

エネルギー効率の高い2足歩行機械の3D揺動歩容

The 3D sway compensation trajectory with high energy efficiency for a biped robot

○ 森 敬充 (九州大) 倉爪 亮 (九州大) 長谷川 勉 (九州大)

Takamitsu MORI [†]Kyushu University, 6-10-1, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, Japan

Ryo KURAZUME[†] and Tsutomu HASEGAWA[†]

To dynamically stable walking for a biped robot, “Sway compensation trajectory” and “3D sway compensation trajectory” have been proposed. These method utilizes a lateral, longitudinal, and vertical motion of a robot body to keep zero moment point (ZMP) on a diagonal line between support legs. In this paper, we propose the new 3D sway compensation trajectory with high energy efficiency for a biped robot. This method extends the conventional “3D sway compensation trajectory” to be able to design various trajectories so that high energy efficiency is achieved.

Key Words: a biped robot, the 3D sway compensation trajectory, high energy efficiency

1 はじめに

脚型移動ロボットは、車輪型移動ロボットと比較して高い対地適応性を有するものの、移動効率が低い、転倒しやすいなどの問題がある。特に本研究の対象である2足歩行機械は、4脚、6脚などの多脚移動機械に比べ安定性が低く、基本的に制御により完全転倒を回避しなくてはならない。そこで、2足歩行機械の安定歩行を実現するために、我々はこれまでに左右揺動歩容や3D揺動歩容を提案してきた[1]。これらは、Zero Moment Point(ZMP)を常に左右の接地脚の対角線上に滑らかに移動させるために、ロボット本体を左右に、あるいは前後上下方向に揺動させる手法である。

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。特にバッテリー等のエネルギー源を搭載した移動ロボットにとって、移動効率の向上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。

そこで本研究では、従来の3D揺動歩容を拡張し、ロボット本体の揺動方法を工夫することでエネルギー効率を向上した、新しい3D揺動歩容を提案する。

2 2足歩行機械の3D揺動歩容

2足歩行機械の3D揺動歩容では、まずロボットを簡単な単質点モデルで近似し、足裏間を移動するZMP軌道とそれを実現する重心軌道を指数関数と2次関数の和として決定する。次に実際のZMP軌道が計画された目標軌道と一致するように、重心軌道をより正確な多質点モデルを用いた収束計算により補正する。

本研究では従来2次関数で定義された単質点モデルで軌道をより適切なものに変更することでエネルギー効率の向上を図る。以下に従来の単質点モデルの軌道の導出方法を示す。

全体を位置 (x_g, y_g, z_g) に置かれた質点と考え、床面は平面と仮定する。高さ z_g が一定であるとすると、ZMP $(x_{zmp}, y_{zmp}, 0)$ が両脚の対角線 $(\cos\theta x + \sin\theta y = d)$ 上に存在するためには、

$$\cos\theta(x_g - A\ddot{x}_g) + \sin\theta(y_g - A\ddot{y}_g) = d, A = \frac{z_g}{g} \quad (1)$$

を満たさなければならない。

ここで、ロボットの進行方向を x 軸方向、それに垂直な方向を y 軸方向とし、時刻 t での重心の位置を以下の式で定義する。

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

$$y_g = C_1^y e^{\frac{t}{\sqrt{A}}} + C_2^y e^{-\frac{t}{\sqrt{A}}} + a_2^y t^2 + a_1^y t + a_0^y \quad (3)$$

これを Eq.(1) に代入すると、

$$\begin{aligned} &\cos\theta(a_0^x - 2Aa_2^x + a_1^x t + a_2^x t^2) \\ &+ \sin\theta(a_0^y - 2Aa_2^y + a_1^y t + a_2^y t^2) = d \end{aligned} \quad (4)$$

となり、これを常に満たすためには、

$$\cos\theta(a_0^x - 2Aa_2^x) + \sin\theta(a_0^y - 2Aa_2^y) = d \quad (5)$$

$$\cos\theta a_1^x + \sin\theta a_1^y = d \quad (6)$$

$$\cos\theta a_2^x + \sin\theta a_2^y = d \quad (7)$$

すなわち、

$$a_0^x = \frac{d - \sin\theta a_0^y}{\cos\theta} \quad (8)$$

$$a_1^x = -\tan\theta a_1^y \quad (9)$$

$$a_2^x = -\tan\theta a_2^y \quad (10)$$

でなければならない。

次に軌道の連続性からその他のパラメータを決定する。まず、歩行周期を T とし、 y 軸方向の速度の連続性 $\dot{y}_{g,t=0} = \dot{y}_{g,t=\frac{T}{2}} = 0$ 、および ZMP の振幅を D とすると、 $y_{zmp,t=0} = -y_{zmp,t=\frac{T}{2}} = D$ から、

$$C_1^y = \frac{8D(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - 1) - a_2^y(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} + 1)T^2}{2(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - 1)T} \sqrt{A} \quad (11)$$

$$C_2^y = \frac{8D(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - 1) + a_2^y(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} + 1)T^2}{2(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - 1)T} \sqrt{A} e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} \quad (12)$$

$$a_0^y = 2Aa_2^y + D \quad (13)$$

$$a_1^y = -\frac{4D}{T} - \frac{a_2^y T}{2} \quad (14)$$

が得られる。

さらに, x 軸方向の $t = 0 \sim \frac{T}{2}$ での速度を v , $t = 0 \sim \frac{T}{2}$ での移動距離を $\frac{L}{2}$ とすると, $x_{g,t=\frac{T}{2}} - x_{g,t=0} = \frac{L}{2}$, $\dot{x}_{g,t=0} = v$, $\ddot{x}_{g,t=0} = \ddot{x}_{g,t=\frac{T}{2}}$ から,

$$C_1^x = \frac{2a_2^y \tan \theta}{4(e^{2\sqrt{A}} - 1)} \sqrt{AT} \quad (15)$$

$$C_2^x = \frac{2a_2^y \tan \theta}{4(e^{2\sqrt{A}} - 1)} \sqrt{AT} e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} \quad (16)$$

$$T = \frac{4D \tan \theta}{v} \quad (17)$$

$$L = 4D \tan \theta \quad (18)$$

が得られる. Eq.(8) ~ (18) より, 軌道を設計できるパラメータは a_2^y のみであることがわかる.

3 3D 揺動歩容の拡張

これまでロボットが x 軸方向に定常歩行している場合, 重心は等速運動と仮定し,

$$a_2^y = 0 \quad (19)$$

としていた. そこで, このパラメータ a_2^y の値を時間関数に拡張することによって, 従来よりもエネルギー効率の高い重心軌道を設計する.

しかし, a_2^y を時間関数とすると, Eq.(8) ~ (18) は a_2^y を時不変として導出したものであるから矛盾が生じる. 実際, a_2^y を時間関数として, ZMP が支持脚対角線上に常に存在しているか, また重心軌道の連続性が保たれているかを調べたところ, 前者に関しては Eq.(1) を満たしていたが, 後者は,

$$x_{g,t=\frac{T}{2}} - x_{g,t=0} = \frac{L}{2} + (a_{2,t=\frac{T}{2}}^y - a_{2,t=0}^y)(4(e^{2\sqrt{A}} - 1)A - (e^{2\sqrt{A}} + 1)\sqrt{AT}) \tan \theta \quad (20)$$

と x 軸方向の重心軌道の連続性が保証されていないことがわかった. そこで, $x_{g,t=\frac{T}{2}} - x_{g,t=0} = \frac{L}{2}$ を常に満たすように, パラメータ C_1^x, C_2^x を再導出する.

a_2^y, C_1^x, C_2^x を未定義の時間関数とすると, Eq.(8) ~ (14),(17),(18) より,

$$x_{g,t=\frac{T}{2}} - x_{g,t=0} = \frac{L}{2} + C_1^x e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} + C_2^x e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}} - 2A \tan \theta a_{2,t=\frac{T}{2}}^y - C_1^x e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - C_2^x e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}} + 2A \tan \theta a_{2,t=0}^y \quad (21)$$

となり, これは Eq.(10) より,

$$x_{g,t=\frac{T}{2}} - x_{g,t=0} = \frac{L}{2} + C_1^x e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} + C_2^x e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}} + 2A a_{2,t=\frac{T}{2}}^x - C_1^x e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - C_2^x e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}} - 2A a_{2,t=0}^x \quad (22)$$

となる.

ここで, a_2^x 等の全パラメータを定数と仮定したときの x 軸方向の重心加速度は,

$$\ddot{x}_g = \frac{1}{A} C_1^x e^{-\frac{t}{\sqrt{A}}} + \frac{1}{A} C_2^x e^{-\frac{t}{\sqrt{A}}} + 2a_2^x \quad (23)$$

となり, 従来の $\ddot{x}_{g,t=0} = \ddot{x}_{g,t=\frac{T}{2}}$ という境界条件であれば

$$C_1^x e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} + C_2^x e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}} + 2A a_{2,t=0}^x = C_1^x e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} + C_2^x e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}} + 2A a_{2,t=\frac{T}{2}}^x \quad (24)$$

となるため, Eq.(22),(24) より, 式 (21) は a_2^y に依らず常に $\frac{L}{2}$ となる. しかし, これらはパラメータを定数とし,

$C_1^x e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} + C_2^x e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}} + 2A a_{2,t=0}^x = C_1^x e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} + C_2^x e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}} + 2A a_{2,t=\frac{T}{2}}^x$ と仮定した上での議論であり, 時間関数とした場合は式 (24) が成り立つ保証はない. 定数と時間関数とで同じ議論を行うためには, 上記の仮定を用いない境界条件を設定する必要がある.

そこで, 次のような条件を考える.

$$C_1^x e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} + C_2^x e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}} + 2A a_{2,t=0}^x = 0 \quad (25)$$

$$C_1^x e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} + C_2^x e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}} + 2A a_{2,t=\frac{T}{2}}^x = 0 \quad (26)$$

これは,

$$\ddot{x}_{g,t=0} = 0 \quad (27)$$

$$\ddot{x}_{g,t=\frac{T}{2}} = 0 \quad (28)$$

の条件と同一である.

Eq.(27),(28) は a_2^x 等のパラメータが時不変であるという仮定を用いないため, a_2^y が時間関数でも Eq.(21) は常に $\frac{L}{2}$ となる. そこで境界条件を従来の $\ddot{x}_{g,t=0} = \ddot{x}_{g,t=\frac{T}{2}}$ から式 (27),(28) に変更して, 新たに C_1^x, C_2^x を導出したところ次式を得た.

$$C_1^x = \frac{2A a_2^y \tan \theta}{e^{2\sqrt{A}} + 1} \quad (29)$$

$$C_2^x = \frac{2A a_2^y \tan \theta}{e^{2\sqrt{A}} + 1} e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} \quad (30)$$

a_2^y に 0 でない時間関数を設定したときの, Eq.(15),(16) と Eq.(29),(30) の重心 (胴体) 軌道の違いを Fig.(1), (2) に示す. 従来の Eq.(15),(16) では x 軸方向の 1 周期の移動距離が足りず不連続になっているが, Eq.(29),(30) では連続性が保たれている.

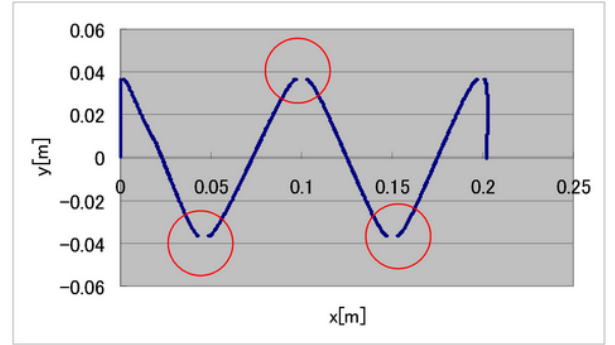


Fig.1: Body trajectory obtained by Eq.(15),(16)

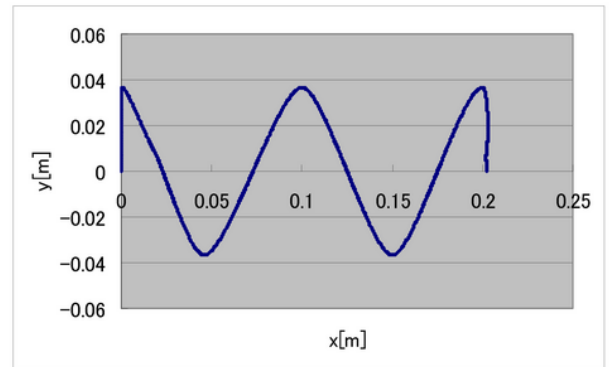


Fig.2: Body trajectory obtained by Eq.(29),(30)

また, C_1^x, C_2^x を Eq.(29),(30) に変更し, a_2^y を時間関数としても Eq.(1) が保たれていることを確認した.

以上より, Eq.(29),(30) を導入することで, 今後はパラメータを時間関数としても扱え, より多様な重心軌道を設計することが可能となる.

4 エネルギー効率の高い重心軌道の設計

提案した新たな3D揺動歩容を用いて、 a_2^y に適切な時間関数を設定してエネルギー効率の高い重心軌道の設計を試みた。 a_2^y はy軸方向の加速度に関するパラメータなので、ロボットが直進するためには1周期の総和が0でなければならない。そこで、 a_2^y の候補として、

$$a_2^y = \sin \omega t \quad (31)$$

$$a_2^y = \cos \omega t \quad (32)$$

$$a_2^y = -\sin \omega t \quad (33)$$

$$a_2^y = -\cos \omega t \quad (34)$$

の4種類の周期関数を考え、それぞれの軌道に対しコンピュータシミュレーションを行い消費エネルギーを求めた。ただし、 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ である。Eq.(31)~(34)により得られる軌道でのエネルギー効率が従来 (Eq.(19)) の軌道に比べ、どれだけ向上しているかを Table.(1) に示す。

Table.1: Improvement of energy efficiency

	Eq.(31)	Eq.(32)	Eq.(33)	Eq.(34)
Improvement rate[%]	3.51	-15.5	-7.83	9.06

シミュレーションの結果、Eq.(34)の軌道が最もエネルギー効率が高いことがわかった。そこで、この軌道を基準にしてさらにエネルギー効率の高い軌道を試行錯誤により検討した結果、

$$a_2^y = -\sum_{i=0}^n \frac{1}{\alpha^i} \cos((2i+1)\omega t) \quad (35)$$

とすると、エネルギー効率が従来手法に比べ14.2%向上することがわかった。

また、従来手法とEq.(35)の重心軌道を Fig.(3) に示す。Eq.(35)の方が左右の重心移動距離が小さくなっていることがわかる。

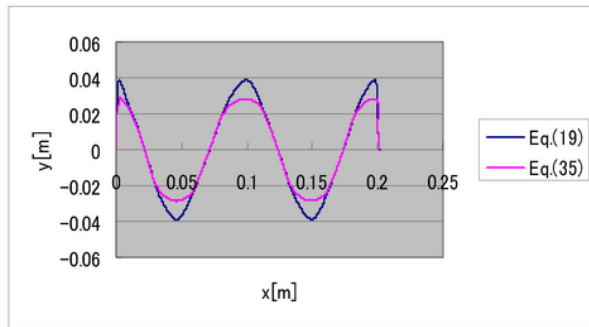


Fig.3: COG trajectories

5 実験

2足歩行ヒューマノイドロボット HOAP-1 を用いて、導出された軌道での歩行実験を行った。その結果、Eq.(31)、(35)の軌道では歩行可能であったが、Eq.(33)の軌道では転倒した。

次に従来手法 (Eq.(19)) と Eq.(35) の軌道での歩行を比較した。それぞれの実機での歩行の様子を Fig.(4)、(5) に示す。シミュレーションと同様、Eq.(35)のy軸方向の重心(胴体)の移動距離が小さくなっていることがわかる。

さらに、実際にエネルギー効率が高くなっていることを確認するために、従来手法 (Eq.(19)) と Eq.(35) の軌道

での歩行時の消費電力を測定した。実験ではロボットの歩行は5歩とし、それぞれ10回ずつ測定して消費エネルギーの平均値を求めた。コンピュータシミュレーションで歩行が定常状態となっていた3歩目の消費エネルギーの平均値を Table.(2) に示す。

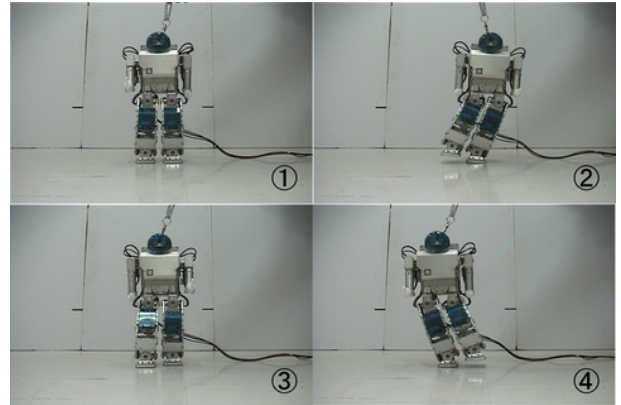


Fig.4: An example of walking experiments using trajectory given by Eq.(19)

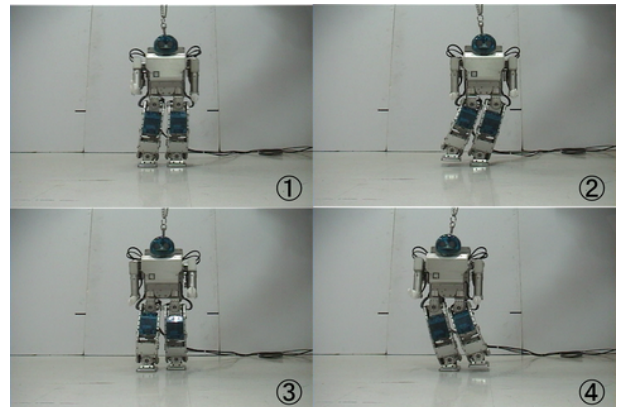


Fig.5: An example of walking experiments using trajectory given by Eq.(35)

Table.2: The energy consumption of the third step

	Eq.(19)	Eq.(35)
The energy consumption[J]	29.3	28.5

これより Eq.(35) の軌道は従来よりも消費エネルギーが2.87%減少することがわかり、本手法の有効性が確認できた。

6 まとめ

本研究ではまず、これまで定数としてしか扱えなかった軌道設計のパラメータを時間関数としても扱えるように3D揺動歩容式を拡張し、より多様な重心軌道を設計できるようにした。次にこれを元に従来よりもエネルギー効率の高い重心軌道を試行錯誤的に決定した。さらにコンピュータシミュレーションと HOAP-1 を用いた実験により、提案した重心軌道の有効性を確認した。

しかし、提案したエネルギー効率の高い軌道で、実機での歩行が不可能なものがあつたように、エネルギー効率の高い軌道は歩行の安定性に欠ける場合があつた。そこで、今後は両者を考慮した歩容制御法の開発を目指す。

- [1] 倉爪, 米田, 田中, 玉木, 太田, 長谷川: “ 2 足歩行機械の 3D 揺動歩容 ”, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.7, pp.811-818, (2003).
- [2] 倉爪 亮, 米田 完, 広瀬 茂男: “ 4 足歩行機械の 3D 揺動歩容 ”, 日本ロボット学会誌 Vol.19, No.5, pp.632-637, (2001).