

4足歩行機械の3D揺動歩容

倉 爪 亮*¹ 米 田 完*² 広 瀬 茂 男*²

3D Sway Compensation Trajectory for Quadruped Walking Robot

Ryo Kurazume*¹, Kan Yoneda*² and Shigeo Hirose*²

We have proposed the sway compensation trajectory of robot body to realize dynamically stable walking for a quadruped walking robot. This method uses the lateral motion of the robot body to keep a zero momentum point (ZMP) on a diagonal line between the support legs. However, energy consumption of the sway compensation trajectory is larger than the case without trajectory control because periodical acceleration of the body has to be generated to realize sway motion. In this paper, we propose a new sway compensation trajectory for a quadruped walking robot named 3D sway compensation trajectory. This method is the extension of conventional sway compensation trajectory toward three dimensional motion, and the position of ZMP is controlled not only by lateral body motion but also by longitudinal and vertical body motion. Next, we demonstrate that energy consumption for walking can be reduced by combining these motions through theoretical analysis and computer simulation, and an optimum 3D sway compensation trajectory that minimizes energy consumption is proposed. Optimum trajectory is applied to a quadruped walking robot and the validity of the proposed trajectory is verified using the dynamic motion simulator, ADAMS.

Key Words: Quadruped Robot, Dynamically Stable Walking, ZMP, Trot Gait, Energy Efficiency

1. は じ め に

4足歩行機械の移動速度の高速化には、支持脚が2脚以下の不安定状態の存在する、いわゆる動歩行の実現が不可欠である。筆者らはこれまでに基本的動歩行であるトロット、ペース、バウンド歩容のうち、代表的静歩行であるクロール歩容と最も親和性の高く、また遊脚の接地によって完全転倒を回避できる「安全歩容」[1]であるトロット歩容に着目し、移動速度に応じてクロール歩容からトロット歩容に滑らかに遷移できる「拡張トロット歩容」[2]や、遊脚復帰動作の胴体への動的効果を軽減するため、対角脚を同時に遊脚／支持脚化する「間歇トロット歩容」[3]を提案した。また、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を滑らかに支持脚対角線上を移動させる「左右揺動歩容」[2]を提案し、安定動歩行の実現における本歩容の有効性を4足歩行機械 TITAN-IV, TITAN-VIを用いた歩行実験により検証してきた。

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

バッテリー等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。4足歩行機械の移動効率については、木村ら[8]が歩行周期やトロット、ペース歩容と消費エネルギーの関係について詳細に検討している。しかし4足歩行機械は倒立振子としてモデル化されており、左右揺動歩容で実現されるような平衡状態を常に維持する歩容については検討されていない。また小田島ら[9]は複数の脚サブシステムから構成される多脚歩行ロボットに対して、エネルギー消費を最小化する脚間の位相差をベクトル量子化によりオンライン学習する手法を提案している。一方、筆者らもこれまでに、歩行のための消費エネルギーを機構的に低減する歩行機械の設計論として、「GDA (Gravitationally Decoupled Actuation)」[4][5]の考え方や、移動体のエネルギー効率を壁面や水平面を問わず統一的に評価する指標として、移動仕事率 (Specific resistance) ϵ [6]

$$\epsilon \equiv \frac{(\text{移動に要するエネルギー})}{(\text{移動体重量}) \times (\text{移動距離})} \quad (1)$$

を提案してきた。移動仕事率は、その値が小さいほど移動効率が高く、移動に要するエネルギーがその移動前後でのポテンシャルエネルギーの差に等しいときに最も小さくなる。すなわち、水平面を移動する場合には最高値は0であり、垂直面の場合には

原稿受付 2000年4月5日

*¹東京大学生産技術研究所

*²東京工業大学

*¹The University of Tokyo, Institute of Industrial Science

*²Tokyo Institute of Technology

1 になる。

さて、これまでに提案した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。しかし ZMP の位置は前後方向、あるいは上下方向への運動によっても制御可能であり、これらの運動を複合することにより、左右方向への運動のみで ZMP の位置を制御する従来の左右揺動歩容に比べてエネルギー効率を向上できる可能性がある。

そこで本論文では、胴体を左右方向だけでなく前後方向あるいは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」を提案する。またこの歩容によりエネルギー効率、すなわち移動仕事率が向上することを、理論解析および汎用運動解析ソフトウェア ADAMS を用いて検証する。

2. 3D 揺動歩容

2.1 従来の左右揺動歩容

まず、従来の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、床面上の ZMP の位置 $(x_z, y_z, 0)$ は、

$$\begin{pmatrix} x_z \\ y_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_g \\ y_g \end{pmatrix} - A \begin{pmatrix} \ddot{x}_g \\ \ddot{y}_g \end{pmatrix} \quad (2)$$

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

$$\cos \theta x + \sin \theta y = d \quad (3)$$

とすると、この上に ZMP が存在するためには、重心位置は

$$\cos \theta (x_g - A\ddot{x}_g) + \sin \theta (y_g - A\ddot{y}_g) = d \quad (4)$$

を満たさなくてはならない。

ここで進行方向を x 軸方向とし、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。すなわち

$$x_g = x_0 + vt + \frac{1}{2}at^2 \quad (5)$$

として、これを式 (4) に代入すると、

$$\cos \theta \left(x_0 - Aa + vt + \frac{1}{2}at^2 \right) + \sin \theta (y_g - A\ddot{y}_g) = d \quad (6)$$

となり、この非斉次微分方程式の解 y_g は、

$$y_g - A\ddot{y}_g = 0 \quad (7)$$

の解、すなわち、

$$y_g = C_1^y e^{\frac{t}{\sqrt{A}}} + C_2^y e^{-\frac{t}{\sqrt{A}}} \quad (8)$$

と、式 (6) を満たす特殊解の和で与えられる。そこで特殊解の一般形を時間 t の多項式とし、解軌道が以下の式で与えられると仮定する。

$$y_g = C_1^y e^{\frac{t}{\sqrt{A}}} + C_2^y e^{-\frac{t}{\sqrt{A}}} + a_2^y t^2 + a_1^y t + a_0^y \quad (9)$$

軌道の連続性 ($\dot{y}_{g,t=0} = \dot{y}_{g,t=\frac{T}{2}} = 0$, $y_{g,t=0} = -y_{g,t=\frac{T}{2}}$) を境界条件とし、式 (6) に代入して整理すると

$$C_1^y = \sqrt{A} \cot \theta \frac{T \frac{a}{2} + (1 - e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}})v}{(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}})} \quad (10)$$

$$C_2^y = \sqrt{A} \cot \theta \frac{T \frac{a}{2} + (1 - e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}})v}{(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}})} \quad (11)$$

$$a_2^y = -a \cot \theta \quad (12)$$

$$a_1^y = -v \cot \theta \quad (13)$$

$$a_0^y = -x_0 \cot \theta + d \csc \theta \quad (14)$$

$$x_0 = \frac{d}{\cos \theta} + \frac{1}{4} \left(\frac{\sqrt{AT}(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} + e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}} + 2)}{(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}})} - \frac{T^2}{4} \right) a - \frac{T}{4} v \quad (15)$$

が得られる。ただし、 T は歩行周期である。これは胴体を左右方向に揺動させ、ZMP を常に支持脚対角線上に保つ重心軌道であり、この軌道を実現する歩容を「左右揺動歩容」と呼ぶ [2]。

2.2 前後方向への拡張

上述した従来の左右揺動歩容を、前後方向への揺動も含む形式へ拡張する。すなわち、式 (4) を x , y 方向の二つの非斉次方程式に分解し、前節と同様にそれぞれの解軌道を式 (9) および次式で与えられると仮定する。

$$x_g = C_1^x e^{\frac{t}{\sqrt{A}}} + C_2^x e^{-\frac{t}{\sqrt{A}}} + a_2^x t^2 + a_1^x t + a_0^x \quad (16)$$

軌道の連続性を境界条件として、式 (6) に代入して整理すると、 a_2^x , a_1^x をパラメータとする以下の式が得られる。

$$C_1^x = -\frac{(T^2 + 4\sqrt{AT})a_2^x + 2Ta_1^x - 2L}{8(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - 1)} \quad (17)$$

$$C_2^x = -\frac{(T^2 - 4\sqrt{AT})a_2^x + 2Ta_1^x - 2L}{8(e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}} - 1)} \quad (18)$$

$$C_1^y = \sqrt{A} \cot \theta \frac{Ta_2^x + (1 - e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}})a_1^x}{(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}})} \quad (19)$$

$$C_2^y = \sqrt{A} \cot \theta \frac{Ta_2^x + (1 - e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}})a_1^x}{(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}})} \quad (20)$$

$$a_2^y = -a_2^x \cot \theta \quad (21)$$

$$a_1^y = -a_1^x \cot \theta \quad (22)$$

$$a_0^y = -a_0^x \cot \theta + d \csc \theta \quad (23)$$

$$a_0^x = \frac{d}{\cos \theta} + \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{AT}(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} + e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}} + 2)}{(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}})} - \frac{T^2}{4} \right) a_2^x - \frac{T}{4} a_1^x \quad (24)$$

ただし L は 1 周期当たりの移動距離である。

2.3 上下方向への拡張

さらに上式を上下方向への揺動も含む形式へ拡張する。 $A = \frac{z_g}{g + \ddot{z}_g}$ を考慮し、上下方向への一般解が次式で与えられると仮定する。

$$z_g = C_1^z e^{\frac{t}{\sqrt{A}}} + C_2^z e^{-\frac{t}{\sqrt{A}}} + A g \quad (25)$$

ただしここで A は任意の定数である。軌道位置の連続性を境界条件として整理すると、 A をパラメータとする以下の式が得られる。

$$C_1^z = -\frac{Ag - H}{1 + e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}}} \quad (26)$$

$$C_2^z = -\frac{(Ag - H)e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}}}{1 + e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}}} \quad (27)$$

ここで H は $t = 0, \frac{T}{2}$ での高さである。ただし、式 (25) で与えられる解軌道は、 $t = 0$ および $t = \frac{T}{2}$ で以下の速度不連続を生じる。

$$\dot{z} = \pm \frac{T(Ag - H)}{\sqrt{A}} \frac{1 - e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}}}{1 + e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}}} \quad (28)$$

これら従来の左右揺動歩容を前後、上下方向へ拡張した歩容を「3D 揺動歩容」と呼ぶことにする。上述のように 3D 揺動歩容では、前後左右方向へ揺動を行う場合には、ZMP を支持脚対角線上に保つすべての軌道は二つのパラメータ a_2^x, a_1^x で記述でき、また上下方向へも揺動を行う場合には、すべての軌道は三つのパラメータ a_2^x, a_1^x および A で記述できる。

2.4 3D 揺動歩容の移動効率

歩行機械の消費エネルギーは、胴体や脚の質量、自由度配置、胴体や脚の軌道、あるいは各アクチュエータで発生する負のパワーなど、多くの要因によって決定される量であるが [10] [11]、本節ではひとまず、ある胴体軌道を実現するために胴体に加えなければならない動的な外力の総和、すなわち軌道全体の加速度二乗和

$$\rho = \int_0^T (\ddot{x}_g^2 + \ddot{y}_g^2 + \ddot{z}_g^2) dt \quad (29)$$

を最小にする軌道について考えることにする。ただし、ここでは簡単のため定常歩行 ($a_2^x = 0$) について考える。

まず従来の左右揺動歩容について検討する。式 (29) に $a_1^x = \frac{L}{T}$ を代入すると、軌道全体の加速度二乗和 ρ は、

$$\rho = \frac{L^2(\sqrt{A}(-1 + e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}}) - e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}}) \cot^2 \theta}{A(1 + e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}})^2 T^2} \quad (30)$$

で与えられる。

次に左右、前後方向へ揺動する 3D 揺動歩容について考える。設計可能なパラメータは a_1^x であるので、軌道全体の加速度二乗和を最小にする a_1^x は、

$$\frac{\partial \rho}{\partial a_1^x} = 0 \quad (31)$$

を解くことにより、以下のように解析的に求められる。

$$a_1^x = \frac{(1 + e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}})^2 LT}{(1 + e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}})^2 T^2 + 16A(-1 + e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}})^2 \cot^2 \theta} \quad (32)$$

またこのときの加速度二乗和の最小値 ρ は、

$$\rho = \frac{L^2(\sqrt{A}(-1 + e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}}) - e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}}) \cot^2 \theta}{A((1 + e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}})^2 T^2 + 16A(-1 + e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}})^2 \cot^2 \theta)} \quad (33)$$

である。これと式 (30) を比較すると、 $T = 0, \theta = \frac{\pi}{2}$ あるいは

Table 1 Minimum of squared acceleration

	lateral only	lateral and longitudinal	lateral, longitudinal, and vertical
ρ	0.623	0.334	0.331
(ρ_x)	0	0.155	0.153
(ρ_y)	0.623	0.179	0.175
(ρ_z)	0	0	0.003
a_1^x	0.2	0.107	0.107
A	0.0204	0.0204	0.0207

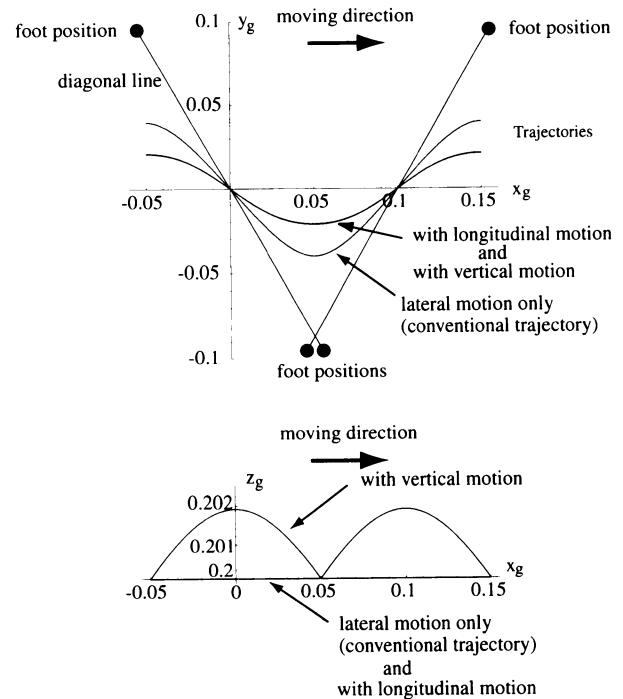


Fig. 1 Trajectories of robot body

は $A = H/g = 0, \infty$ 以外であれば、3D 揺動歩容の加速度二乗和は従来の左右揺動歩容よりも小さくなる事が分かる。

一方、上下方向への揺動も含む 3D 揺動歩容では、設計可能なパラメータは a_1^x と A であるが、この場合には加速度二乗和を最小値にする解を解析的に導くことができない。そこで以降のシミュレーションでは、初期値として左右、前後方向への揺動軌道で求められた最適値を用い、Newton 法を用いた繰り返し計算により、加速度二乗和の最小値を求めることにする。

$T = 1$ [s], $H = 0.2$ [m], $L = 0.2$ [m], $\theta = 30$ [deg], $d = 0$ の場合に対し、式 (29) で与えられる歩行半周期分の加速度二乗和の計算結果を **Table 1** に示す。また **Fig. 1** にそれぞれ求められた胴体軌道を示す。ただし Fig. 1 上図は床面 (xy 平面) に投影した軌道、下図は横方向から xz 平面へ投影した軌道であり、縦軸は 20 倍に拡大している。

このように左右方向へだけでなく、前後あるいは上下方向へ胴体を揺動させることにより、胴体の加速度二乗和を小さくでき、これは歩行に必要な消費エネルギーも小さくできる可能性があることを示している。しかし上下方向の揺動も含んだ軌道では、前述したように Fig. 1 下段において、 $t = 0$ および $t = T/2$ で

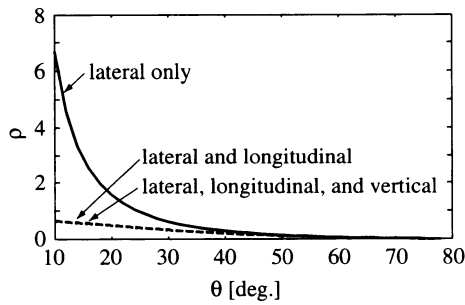


Fig. 2 Effect of angle between supporting feet ($T = 1$ [s], $H = 0.2$ [m], $L = 0.2$ [m], $d = 0$)

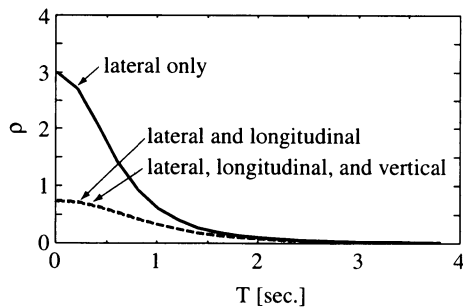


Fig. 3 Effect of walking cycle ($H = 0.2$ [m], $L = 0.2$ [m], $\theta = 30$ [deg.], $d = 0$)

速度不連続が生じている。また Table 1 で明らかなように、上下方向への揺動は、前後方向への揺動に比べて加速度二乗和への影響が小さい。これらのことから、全周期を通じて加速度二乗和を最小化する軌道としては、左右、前後方向への揺動歩容が最も適当であると考えられる。

また Fig. 2 に、支持脚対角線の y 軸となす角度 θ を変化させたときの各歩容の加速度二乗和の最小値を示す。これより、 θ が小さく、すなわち支持脚対角線が進行方向に垂直に近くなるほど、3D 揺動歩容の効果が高くなることが分かる。また Fig. 3 に歩行周期 T を変化させたときの加速度二乗和の最小値を示す。これより歩行周期が短く、移動速度が高速になるほど、3D 揺動歩容の効果が高くなることが分かる。

2.5 汎用運動解析ソフトウェア ADAMS による検討

前節で示した加速度二乗和を最小化する 3D 揺動歩容のエネルギー効率を、実際の歩行機械の自由度配置を反映したより実際の計算機モデルで検証するために、汎用運動解析ソフトウェア ADAMS を利用して計算機シミュレーションを行った。ADAMS とは、運動拘束条件やばね、ダンパ特性、あるいは重力などの境界条件の与えられた剛体列に対し、静的あるいは動的な力のバランス式を反復計算により解く汎用シミュレータである。このため、操作者はシミュレーション対象の厳密な数式モデルを明示的に与える必要はない。

4 足歩行機械の計算機モデルの自由度配置、および質量等の諸元は、本研究室でこれまでに開発した TITAN-VIII [12] と同一である。また各関節はトルク制御され、さらに脚先と地面との拘束条件はばね、ダンパ系で定義し、それらの係数は内力に

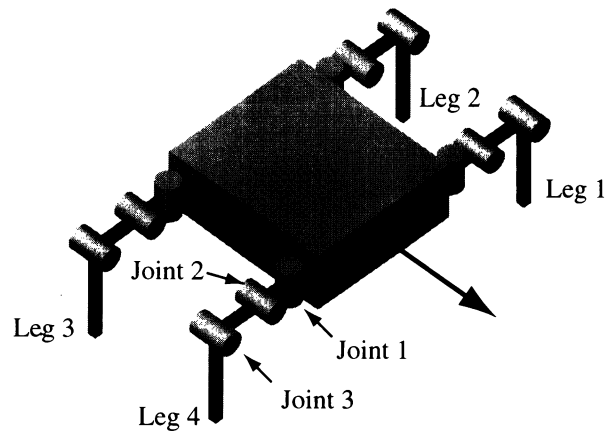


Fig. 4 Simulation model for ADAMS

Table 2 Comparison of energy consumption

	lateral only	lateral and longitudinal	lateral, longitudinal, and vertical	straight
Energy cons. [J]	142.0	114.6	108.6	96.8
Specific res.	2.35	1.90	1.80	1.60

よる振動成分が支配的にならないように物理的意味を考慮しながら決定した。Fig. 4 に構築した計算機モデル、Fig. 5 に計算結果の一例を示す。

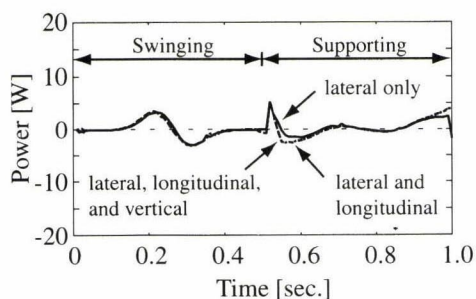
また歩行機械を周期 1 [s]、移動速度 0.2 [m/s]、デューティ比 0.5 で移動させたときの 1 周期当たりの全関節の消費パワーの総和および移動仕事率を Table 2 に示す。それぞれ、従来の左右揺動歩容、前後、左右へ、および前後、左右、上下への 3D 揺動歩容、および左右揺動歩容を行わない場合であり、3D 揺動歩容は前節で求められた胴体の加速度二乗和を最小にする軌道である。ただし、左右揺動歩容を行わない場合は、胴体姿勢を平行に保つことができず、遊脚が計画外に接地する。これより、加速度二乗和を最小化する 3D 揺動歩容により、同一の歩行周期、移動速度においても従来の左右揺動歩容に比べて移動仕事率が向上することが分かる。また、このときの脚 2 の各関節の消費パワーを Fig. 6 に示す。これより、特に左右揺動運動を主として生成する関節 3 で、消費パワーが低く抑えられていることが分かる。

ところで前述したように、上下方向の揺動を含む場合には、半周期ごとに速度不連続が生じているが、Fig. 6 ではその影響がほとんど見られない。これは、上下方向の速度不連続が ± 0.0006 [m/s] であり、前後方向の平均速度 0.2 [m/s] に比べても十分に小さいこと、およびトルク制御されている各関節によって速度不連続の影響が吸収されているためであると考えられる。

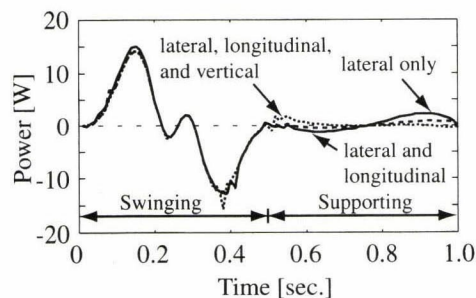
次に Fig. 7 に示すような前後脚の間隔の異なる 3 種類のモデルに対し、周期 1 [s]、移動速度 0.2 [m/s]、デューティ比 0.5 で歩行させたときの、従来の左右揺動歩容と全方向への 3D 揺動歩容での消費パワーを比較した。ただし、Fig. 7 (b) は TITAN-VIII と同一寸法であり、Fig. 7 (a), (c) はそれぞれ前後脚の間隔を $\frac{1}{2}$ 倍、2 倍にしたものである。Table 3 に移動仕事率および 1 周期当たりの消費パワーの総和を示す。これより前後脚の間隔が



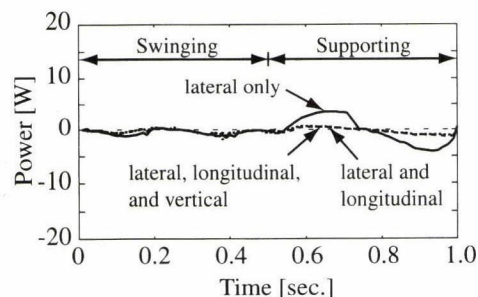
Fig. 5 Simulation view of ADAMS



(a) Joint 1



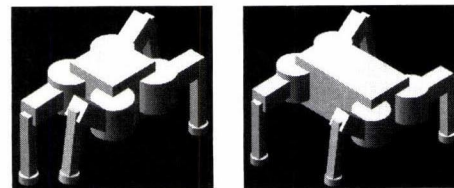
(b) Joint 2



(c) Joint 3

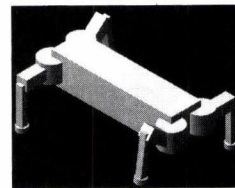
Fig. 6 Power consumption of each joints of leg 2

狭くなると、支持脚対角線の進行方向に対する角度が大きくなり、3D 揺動歩容の効果が高くなることが確認できた。



(a) Short body length

(b) Middle body length



(c) Long body length

Fig. 7 Three simulation models with different body length

Table 3 Specific resistance for each body length

	(a) lateral only	(b) 3D sway	(b)/(a)
Short	3.90 (236.0[J])	1.90 (114.5[J])	48.7 [%]
Middle	2.35 (142.0[J])	1.80 (108.6[J])	76.6 [%]
Long	1.81 (109.4[J])	1.75 (105.4[J])	96.7 [%]

3. お わ り に

本論文では、これまでに我々が提案した4足歩行機械のための左右揺動歩容を、胴体の前後方向あるいは上下方向への揺動も含む形式へ拡張し、より少ないエネルギー消費で効率よくZMPを支持脚対角線上を移動させることができる「3D 揺動歩容」を提案した。またこの歩容により4足歩行機械のトロット歩容時の移動仕事率が向上することを、理論解析および汎用運動解析ソフトウェアADAMSを用いて検証した。この歩容は特に移動速度が高速になるほど効果が高く、また同じ移動速度でも左右揺動歩容に比べて左右方向への揺動量が少なく済むため、胴体揺動の可動範囲に制限がある場合には特に有効である。

さて、前述のように歩行機械の消費エネルギーは多くの要因が影響し合うため、2.4節で示した軌道全体の加速度二乗和を最小にする軌道が歩行時のエネルギー消費を最小にする軌道と一致するとは限らない。例えばFig. 4の歩行機械で脚を直線上に伸ばしたとき、その方向の力を支える関節トルクは非常に小さくて済み、この状態を連続的に利用すれば少ないエネルギー消費で歩行が可能になる。本論文では、まず最適な本体軌道導出の最初の手がかりとして、運動学的観点から加速度二乗和最小軌道を提案したが、今後はこのような歩行ロボットのエネルギー特性を考慮した動力的な考察が重要不可欠であると考えられる。しかし例えば提案した3D 揺動歩容では、すべての胴体軌道は二つあるいは三つのパラメータにより記述できるため、ADAMS等を用いた繰り返し計算により歩行機械の自由度構成を反映した消費エネルギー最小の軌道を求めることも可能であると考えられ、これについては今後詳細に検討する予定である。

また、本論文で提案した3D 揺動歩容は、歩行面が水平な平面であれば安定な動歩行を実現できるが、未知の凹凸や傾斜が

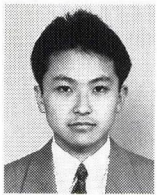
存在する場合, 3D 揺動歩容による歩容計画だけでは安定な動歩行は実現困難である. さらに 3D 揺動歩容や左右揺動歩容では, 軌道の導出において歩行機械を質点と仮定しているため, 例えば左右揺動歩容を用いた拡張トロット歩容では, 遊脚の復帰動作の動的効果により胴体姿勢が安定せず振動的になる場合がある [3].

そこで搭載した姿勢センサやジャイロセンサ等を用いて, 適応的に動歩行時の姿勢修正を行うフィードバック制御系は必要不可欠であり, これと提案した 3D 揺動歩容などのオフライン歩容計画を組み合わせることで, 未知の不整地環境でも安定な動歩行が実現できる可能性がある. この問題に対しては別報 [16] で詳細に検討する.

謝 辞 この研究は文部省科学研究費 (COE 形成基礎研究費スーパーメカノシステム) を使用して行われました.

参 考 文 献

- [1] 広瀬, 米田: “実用的 4 足歩行機械の開発に向けて”, 日本ロボット学会誌, vol.11, no.3, pp.360-365, 1993.
- [2] 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.267-275, 1991.
- [3] 米田, 飯山, 広瀬: “4 足歩行機械の間歇トロット歩容—全方向歩行の動的制御—”, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.6, pp.881-886, 1996.
- [4] 広瀬, 梅谷: “歩行機械の脚形態と移動特性”, バイオメカニズム学会編, バイオメカニズム 5 (動物の機構と制御), pp.242-250, 1980.
- [5] 有川, 広瀬: “3D 荒地用歩行ロボットの研究 (GDA と干渉駆動に基づく最適化歩行)”, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.5, pp.720-726, 1995.
- [6] 広瀬, 梅谷: “歩行機械のエネルギー効率に関する基礎的研究”, 計測自動制御学会論文集, pp.928-933, 1979.
- [7] 米田, 飯山, 広瀬: “4 足歩行機械のスカイフックサスペンション制御”, 日本ロボット学会誌, vol.12, no.7, pp.1066-1071, 1994.
- [8] 木村, 下山, 三浦: “四足動歩行ロボットの力学的解析”, 日本ロボット学会誌, vol.6, no.5, pp.367-378, 1988.
- [9] 小田島, 湯浅, 羅, 伊藤: “多脚歩行ロボットの消費エネルギーに基づいた創発的歩容生成”, 日本ロボット学会誌, vol.17, no.8, pp.1149-1157, 1999.
- [10] D.W. Marhefka and D.E. Orin: “Gait Planning for Energy Efficiency in Walking Machines,” Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.474-480, 1997.
- [11] K. Arikawa and S. Hirose: “Study of Walking Robot for 3 Dimensional Terrain,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems '95, pp.703-708, 1995.
- [12] 広瀬, 有川: “研究用プラットフォームとしての普及型歩行ロボット TITAN-VIII の開発”, 日本ロボット学会誌, vol.17, no.8, pp.1191-1197, 1999.
- [13] 高松, 倉爪, 広瀬: “視覚支援歩行ロボットの研究—第 1 報: 歩行時画像の安定化と姿勢制御—”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 講演論文集, 1P1-42-059, 1999.
- [14] 倉爪, 広瀬: “視覚支援歩行ロボットの研究—第 2 報: 本体揺動を利用した奥行き知覚—”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 講演論文集, 1P1-42-061, 1999.
- [15] 倉爪, 広瀬: “視覚支援歩行ロボットの研究—第 3 報: 高速画像安定化機構の開発—”, 第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.135-136, 1999.
- [16] 倉爪, 米田, 広瀬: “4 足歩行機械の動歩行時の姿勢安定化制御”, 日本ロボット学会誌, vol.19, no.3, pp.380-386, 2001.



倉爪 亮 (Ryo Kurazume)

1967 年 2 月 4 日生. 1991 年東京工業大学機械物理工学専攻修士課程修了. 同年 (株) 富士通研究所入社, 1995 年東京工業大学機械宇宙学科助手, 2000 年スタンフォード大客員研究員, 同年東京大学生産技術研究所博士研究員, 現在に至る. 群ロボット, 歩行機械, レーザ計測の研究に従事. 博士 (工学). (日本ロボット学会正会員)



米田 完 (Kan Yoneda)

1961 年 10 月 16 日生. 1985 年東京工業大学理学部物理学科卒業, 1987 年同大学大学院修士課程修了, 1989 年同大学大学院博士後期課程機械物理工学専攻中退, 同年同大学機械物理工学科助手, 1994 年同大学機械宇宙学科助教授, 現在に至る. 歩行ロボット, 不整地移動車両の研究を行う. 博士 (工学). (日本ロボット学会正会員)



広瀬茂男 (Shigeo Hirose)

1947 年 12 月 6 日生. 1976 年東京工業大学制御工学専攻博士課程修了. 同年, 同大学機械物理工学科助手, 1979 年同大学助教授, 1992 年同大学教授, 現在に至る. ロボットの機構, センサ, 制御の研究に従事. 工学博士. (日本ロボット学会正会員)