2 足歩行機械の3D 揺動歩容

The sway compensation trajectory for a biped robot

○ 田中 俊太郎(九州大) 倉爪 亮(九州大) 長谷川 勉(九州大) 米田 完(東工大) 玉木 達也(東工大)

Shuntaro TANAKA Ryo KURAZUME Tsutomu HASEGAWA

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

†{shun, kurazume, hasegawa}@irvs.is.kyushu-u.ac.jp

Kan YONEDA Tatsuya TAMAKI

[†]Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, Japan

†{yomeda,tamaki}@mes.titech.ac.jp

This paper describes a planning method of a dynamically stable walking for a biped robot. This method designes the ZMP and COG trajectories based on the idea of "the 3D sway compensation trajectory" with a single point mass model at first. Then, for eliminating a ZMP error, the COG trajectory is rectified by convergence calculation with a multiple point mass model. The effectiveness of the proposed method is verified through computer simulation using OpenHRP, and walking experiments using two walking robots, HOAP-1 and YANBO-3.

Key Words: Humanoid, ZMP, dynamically stable walking

1 はじめに

本論文では,2 足歩行機械の安定動歩行を実現するための新たな ZMP,重心軌道計画法を提案する.本手法は,まず簡単な単質点モデルを仮定し,足裏間を移動する ZMP 軌道と,それを実現する重心軌道を 4 足歩行ロボットの左右揺動歩容¹⁾,3D 揺動歩容²⁾の考え方に基づいて決定する.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ものである.

このようにして求められた ZMP 軌道, 重心軌道は,時間をパラメータとした一組の式で明示的に与えられ, 従来手法に比べて軌道計画が著しく簡便である.また形状や自由度配置の異なる2脚歩行ロボットに対しても,重心高さや揺動幅などを設計パラメータとして全く同様の式で軌道を導くことができ,柔軟性,汎用性が高い.さらに多質点モデルを考慮した動的安定に近い軌道が得られるので,腰位置や足首トルクのフィードバック処理と組み合わせることで,より安定な動歩行を実現するシステムが構築可能であると考えられる.

2 単質点モデルによる軌道の計画

まず,これまでに提案された 4 足歩行ロボットの左右揺動歩容,および 3D 揺動歩容を示す.ただしここでは,単質点モデルを仮定し,ロボットの腕,脚の質量は胴体に比べて十分小さく,全体を位置(x_g,y_g,z_g)に置かれた質点とする.また床面は平面で,ロボットの重心が床面から一定の高さ z_g であると仮定する.このとき床面上の ZMP の位置($x_{zmp},y_{zmp},0$)は

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

で与えられる(ただし $A = \frac{z_g}{a}$). また,両脚の対角線を

$$\cos\theta x + \sin\theta y = d\tag{2}$$

のように表す.ロボットが安定した歩行を行うためには, この対角線上に ZMP が存在しなければならない.よって, 重心軌道は

$$\cos\theta (x_g - A\ddot{x_g}) + \sin\theta (y_g - A\ddot{y_g}) = d \qquad (3)$$

を満たさなければならない.3D 揺動歩容では,進行方向(x 軸方向)とそれに垂直な方向(y 軸方向)への重心の移動を次式により $x_g-Ax_g=0$, $y_g-Ay_g=0$ の特殊解および一般解の和として定義する.

$$x_g = C_1^x e^{\frac{t}{\sqrt{A}}} + C_2^x e^{-\frac{t}{\sqrt{A}}} + a_2^x t^2 + a_1^x t + a_0^x$$
 (4)

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

各係数は軌道の連続性と歩行周期や進行方向の速度,加速度などから決定できる 2). ${
m Fig.1}$ に初期位置 (0,0) から x 軸方向に 10 歩,直進歩行させた場合の ${
m ZMP}$,および重心軌道 $({
m COG})$ の一例を示す.

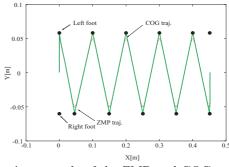


Fig.1: An example of the ZMP and COG trajectories for straight path

3 多質点モデルによる収束計算

前項の式 (4),(5)で計画された軌道は,歩行ロボットの腕や脚などの質量分布を無視し,単質点モデルを仮定して導かれたものであるので,実際の軌道と目標の軌道との間に誤差が生じる.よって,より安定な歩行を実現するためには,より厳密な多質点モデルを用いて,正確な重心軌道を生成する必要がある.そこで,ここでは前項で計画された目標重心軌道を多質点モデルを用いた収束計算により補正し,それにより実際の ZMP 軌道を目標の ZMP 軌道に一致させる手法を示す.本手法は以下の手順からなる.

1. 現在の ZMP を計算し,目標 ZMP との差を求める 多質点モデルでの ZMP 位置 X_{zmp} = $(x_{zmp},y_{zmp},0)$ は以下の式により求まる.

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i (r_{ix} (\ddot{r}_{iz} + g) - r_{iz} \ddot{r}_{ix}) - I_i \dot{\omega}_{iy}}{\sum_{i=1}^{N} m_i (\ddot{r}_{iz} + g)}$$

$$y_{zmp} = -\frac{\sum_{i=1}^{N} m_i (-r_{iy} (\ddot{r}_{iz} + g) + r_{iz} \ddot{r}_{iy}) - I_i \dot{\omega}_{ix}}{\sum_{i=1}^{N} m_i (\ddot{r}_{iz} + g)}$$
(7)

また前項で導かれた目標 ${
m ZMP}$ 軌道を X_{zmp}^{ref} , これを実現する重心軌道を X_g^{ref} , 現在の重心軌道を X_g とすると , 現在の状態は単質点モデルでは

$$X_{zmp} = X_g - A\ddot{X}_g \tag{8}$$

と書ける.一方,目標状態は

$$X_{zmn}^{ref} = X_a^{ref} - A\ddot{X}_a^{ref} \tag{9}$$

で表される.

そこで現在の ZMP の位置 X_{zmp} を ,前項で単質点 モデルを仮定して求めた目標 ZMP 軌道 X_{zmp}^{ref} と比較し,ZMP の誤差 e_{zmp} を求める.

式 (9) から式 (8) を引くと

$$X_{zmp}^{ref} - X_{zmp} = X_g^{ref} - X_g - A\left(\ddot{X}_g^{ref} - \ddot{X}_g\right) \tag{10}$$

となる . ここで $e_{zmp} = X_{zmp}^{ref} - X_{zmp}$, $e_g = X_g^{ref} - X_g$ と定義すると

$$e_{zmp} = e_g - A\ddot{e}_g \tag{11}$$

となる.この誤差 e_{zmp} を各サンプリング時間ごとに求め,一周期分の総和を求めておく.この量は 4 の収束判定において用いられる.

2. 現在の ZMP を目標の ZMP 軌道に一致させる $(e_{zmp}=0)$ ための重心の補正値 e_g を求める 式 (11) をサンプリング周期を Δt として離散化すると ,

$$e_{zmp}^{t} = e_{g}^{t} - A\ddot{e}_{g}^{t}$$

$$= e_{g}^{t} - A\frac{e_{g}^{t+1} - 2e_{g}^{t} + e_{g}^{t-1}}{(\Delta t)^{2}}$$
(12)

となり , ZMP 軌道誤差 $e^t_{zmp} \to 0$ とする重心軌道の 修正量 e^t_g は

$$e_g^t = \frac{e_{zmp}^t + \frac{A}{(\Delta t)^2} \left(e_g^{t+1} + e_g^{t-1} \right)}{1 + 2\frac{A}{(\Delta t)^2}}$$
(14)

で与えられる.

しかし実験の結果,上式で得られた補正量を直接現在の重心軌道に加えた場合, ${
m ZMP}$ の速度不連続点で修正された重心軌道が振動的になることがわかった.そこで,加速度をできるだけ小さくする拘束条件を加え,次式を最小にする e^t_a を求めることにする.

$$\min_{e_g^t} \left| e_g^t - \frac{e_{zmp}^t + \frac{A}{(\Delta t)^2} \left(e_g^{t+1} + e_g^{t-1} \right)}{1 + 2 \frac{A}{(\Delta t)^2}} \right| + k \left| e_g^t - \frac{e_g^{t+1} + e_g^{t-1}}{2} \right|$$
(15)

この式 (15) から各サンプリングごとの重心の補正値 e^t_q を求める .

3.2の計算を繰り返し行う

2 の計算により,目標 ZMP を実現する重心の補正値 e_g^t が求められ,この e_g^t を更新して再度 2 の計算を行う. e_g^t を更新する際に,前回の 2 の計算で得られた e_g^t との差を求めておき,この差が十分小さくなるまで,繰り返し 2 の計算を行う.

4. 重心軌道に補正量を加え,1 へ戻る 2 ,3 での繰り返し計算の結果,収束した e_g^t を重心 軌道に加え,新たな重心軌道を導く.

$$X_g^{ref} \leftarrow X_g + e_g^t \tag{16}$$

1 の計算で求めておいた一周期分の ZMP の誤差が十分に小さくなるまで新たな重心軌道を用いて $1\sim4$ を繰り返す.

提案した繰り返し収束計算を用いた場合と用いなかった場合の ZMP 軌道を Fig.2, Fig.3 に示す、収束計算による補正を行わない場合には,実際の ZMP 軌道の揺動幅は目標 ZMP 軌道に比べて小さくなる.これに対して,補正を加えた場合は目標軌道とほぼ一致した ZMP 軌道が実現できている.

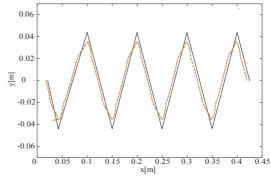


Fig.2: ZMP trajectory using the original COG trajectory

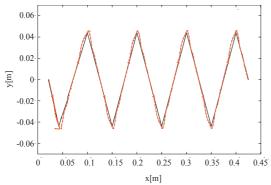


Fig.3: ZMP trajectory using the refined COG trajectory obtained by convergence calculation

4 シミュレーション実験

動力学シミュレータ OpenHRP を用いて歩行シミュレーション実験を行った.歩行条件は,デューティ比 0.65,歩行周期 4.0s,歩幅 0.05m である.ここでは,各関節の角度指令値はオフラインで計算されたものを与え,足首トルクなどを用いたフィードバック制御は行っていない.

実験の様子を Fig.4, Fig.5 に示す.ただし, Fig.4 は収束計算による補正を行わなかった場合, Fig.5 は行った場合である.補正を行わない場合には,歩行中の姿勢が不安定になり,提案手法が安定な歩行の実現に有効であることが確認された.

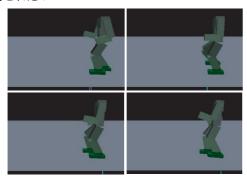


Fig.4: Simulation result by OpenHRP before convergence calculation (Duty factor 0.65)

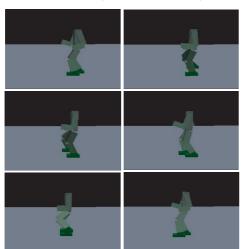


Fig.5: Simulation result by OpenHRP after conver-1F-F5(3) gence calculation (Duty factor 0.65)

5 実機を用いた歩行実験

5.1 HOAP-1 を用いた実験

2 足歩行ロボット HOAP-1 を用いて歩行実験を行った. ただし,シミュレーションと同様に,各関節の角度指令値はオフラインで計算されたものを与え,姿勢に応じたフィードバック制御は行っていない.歩行のパラメータは, デューティ比 0.75,歩行周期 4.0s,歩幅 0.05m として, 障害物のない水平な台の上で実験を行った.

実験の様子を Fig.6, Fig.7 に,また Fig.7 に対し足裏センサにより測定した ZMP 軌道を Fig.8 示す.補正なしではロボットはすぐに転倒してしまうが,補正をした軌道を用いることにより安定な歩行が実現できた.

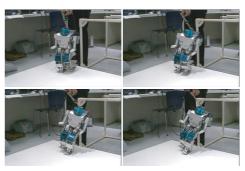


Fig.6: Walking experiments using HOAP-1 before convergence calculation (Duty factor 0.75)

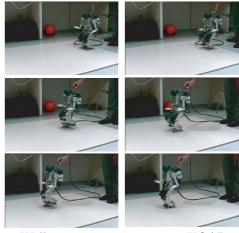


Fig.7: Walking experiments using HOAP-1 after convergence calculation (Duty factor 0.75)

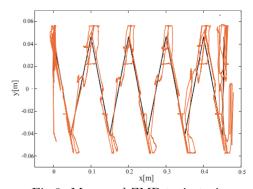


Fig.8: Measured ZMP trajectories

5.2 YANBO-3 を用いた実験

東京工業大学で開発された高機能少自由度 2 足歩行口ボット YANBO-3 を用い,全く同一のソフトウェアにより軌道を設計し,歩行実験を行った.歩行のパラメータは,デューティ比 0.57,周期 $1.5\mathrm{s}$ であり,その場足踏み状態を実現する軌道を設計した.実験の様子を Fig.9 に,実験中の ZMP の軌道を Fig.10,Fig.11 に示す.ただし,Fig.10 は補正を行わなかった場合,Fig.11 は行った場合である.これより,収束計算による補正を行うことで,より安定に ZMP が左右の足裏を移動していることがわかる.

これら 2 つの形状 , 自由度配置の異なるロボットで同様に有効性が示され , 本手法が高い汎用性を有することが確認できた .

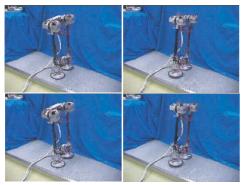


Fig.9: Walking experiments using YANBO-3

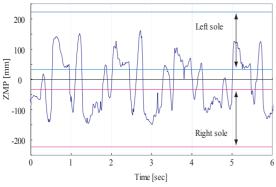


Fig.10: ZMP trajectories of stamping in place before convergence calculation

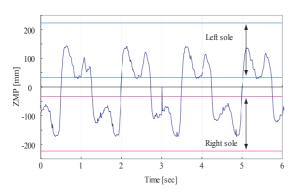


Fig.11: ZMP trajectories of stamping in place after convergence calculation 2A1-1F-F5(4)

6 まとめ

本論文では足裏間を移動する ZMP 軌道と,それを実現する重心軌道を4足歩行ロボットの左右揺動歩容,3D 揺動歩容の考え方に基づいてオフラインで決定する手法を提案した.本手法では安定な歩行を実現する ZMP 軌道,重心軌道が時間をパラメータとした一連の式で明示的に与えられ,従来手法に比べて軌道計画が著しく簡潔である.本手法の有効性をシミュレーション実験,実機を用いた歩行実験により確認した.

- 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.267-275,(1991).
- 2) 倉爪, 米田, 広瀬,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).