そこで、股関節トルクを組み合わせることで、エネルギー回復を大きくし、足裏半径を小さくしていくことを考えている。もうひとつの手法として、遊脚重心の目標軌道と同様に、股関節から足裏最下点までの長さに対しても目標軌道を設計し、床を削らないように屈伸させる。遊脚重心と等価長さの目標軌道を組み合わせることで、解決する手法を考えている。

参考文献

- [1] 浅野文彦, 羅志偉, 山北昌毅, “受動歩行を規範とした2足ロボットの歩容生成と制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 1, pp. 130-139, 2004.
- [2] 浅野文彦, 羅志偉, “パラメータ励振に基づく伸縮脚ロボットの動的歩行制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 7, pp. 910-918, 2005.
- [3] A. Goswami, B. Espiau and A. Keramane, “Limit cycles in a passive compass gait biped and passivity-mimicking control laws,” J. of Autonomous Robots, Vol. 4, No. 3, pp. 273-286, 1997.
- [4] 林健志, 浅野文彦, 羅志偉, 平野慎也, 加藤厚生, “パラメータ励振による高効率2脚歩行ロボットの制御実験”, 第7回SICEシステムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 21-22, 2006.
- [5] 原田祐志, “仮想拘束を用いた2脚歩行ロボットの動的制御”, 2006年度名古屋大学大学院修士論文, 2007.
- [6] E.K. Lavrovskii and A.M. Formal'skii, “Optimal control of the pumping and damping of swing,” J. of Applied Mathematics and Mechanics, Vol. 57, No. 2, pp. 311-320, 1993.