

4足歩行ロボットのエネルギー効率向上に関する研究

Experimental Study on Energy Efficiency of Quadruped Walking Robots

○ 大田 和彦 (九州大) 安 乗元 (木浦海洋大) 倉爪 亮 (九州大) 長谷川 勉 (九州大)

Kazuhiko OHTA †Kyushu University, 6-10-1, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, Japan

Byong-won AHN ††Mokpo Maritime University

Ryo KURAZUME†

Tutomu HASEGAWA† {kazu-o,ahnbw,kurazume,hasegawa}@irvs.is.kyushu-u.ac.jp

For attaining a high moving speed with a legged robot, a dynamically stable walking is a promising solution. However, the energy efficiency of a dynamically stable walking is generally lower than the efficiency of a stable gait. In this paper, we present an experimental study on the energy efficiency of a quadruped walking robot. Energy consumption of two walking patterns for a trot gait is investigated through experiments using a quadruped walking robot named TITAN-VIII. The obtained results show that the 3D sway compensation trajectory has advantages in view of energy efficiency as compared with the original sway compensation trajectory.

Key Words: Quadruped robot, Dynamically stable walking, trot gait, Energy efficiency

1 はじめに

4足歩行ロボットの移動速度の高速化には歩行の実現は不可欠である。基本的歩行であるトロット、ペース、パウンドのうち、遊脚の接地によって完全転倒を回避できる「安全歩容」であるトロット歩容に対して、これまでに歩行中に胴体重心軌道を進行方向に対して左右に揺動させ、ZMP (Zero Moment Point) を滑らかに支持脚対角線上を移動させる「左右揺動歩容」¹⁾が提案されている。

一方、移動のためのエネルギー効率の向上は、移動ロボットの設計、制御において最も重要な検討項目の一つである。特にバッテリーなどのエネルギー源を搭載した移動ロボットにとって、それは単に稼働時間の延長にとどまらず、バッテリーの小型化による可搬重量の増大や目的とする作業や作業機への資源の集中的利用が可能となる。

左右揺動歩容をエネルギー効率の観点から検討すると、ロボット胴体は左右方向の加減速を周期的に繰り返すため、特別な制御を行わない場合に比べてエネルギー消費が大きいと考えられる。そこで、胴体を左右だけでなく上下方向にも揺動させ、より効率的にZMPを支持脚対角線上を移動させる「3D揺動歩容」²⁾が提案された。

本研究では、提案された3D揺動歩容のエネルギー効率が左右揺動歩容よりも高いことを計算機シミュレーション、及び実機 (TITAN-VIII) による歩行実験で検証することを目的とする。

2 左右揺動歩容と3D揺動歩容

2.1 左右揺動歩容

まず、左右揺動歩容の定式化を行う。ただし、ここではロボットは質点と考え、その位置を (x_g, y_g, z_g) とする。床面が平面であると仮定し、床面からの高さ z_g が一定であるとすると、床面上でのZMPの位置 $(x_{zmp}, y_{zmp}, 0)$ は、

$$\begin{pmatrix} x_{zmp} \\ y_{zmp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_g \\ y_g \end{pmatrix} - A \begin{pmatrix} \ddot{x}_g \\ \ddot{y}_g \end{pmatrix} \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 $A = \frac{z_g}{g}$ である。また、支持脚対角線を

$$\cos \theta x + \sin \theta y = d \quad (2)$$

とすると、この上にZMPが存在するためには、重心位置は

$$\cos \theta (x_g - A\ddot{x}_g) + \sin \theta (y_g - A\ddot{y}_g) = d \quad (3)$$

を満たさなければならない。

ここで進行方向を x 軸とし、進行方向への重心の移動加速度は一定であると仮定すると式 (3) を満たす解は次式で表せる。

$$x_g = x_0 + vt + \frac{1}{2}at^2 \quad (4)$$

$$y_g = C_1^y e^{\frac{t}{\sqrt{A}}} + C_2^y e^{-\frac{t}{\sqrt{A}}} + a_2^y t^2 + a_1^y t + a_0^y \quad (5)$$

これが左右揺動歩容の重心軌道である。

2.2 3D揺動歩容

左右揺動歩容を前後、上下方向へ拡張する。式 (3) と $A = \frac{z_g}{g+\ddot{z}_g}$ から

$$x_g = C_1^x e^{\frac{t}{\sqrt{A}}} + C_2^x e^{-\frac{t}{\sqrt{A}}} + a_2^x t^2 + a_1^x t + a_0^x \quad (6)$$

$$y_g = C_1^y e^{\frac{t}{\sqrt{A}}} + C_2^y e^{-\frac{t}{\sqrt{A}}} + a_2^y t^2 + a_1^y t + a_0^y \quad (7)$$

$$z_g = C_1^z e^{\frac{t}{\sqrt{A}}} + C_2^z e^{-\frac{t}{\sqrt{A}}} + Ag \quad (8)$$

と表せる。これが3D揺動歩容の重心軌道である。

2.3 エネルギー効率の評価基準

これら2つの歩容のエネルギー効率を軌道全体の加速度二乗和

$$\rho = \int_0^T (\ddot{x}_g^2 + \ddot{y}_g^2 + \ddot{z}_g^2) dt \quad (9)$$

で評価すると、左右揺動歩容では

$$\rho = \frac{L^2(\sqrt{A}(-1 + e^{\frac{T}{\sqrt{A}}}) - e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}}) \cot^2 \theta}{A(1 + e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}})^2 T^2} \quad (10)$$

となり、3D揺動歩容では

$$\rho = \frac{L^2(\sqrt{A}(-1 + e^{\frac{T}{\sqrt{A}}}) - e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}}) \cot^2 \theta}{A((1 + e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}})^2 T^2 + 16A(-1 + e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}})^2 \cot^2 \theta)} \quad (11)$$

となる。これらを比較すると、 $T = 0$, $\theta = \frac{\pi}{2}$ あるいは $A = \frac{H}{g} = 0, \infty$ 以外であれば、3D揺動歩容の加速度二乗和は左右揺動歩容よりも小さくなるのがわかる。これは歩行に必要な消費エネルギーを小さくできる可能性を示している。

3 計算機シミュレーション

実際の歩行ロボットの自由度配置を反映した計算機モデルを作成し、計算機シミュレーションを行った。4足歩行ロボットの計算機モデルの諸元は次章の歩行実験で用いたTITAN-VIII (Fig.2) と同一である。

シミュレーションでは、計算トルク法を用いて各関節が発生すべきトルクを計算し、求めたトルクに関節の回転速

度を加えることにより消費パワーを求めた。このとき、ロボットの足裏と床面の間には滑りはしないものとし、4脚支持相は存在せず、常に2脚支持であるものとした。また、負のパワーは再生することなく消失するものとした。

計算機シミュレーションにより計算された Leg1 (左後脚) の各ジョイントの消費パワーを Fig.1 に示す。これらから、支持脚相において、本体を支えて左右への揺動を生成するために使われる Joint1 及び Joint2 の消費パワーが 3 D 揺動歩容の方が左右揺動歩容よりも低く抑えられていることが分かる。

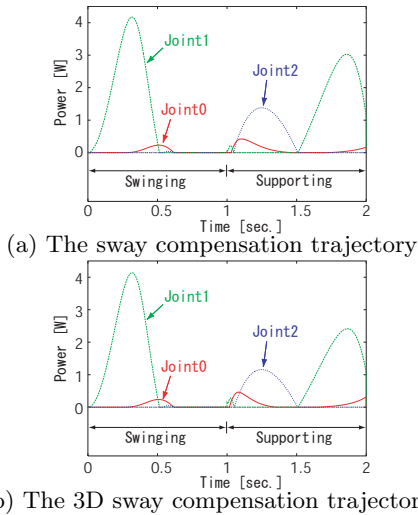


Fig.1: Power consumption of Leg1. (cycle time is 2.0 [sec.])

また、消費パワーを時間積分して得られた消費エネルギーを Table1 に示す。これより、3 D 揺動歩容では、前後方向への揺動を生成する Joint0 の消費エネルギーは左右揺動歩容と比べて大きくなるが、それ以上に Joint1、Joint2 で消費されるエネルギーが抑えられるため、全体として消費エネルギーが低く抑えられていることが分かる。

| | The Sway Comp. Traj. | | |
|--------------|----------------------|-------|-------|
| Cycle [sec.] | 1.5 | 2.0 | 3.0 |
| Joint0 [J] | 0.254 | 0.159 | 0.079 |
| Joint1 [J] | 2.196 | 2.533 | 2.923 |
| Joint2 [J] | 0.420 | 0.507 | 0.608 |
| Total [J] | 2.870 | 3.201 | 3.610 |

| | The 3D Sway Comp. Traj. | | |
|--------------|-------------------------|-------|-------|
| Cycle [sec.] | 1.5 | 2.0 | 3.0 |
| Joint0 [J] | 0.258 | 0.168 | 0.091 |
| Joint1 [J] | 2.018 | 2.294 | 2.608 |
| Joint2 [J] | 0.344 | 0.418 | 0.505 |
| Total [J] | 2.620 | 2.881 | 3.204 |

Table1: Simulation results

これらのシミュレーション結果より、左右揺動歩容よりも前後への揺動も含んだ 3 D 揺動歩容の方がエネルギー効率が高いことが確認された。

4 歩行実験

左右揺動歩容、及び 3 D 揺動歩容の消費エネルギーを測定、比較するため、TITAN-VIII (Fig.2) を用いた歩行実験を行った。消費エネルギーの測定は、各モータへ供給する電流、電圧をモータドライバの内部で測定し、アナログ回路によりそれらを積算してローパスフィルタ、A/D コンバータを介して計算機に取り込んだ。

Leg 1 の消費パワーの測定結果を図 3 に示す。これらより、支持脚相において 3 D 揺動歩容の方が Joint2 の消費パワーが低く抑えられていることが分かる。Joint2 は左右への揺動を主に生成する関節であり、3 D 揺動によ

って胴体の運動がより滑らかになったため消費エネルギーが抑えられたと考えられる。

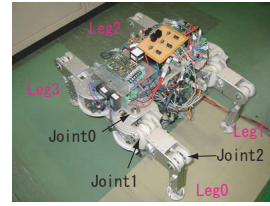


Fig.2: TITAN-VIII

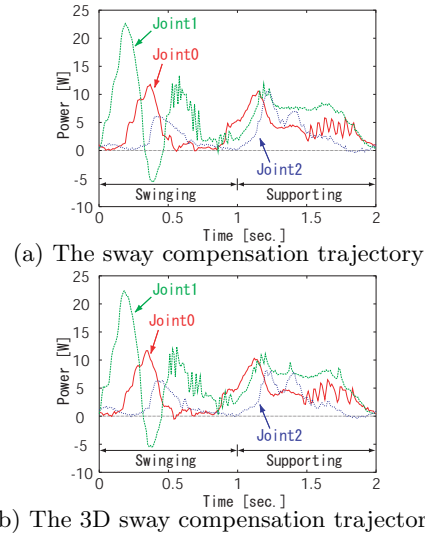


Fig.3: Power consumption of Leg1 (cycle time is 2.0 [sec.])

測定された消費パワーを時間積分して得られた消費エネルギーを Table2 に示す。これを見ると全てのジョイントで 3 D 揺動歩容の方が左右揺動歩容よりも消費エネルギーが低く、全体で消費されるエネルギーも低く抑えられていることが分かる。

| | The Sway Comp. Traj. | | |
|--------------|----------------------|--------|--------|
| Cycle [sec.] | 1.5 | 2.0 | 3.0 |
| Joint0 [J] | 7.823 | 7.556 | 8.784 |
| Joint1 [J] | 12.832 | 13.617 | 16.990 |
| Joint2 [J] | 3.665 | 4.890 | 7.199 |
| Total [J] | 24.321 | 26.064 | 32.973 |

| | The 3D Sway Comp. Traj. | | |
|--------------|-------------------------|--------|--------|
| Cycle [sec.] | 1.5 | 2.0 | 3.0 |
| Joint0 [J] | 7.143 | 7.396 | 8.437 |
| Joint1 [J] | 12.009 | 13.537 | 16.338 |
| Joint2 [J] | 3.066 | 4.321 | 5.780 |
| Total [J] | 22.218 | 25.256 | 30.556 |

Table2: Experimental results

これらから、実機による実験でも 3 D 揺動歩容の方がエネルギー効率が高いことが確認された。

5 おわりに

計算機シミュレーション、及び歩行実験により、左右揺動歩容と 3 D 揺動歩容の消費エネルギーを比較し、3 D 揺動歩容の方がエネルギー効率が高いことを確認した。

- 1) 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.257-275, 1991.
- 2) 倉爪, 米田, 広瀬, " 4 足歩行機械の 3 D 揺動歩容 ", 日本ロボット学会誌, vol.19, no.5, pp.632-637, 2001.