学術・技術論文

定常歩容に漸近する2脚ロボットの自在歩容生成

竹 中 \mathfrak{F}^{*1} 松 本 降 \mathfrak{E}^{*1} 吉 池 孝 \mathfrak{F}^{*2}

Real-time Walking Gait Generation for Biped Robot

Toru Takenaka*1, Takashi Matsumoto*1 and Takahide Yoshiike*2

In this paper, we propose a method to generate various walking gait patterns for biped robots in real-time using an approximated dynamics model with two point masses representing motion of the feet and a linear inverted pendulum representing the horizontal motion of the torso. The motion of the inverted pendulum is calculated from the trajectories of the feet and the desired ZMP. Supposing these trajectories for the current gait and the next cyclic gait are given, the initial state of the inverted pendulum of the cyclic gait is calculated, and the desired ZMP trajectory of the current gait is modified so that the current gait converges to the cyclic gait using the concept called "the divergent component of the motion" as a relaxed boundary condition. Using these techniques, real-time gait generation is achieved which requires a comparatively small amount of modification of the desired ZMP trajectory while guaranteeing the continuity of the gait generation.

Key Words: Humanoid Robot, Biped Robot, Gait Generation, Inverted Pendulum

1. はじめに

近年,人と調和して活動できる人間型ロボットに対する期待が高まっている.このようなロボットが,人の生活空間の中で生じる様々な状況変化に瞬時に対応し,適切に行動するためには,動バランスの良い歩容を自在に生成できることが重要である.

歩行の動バランスの指標として、Zero Moment Point (ZMP) [1] の概念が提唱されている。ZMP とは、床面上のその点回りに運動によって発生する慣性力と重力の合力モーメントの水平成分が 0 となる点である。

ZMP を規範とする目標歩容生成では、実際のロボットを目標歩容に追従させる際の復元力余裕が、前後または左右方向に偏りがないようにするために、支持多角形(足底接地面の包絡線で囲まれた領域)の中央付近を通るように目標 ZMP 軌道を設定し、目標 ZMP を満足するように上体の水平運動が決定される。しかし、ZMP は、瞬間的な動バランスを表現するものであり、目標歩容の継続性(具体的には上体水平位置が支持多角形から遠くに離れ過ぎないこと)を保証するものではない。

歩容の継続性をリアルタイムに保証するために、現在時刻から生成される歩容(以降、今回歩容と呼ぶ、今回歩容の区間は1歩とは限らない。)の終端条件を設定して、これを満足するよ

- 原稿受付 2010年2月17日
- *1(株)本田技術研究所基礎技術研究センター
- *2Honda Research Institute Europe GmbH
- *1 Honda R&D Co., Ltd. Fundamental Technology Research Center
- *2Honda Research Institute Europe GmbH
- 本論文は有用性で評価されました.

- うに目標 ZMP のパターンを決定あるいは修正する手法が、多く提案されている。このような手法においては、以下の項目の 決め方が鍵となる。
- I) 近似精度が高くかつ挙動予測が容易な動力学モデル
- II) 継続性を保証する今回歩容の終端条件とこれを満足させる ための操作変数

Iの動力学モデルに関しては、梶田ら [2] は、ロボット全体を 1 質点とみなした線形倒立振子モデルを提案している。このモデルでは、挙動予測を解析的に行うことができるが、脚部にモータ等の重量物を有する 2 足歩行ロボットの高速歩行に適用すると、安定な歩行を実現する上で動力学的誤差が無視できなくなる。この誤差を低減するために、J.H. Park ら [3] は、線形倒立振子に加えて、脚に作用する重力の影響を考慮したモデルを提案している。本稿では、さらに、脚に作用する慣性力の影響を含めたモデルを提案する。

II の終端条件とこれを満足させるための操作変数に関して, 長阪ら [4],原田ら [5],西脇ら [6],倉爪ら [7] は,今回歩容の終





Fig. 1 Walking biped robot (ASIMO)

端条件として、上体または重心の位置と速度をヒューリスティッ クに設定し、この条件を満足するように、時間関数で記述され る目標 ZMP 軌道の関数パラメータ値を決定している.しかし, これらの手法においては、厳密に終端条件を満足するようにパ ラメータが決定されるので、急激な運動変化を伴う歩容を生成 する場合に、目標 ZMP 軌道が大きく変動する傾向がある. こ の問題に対し、杉原ら [8] は、目標 ZMP 軌道の連続性、重心位 置,速度の厳密な接続を要求しないことで,境界条件を緩和し ている. しかし. これらの不連続性は、実際のロボットの姿勢 制御において、アクチュエータの急激な負荷変動とリンクの振 動を生じさせてしまう恐れがある.一方,梶田ら[9]は、予見 制御理論を用いて、予見終端時刻において上体が目標 ZMP の 真上に到達するように、各瞬間の目標 ZMP 位置を操作して歩 容を生成する手法を提案している. しかし, このようなフィー ドバック制御手法では、例えば、片脚のつま先だけが接地して いる瞬間のように支持多角形が狭い時期に、目標 ZMP 位置が 支持多角形から逸脱する恐れがある. また, 以上の手法におい ては、スラロームなどの様々な歩行に対して、継続性が保証で きる適切な終端条件を設定することも難しい. これらの問題を 解決するために、本稿では、今回歩容の後に続く定常歩容(具 体的には連続で周期的な旋回歩容)を暫定的に設定し、生成さ れる歩容が定常歩容に漸近するように、今回歩容の目標 ZMP 軌道の関数パラメータ値を決定する手法を提案する。本手法で は、上体運動に対応する倒立振子の運動を"発散成分"と"収束 成分"に分解し、今回歩容の終端発散成分のみを定常歩容の初 期発散成分に一致させることによって、終端条件を緩和しつつ、 今回歩容を定常歩容に漸近させる.

本稿で提案するこれらの手法により、高速歩行や急激な運動 変化を伴う歩行などに対しても、動バランスが良くかつ継続性 が保証された歩容をリアルタイムに自在に生成することが可能 となる。

なお、歩容の周期性に着目した研究として、山口ら[10]は、質点軌道をフーリエ級数で記述することで、目標 ZMP 軌道を満足する上体軌道を求めている。J.H. Park ら[3]は、始端と終端での倒立振子位置、速度を周期的な関係から決定している。

本稿は、2章において、歩容生成のシステム構成を説明した後、3章において、近似動力学モデルと、この運動の発散成分の解析手法を示す。さらに4章において、歩容生成法を説明し、5章において、歩容生成例を示す。

2. 歩容生成システム

本稿中では、目標 ZMP 軌道、脚軌道、上体軌道の組を歩容 と定義する. 歩容生成システムは、

- a) 移動目的に応じて着床位置,歩行周期など,足跡に関する 計画を決定する移動計画部
- b) 移動計画部からの要求に応じて、継続性を保証した歩容を 生成する目標歩容生成部
- から構成されるものとする. さらに、目標歩容生成部は、
- b1) 歩容パラメータを決定する歩容パラメータ決定部
- b2) 歩容パラメータを基に、逐次、歩容の瞬時値を算出する歩 容瞬時値算出部

から構成されるものとする. なお, 歩容瞬時値を算出するため に必要な軌道やパターンは, すべてパラメータで表現されるも のとし, これらのパラメータを歩容パラメータと定義する.

また、任意の時刻からの歩容変更を可能にするために、移動計画と目標歩容生成は、制御周期ごとに実行されるものとする. したがって、歩容の切り換わり目に近づくにつれ、今回歩容の区間は徐々に短くなっていく.

3. 動力学モデル

3.1 3 質点モデル

本稿では、**Fig.2**に示すように、倒立振子質点、支持脚足部質点および遊脚足部質点からなる3質点モデルを提案する。この動力学モデルは、上体を垂直(またはある姿勢)に維持した歩行に対応するモデルであり、以下のように設定される。

- a. 倒立振子は、高さ一定の線形倒立振子とする.
- b. 倒立振子質点の水平位置は、上体に固定された代表点の水平 位置を表す。
- c. 支持脚足部質点は, 支持脚足首中心に設定される. 遊脚足部 質点も同様に設定される.
- d. 各質点間には、脚の伸び切りなどを考慮した幾何学的な拘束 が存在しない.
- e. サジタル面上の運動とラテラル面上の運動は独立している. 以下では、サジタル面上の運動に関して説明する.ここで、本稿で使用する表記を列挙する.

 m_{sup}, m_{swq} :支持/遊脚足部質点質量

 m_{pend} : 倒立振子質点質量

 m_{total} : ロボット総質量 $(= m_{pend} + m_{sup} + m_{swg})$

 m_{feet} : 両脚足部質量($=m_{sup}+m_{swg}$) x_{sup}, z_{sup} : 支持脚足部質点水平/鉛直位置 x_{swg}, z_{swg} : 遊脚足部質点水平/鉛直位置

 x_{pend} :倒立振子水平位置

h: 倒立振子の高さ(一定値)

 x_{pend}^{ZMP} : 倒立振子支点水平位置

zcog: ロボット全体重心鉛直位置

g: 重力加速度定数

 x_{total}^{ZMP} : 総合 ZMP(3 質点モデルの ZMP)

なお、本稿では、目標 ZMP とは、 x_{total}^{ZMP} の目標値を意味するものとする。また、支持脚の足裏が床に面接触しているときの足首位置の床への鉛直投影点を原点とし、床に固定された座標系を支持脚座標系と呼ぶ、以下では、特に断らない限り、位

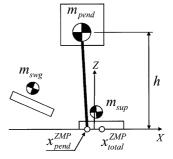


Fig. 2 Dynamics model with three masses

置、速度、力などは、今回歩容の支持脚座標系で示す。

以降のモデルの説明においては、床面上に設定されたある点 P まわりの力のモーメントに関して議論する. 点 P の軌道は, 目標 ZMP と同様に、パラメータ表現され、歩容パラメータと して設定されるものとする. 点 P の水平/鉛直位置を x_n, z_n と

脚質点によって点 P まわりに発生する床反力モーメントを. 脚モーメント M_{feet} と呼ぶ. M_{feet} は, 次式で求められる.

$$M_{feet} = -m_{sup}(x_{sup} - x_p)(g + \ddot{z}_{sup})$$

$$+m_{sup}\ddot{x}_{sup}(z_{sup} - z_p)$$

$$-m_{swg}(x_{swg} - x_p)(g + \ddot{z}_{swg})$$

$$+m_{swg}\ddot{x}_{swq}(z_{swq} - z_p)$$
(1)

倒立振子によって点 P まわりに発生する床反力モーメントを、倒 立振子モーメント M_{pend} と呼ぶ。 M_{pend} と支点水平位置 x_{pend}^{ZMP} と間には、次式の関係が成立する.

$$M_{pend} = -m_{pend}g \left(x_{pend}^{ZMP} - x_{p} \right) \eqno(2)$$

ここで、式 (2) を参考に、次式を満足する x_{feet}^{ZMP} を、脚 ZMP と定義する.

$$M_{feet} = -m_{feet}g\left(x_{feet}^{ZMP} - x_p\right) \tag{3}$$

補足すると、上式で定義される脚 ZMP は、厳密な意味では 脚質点によって発生する慣性力と重力の合力モーメントが 0 と なる床面上の点とは異なる.

3 質点モデルによって点 P まわりに発生する床反力モーメン トを、総合モーメント M_{total} と呼ぶ、 M_{total} は、次式で求め られる.

$$M_{total} = M_{feet} + M_{pend} \tag{4}$$

一方, 総合モーメントと x_{total}^{ZMP} には, 次式の関係が成立する.

$$M_{total} = -m_{total} \left(g + \ddot{z}_{cog} \right) \left(x_{total}^{ZMP} - x_p \right) \eqno(5)$$

式 (2) \sim (5) より、次の関係式を得る.

$$\left(x_{pend}^{ZMP} - x_{p}\right) = \frac{m_{total}}{m_{pend}} \left(x_{total}^{ZMP} - x_{p}\right) - \frac{m_{feet}}{m_{pend}} \left(x_{feet}^{ZMP} - x_{p}\right) + \frac{\ddot{z}_{cog}}{q} \frac{m_{total}}{m_{pend}} \left(x_{total}^{ZMP} - x_{p}\right) \tag{6}$$

ここで、点Pは、目標ZMPまたはその近傍に設定されるも のとし、また、次式が成立するものとする.

$$\ddot{z}_{coq} \ll g$$
 (7)

これらの前提の下で、式(6)において第3項を無視すると、 次の近似式を得る.

$$x_{pend}^{ZMP} = \frac{m_{total}}{m_{pend}} x_{total}^{ZMP} - \frac{m_{feet}}{m_{pend}} x_{feet}^{ZMP} \tag{8} \label{eq:spend}$$

後述するように、歩容生成においては、目標 ZMP 軌道が修正 される場合がある. この場合, 近似精度の観点からは、目標 ZMP 軌道の修正に伴って、点 P の軌道も、修正された目標 ZMP 軌 道に一致するように変更することが望ましい。ただし、式(7) が成立していれば、計算負荷の増加を防ぐ目的から、点 P の軌 道を変更しないで置いても、実用上、問題はない.

一方、線形倒立振子の質点の運動と支点の間には、次式の関 係が成立する.

$$\ddot{x}_{pend} = \frac{g}{h} \left(x_{pend} - x_{pend}^{ZMP} \right) \tag{9}$$

歩容瞬時値算出部では、各瞬間において、上記モデルを用い て,以下のように歩容の瞬時値が算出される.

STEPa1) 歩容パラメータを基に、各瞬間の足部位置、目標 ZMP および点 Pの位置を算出する.

STEPa2) 式 (1) により M_{feet} を求める.

STEPa3)式(3)により x_{feet}^{ZMP} を求める。 STEPa4)目標 ZMP と x_{feet}^{ZMP} を式(8)に代入して x_{pend}^{ZMP} を 求める.

STEPa5) 式 (9) により倒立振子の加速度を求め、これを積分 して倒立振子の水平位置と速度を求める.

STEPa6) 倒立振子水平位置に対応した上体水平位置を求める. なお、3 質点モデルの各パラメータは、3 質点モデルの静特 性と動特性が、実口ボットの詳細動力学モデルの静特性と動特 性に極力一致するように設定される. 具体的には、倒立振子質 点質量 m_{nend} とロボット総質量 m_{total} との比は、実ロボット の詳細モデルにおいて、直立姿勢から上体を微小量だけ水平方 向に平行移動させたときの全体重心の移動量と上体の移動量と の比に一致するように設定される. さらに. 直立姿勢時での3 質点モデルと詳細モデルの全体重心水平位置が一致するように, 上体に固定される代表点(上体に固定された或る座標系から見 た代表点の座標)が決定される。さらに、直立姿勢から上体を 水平方向に平行に加速させた瞬間の上体加速度とこれに起因す る ZMP の摂動量との関係が、3 質点モデルと詳細モデルとに おいて一致するように、倒立振子の高さ h が設定される.

3.2 発散成分と収束成分

従来, 今回歩容の終端条件には、倒立振子の位置と速度が、広 く用いられてきた. 本稿では、倒立振子の運動を、発散成分と収 東成分に分離し、発散成分のみを終端条件とすることで、終端 条件を緩和する. 本節では, 発散成分と収束成分を定義し, そ の性質を議論する.

倒立振子の正の固有値を λ_0 とする. λ_0 は次式によって得ら れる.

$$\lambda_0 = \sqrt{g/h} \tag{10}$$

ここで、次式のように、pとqを決める.

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1/\lambda_0 \\ 1 & 1/\lambda_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{pend} \\ \dot{x}_{pend} \end{pmatrix}$$
(11)

pとqを用いることによって、式(9)は、次式に変換される.

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\lambda_0 & 0 \\ 0 & \lambda_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \lambda_0 \\ -\lambda_0 \end{pmatrix} x_{pend}^{ZMP}$$
(12)

 x_{pend}^{ZMP} が一定値 $x_{pend}^{ZMP_c}$ である場合,一般解は、

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1 e^{-\lambda_0 t} + x_{pend}^{ZMP_x} \\ C_2 e^{\lambda_0 t} + x_{pend}^{ZMP_x} \end{pmatrix}$$
(13)

である。ただし, C_1 , C_2 は,任意の定数である。すなわち,時定数 $1/\omega_0$ で,p は倒立振子支点位置 x_{pend}^{ZMP-c} に収束し,q は発散する。この性質から p を収束成分,q を発散成分と呼ぶ。このように,収束成分は自然に支点位置に収束するので,終端条件としては,収束成分は無視し,発散成分のみを考慮することとする。

式 (8), (12) より, 次式を得る.

$$q(t) = e^{\lambda_0 t} q(0) - \frac{m_{total}}{m_{pend}} \lambda_0 e^{\lambda_0 t} \int_0^t e^{-\lambda_0 \tau} x_{total}^{ZMP}(\tau) d\tau + \frac{m_{feet}}{m_{pend}} \lambda_0 e^{\lambda_0 t} \int_0^t e^{-\lambda_0 \tau} x_{feet}^{ZMP}(\tau) d\tau$$
(14)

すなわち、発散成分は、発散成分初期値の項目標 ZMP の項および脚 ZMP の項からなる。また、任意の時刻の発散成分は、その後、目標 ZMP と脚 ZMP がともに 0 であるならば、 T_a $(T_a>0)$ 秒後に、 $e^{\lambda_0 T_a}$ 倍となることが分かる。

3.3 目標 ZMP 軌道が発散成分に及ぼす影響

本稿では、目標 ZMP 軌道は、 $\mathbf{Fig. 3}$ のように、折れ線状に設定されると仮定する。すなわち、1 歩の期間は、第 $0,1,\ldots,N-1$ 期間に分割され、目標 ZMP 軌道は、各期間において等速直線運動をするものとする。このように、各期間における軌道が多項式である場合、式(14)の目標 ZMP の項は、以下に示すように、解析的に求めることができる。

時刻 0 から時間 T の期間において、目標 ZMP が次式のように、時刻 t のn 乗(n は非負の整数)である場合に、この期間の目標 ZMP が時刻 T での発散成分に及ぼす影響を R(T,n) とする.

$$x_{total}^{ZMP}(t) = t^n (15)$$

 t^n をラプラス変換すると $n!s^{-(n+1)}$ となることと、二項定理を用いることにより、R(T,n) は、次のように求められる.

$$R(T,n) = -\frac{m_{total}}{m_{pend}} \lambda_0 e^{\lambda_0 T} \int_0^T e^{-\lambda_0 \tau} \tau^n d\tau$$

$$= -\frac{m_{total}}{m_{pend}} \lambda_0 e^{\lambda_0 T}$$

$$\times \left(\int_0^\infty e^{-\lambda_0 \tau} \tau^n d\tau - \int_0^\infty e^{-\lambda_0 (\tau + T)} (\tau + T)^n d\tau \right)$$

$$= -\frac{m_{total}}{m_{pend}} e^{\lambda_0 T}$$

$$\times \left(n! \lambda_0^{-n} - e^{-\lambda_0 T} \sum_{m=0}^n P_{(n-m)} T^m \lambda_0^{-(n-m)} \right)$$
(16)

Fig. 3の目標 ZMP 軌道において、初期時刻を 0、終端時刻を

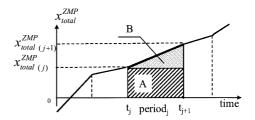


Fig. 3 ZMP trajectory

 t_E とし、第 j 期間の終端時刻を t_{j+1} 、そのときの目標 ZMP を $x_{total(j+1)}^{ZMP}$ とする。第 j 期間で発生する発散成分は、矩形領域 (Fig. 3 area A) による発散成分と三角形領域 (Fig. 3 area B) による発散成分の和で表現できるので、第 j 期間の目標 ZMP 軌道が歩容終端時刻 t_E での発散成分に及ぼす影響 q_j^{ZMP} は、次のようになる。

$$q_{j}^{ZMP} = e^{\lambda_{0}(t_{E} - t_{j+1})} x_{total(j)}^{ZMP} R(t_{j+1} - t_{j}, 0)$$

$$+ e^{\lambda_{0}(t_{E} - t_{j+1})} \frac{x_{total(j+1)}^{ZMP} - x_{total(j)}^{ZMP}}{(t_{j+1} - t_{j})} R(t_{j+1} - t_{j}, 1)$$

$$(17)$$

よって、全期間の目標 ZMP 軌道が時刻 t_E での発散成分に及ぼす影響は、次式のようになる。

$$q^{ZMP} = \sum_{j=0}^{N-1} q_j^{ZMP} \tag{18}$$

式 (14), (18) より, 歩容終端時刻 t_E での発散成分は, 次のようになる.

$$q(t_E) = e^{\lambda_0 t_E} q(0) + q^{ZMP} + \frac{m_{feet}}{m_{pend}} \omega_0 e^{\lambda_0 t_E} \int_0^{t_E} e^{-\lambda_0 \tau} x_{feet}^{ZMP}(\tau) d\tau$$
(19)

なお,上記の議論は連続系で行ったが,実装上は,離散系で 記述した.

4. 歩容生成手法

4.1 歩容生成の全体フロー

提案する歩容生成手法の全体フローについて、その概要を以下に説明する.

STEPb1) 移動指示に応じて、今回歩容とそれに続く定常歩容の目標着床位置と歩行周期を決定する。定常歩容は、Fig.4に示すように、2歩の歩容(以降1歩目を第1定常歩容、2歩目を第2定常歩容と呼ぶ)を交互に繰り返し生成することで、絶対空間上での移動量を除き、連続で周期的な運動が生成される歩容である。すなわち、定常歩容の初期状態と終端状態は、絶対空間上での位置と方向を除き、一致しなければならない、以降、この条件を、定常歩容の連続性の条件と呼ぶ。なお、定常歩容は、今回歩容の終端条件を決定するための暫定的な歩容であり、実際のロボットの制御において、目標値として生成される必要はない。

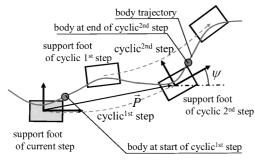


Fig. 4 Cyclic gait

STEPb2) 定常歩容と今回歩容の足部軌道パラメータを設定する. STEPb3) 定常歩容と今回歩容の目標 ZMP 軌道パラメータを設定する. 前述のように、目標 ZMP 軌道は、各区間の境界時刻とそのときの目標 ZMP 位置によってパラメータ表現されるが、実際のロボットを目標歩容に追従させる際の復元力余裕が、前後または左右方向に偏りがないようにするために、支持多角形の中央付近を通るように設定される.

STEPb4) 定常歩容の初期発散成分と終端発散成分が一致するように、定常歩容の初期発散成分を決定する.

STEPb5) 今回歩容パラメータを基に、今回歩容の終端発散成分を算出し、さらに今回歩容と定常歩容の境界での発散成分の差を算出する。

STEPb6) 発散成分の差がゼロになるように、今回歩容の目標 ZMP 軌道パラメータを修正する.

このように設計された今回歩容の ZMP 軌道パラメータと足部軌道パラメータを基に、逐次、式(8)、(9) により、倒立振子質点の位置・速度が算出され、これに対応する上体位置が算出される。さらに、上体位置と足部位置・姿勢を基に、逆運動学を用いて脚部の関節角度が算出される。

以下では、STEPb4からSTEPb6について、詳細を説明する、

4.2 定常歩容の初期発散成分の算出

本節では、定常歩容の初期発散成分の算出法について説明する. 以下に本節で使用する表記を列挙する.

t:時刻(定常歩容の初期時刻を0とする)

T_{cyc}: 定常歩容の歩行周期 (第 1, 第 2 定常歩容の歩行 周期の和)

P: 今回歩容の支持脚座標系から見た第2定常歩容の 支持脚座標系原点位置

Ψ:今回歩容の支持脚座標系から見た第2定常歩容の 支持脚座標系の向き(ヨー角)

 $\vec{q}_{cyc}(t)$: 今回歩容の支持脚座標系から見た定常歩容の時刻 t での発散成分

 $\vec{q}_{cyc}^{coord2}(t)$: 第 2 定常歩容の支持脚座標系から見た定常歩容の時刻 t での発散成分

ヨー角 Ψ の回転行列を $R_z(\Psi)$ と表すと、 $\vec{q}_{cyc}(T_{cyc})$ は、次式によって $\vec{q}_{cyc}^{coord2}(T_{cyc})$ に座標変換される。

$$\vec{q}_{cyc}^{coord2}(T_{cyc}) = R_z(-\Psi)\{\vec{q}_{cyc}(T_{cyc}) - \vec{p}\} \quad (20)$$

一方,式 (19) から,次式の関係が得られる.ここで,右辺第2項と第3項の値は,それぞれ,定常歩容の目標 ZMP 軌道

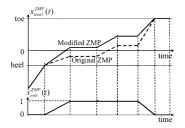


Fig. 5 Unit trapezoid ZMP pattern

と脚 ZMP 軌道が発散成分に及ぼす影響であり,第3章で述べた方法によって求められる.ただし,これらは,今回歩容の支持脚座標系から見た値に座標変換されたものである.

$$\vec{q}_{cyc}(T_{cyc}) = e^{\lambda_0 T_{cyc}} \vec{q}_{cyc}(0) + \vec{q}_{cyc}^{ZMP} + \vec{q}_{cyc}^{feet} \quad (21)$$

ところで、定常歩容の連続性の条件から、次式が成立する.

$$\vec{q}_{cyc}^{coord2}(T_{cyc}) = \vec{q}_{cyc}(0) \tag{22}$$

したがって、式 (20) \sim (22) の連立方程式を解くことにより、 定常歩容の初期発散成分 $\vec{q}_{cuc}(0)$ が求められる.

4.3 今回歩容の ZMP 軌道パラメータの修正

本節では、今回歩容終端での発散成分を定常歩容の初期発散成分に一致させるように今回歩容の ZMP 軌道パラメータを修正する手法について述べる.

STEPc1) まず、今回歩容パラメータを基に、式(19)を用いて今回歩容の終端発散成分 $\vec{q}_{curr}(T_{curr})$ を求める.

STEPc2)次式により、定常歩容の初期発散成分と今回歩容の終端発散成分の差 \vec{q}_{diff} を求める.

$$\vec{q}_{diff} = \vec{q}_{cyc}(0) - \vec{q}_{curr}(T_{curr})$$
 (23)

STEPc3)目標 ZMP 軌道を修正するために,**Fig. 5** に示す単位高さの台形状の軌道 $x_{unit}^{ZMP}(t)$ を準備する.ただし,台形の折れ点の時刻は,今回歩容の目標 ZMP 軌道パラメータとして設定された区間境界時刻のなかから選ぶ.また,片脚のつま先だけが接地している期間(Fig. 5 の最後の区間)のように,ZMP位置の制約が厳しい区間が有る場合,その区間を避けるように台形を設定する.これによって,ZMP の制約を考慮した修正が容易となる.

STEPc4)この単位高さの台形状の目標 ZMP 軌道が,今回歩容終端での発散成分に及ぼす影響 q_{unit} を,3.3 節で述べた方法により求める。さらに,次式により,補正台形の高さベクトル \vec{X}^{ZMP}_{add} を求める.

$$\vec{X}_{add}^{ZMP} = \vec{q}_{diff}/q_{unit} \tag{24}$$

STEPc5)今回歩容の目標 ZMP 軌道に、 $x_{unit}^{ZMP}(t)\vec{X}_{add}^{ZMP}$ を加えることによって、この軌道を修正する。修正された目標 ZMP 軌道は、Fig. 5 に示すように、元の目標 ZMP 軌道パラメータのうちの、いくつかの区間境界時刻での ZMP 位置パラメータ値に、 \vec{X}_{add}^{ZMP} を加えたものになる。すなわち、今回歩容の修正は、ZMP 軌道パラメータ(折れ点位置)のみを修正することで行うことができる。

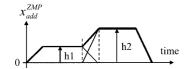


Fig. 6 Trapezoid ZMP pattern with 2 peaks

以上のように、今回歩容の終端発散成分を定常歩容の初期発 散成分に一致させることによって、今回歩容は、定常歩容に漸近 する。より詳細には、修正された今回歩容パラメータを基に今 回歩容を生成したあとに、その終端状態を初期状態として、定 常歩容パラメータを基に歩容を生成し続けると、倒立振子軌道 は、定常歩容の倒立振子軌道に漸近する

ところで、今回歩容と定常歩容の境界で、倒立振子位置と速度の両方を一致させる方法では、本稿のように ZMP が折れ線で表される場合、目標 ZMP 軌道の修正のために、Fig. 6 に示す二つの台形からなる軌道のように、複数の操作パラメータにより記述される軌道を準備する必要がある。この方法では、高速歩行から急停止や急旋回に移行するときなど、急激に歩行動作を変更するときに、修正の変動幅が大きくなる傾向がある。これに比べ、発散成分のみを一致させる方法では、終端条件が緩和されるので、修正の変動幅を小さくすることができる。

なお、発散成分のみを一致させるためであっても、目標 ZMP 軌道が部分的に支持多角形から逸脱する場合には、Fig. 6 のように複数の修正用台形軌道を用いてもよい、それでも逸脱する場合には、歩容の着床位置や時間を変更してもよい。また、歩行停止時に有限時間で上体を静止させることを優先したい場合には、複数の修正用台形軌道を用いて、静止時刻における発散成分と収束成分の両方を、目標静止状態での倒立振子位置に一致させればよい。この場合は位置と速度を境界条件として用いることと等価である。

5. 歩容生成シミュレーション

本章では、人間型ロボット ASIMO (**Fig. 1**, 身長 1.3 [m], 質量 54 [kg]) [11] の詳細パラメータを基に、提案する手法を用いて歩容生成のシミュレーションを行った結果を示す。なお、本ロボットに対応する 3 質点モデルの上体質量比率 (m_{pend}/m_{total}) は 0.82,倒立振子の高さ h は 0.803 [m] とし、制御周期は 5 [ms] とした.

5.1 3 質点モデルの近似精度

Fig. 7 に、4.05 [km/h](歩幅 0.45 [m],歩行周期 0.4 [s])の直線歩行時のモデル近似誤差を示す.ここで近似誤差とは,近似モデルを用いて目標 ZMP を満足するように生成した運動を,詳細な動力学モデルに行わせた場合に,目標 ZMP まわりに発生する床反力モーメントを ZMP のずれに換算したものである.実線は、3 質点モデル,点線は,線形倒立振子だけの 1 質点モデルの場合である.なお,一点鎖線は,足部質点によって発生する床反力モーメントの ZMP 換算値を示す.

上記 ZMP のずれの波形を,フーリエ級数展開を用いて,周期 0.4 [s] の基本波成分と高調波成分に分解することによって, Fig. 8 が得られる. 横軸が高調波の次数を表す. 1 質点モデルの場合に比べて,3 質点モデルの場合,基本波成分が 1/2.8 倍

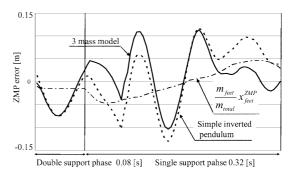


Fig. 7 ZMP error of proposed model

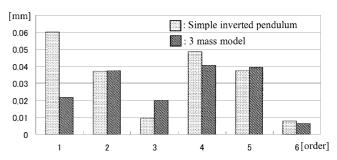
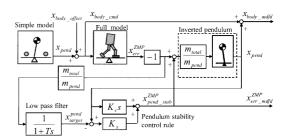


Fig. 8 Frequency spectrum of ZMP error



 ${\bf Fig.\,9}\quad {\rm ZMP\ error\ of\ proposed\ model}$

に低減している.

ところで、筆者らは、実際の歩行制御においては、本稿の手法 で生成した単純モデル歩容を、詳細なロボット動力学モデルを用 いて補正することによって、最終的な目標歩容を得ている[12]. 本補正は、実装上は複雑な構成になっているが、基本原理は、長 阪[13] によるダイナミクスフィルタなどと同じである. Fig. 9 に、本補正の基本構成を示す、本補正では、まず、単純モデル 歩容に対し、詳細な動力学モデル上での ZMP 誤差(詳細な動 力学モデルから算出される ZMP と目標 ZMP の差)を求める. 次いで、ZMP 誤差を (-1) 倍して、3 質点モデルの倒立振子部 分と同一特性を持つ補正用倒立振子に入力し、補正用倒立振子 の運動を単純モデル歩容に加えることで、補正された上体軌道 $x_{body\ mdfd}(t)$ を得る. 以上の補正によって、ZMP 誤差を打ち 消すことができるが、このままでは、補正用倒立振子が発散す るので、補正用倒立振子を安定化する制御則によってフィード バック量を決定し、補正用倒立振子に追加的に入力する. この 結果、補正後の歩容の ZMP は、元々の目標 ZMP からフィード バック量分だけずれる. 以降, このずれを $x_{err_mdfd}^{ZMP}(t)$ と表す. 経験的に得た設定値として、 $K_x = 2.0 \cdot (m_{pend}/m_{total})$,

権験的に得た設定値として、 $K_x = 2.0 \cdot (m_{pend}/m_{total})$, $K_v = 2.0 \cdot (m_{pend}/m_{total})/\lambda_0$, $T = 2.0/\lambda_0$ とすると、 x_{err}^{ZMP}

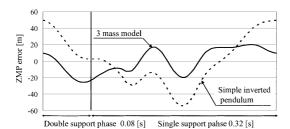


Fig. 10 ZMP error after full model compensation

から $x_{err,mdfd}^{ZMP}$ までの伝達関数は、次式のようになる.

$$\frac{x_{err,mdfd}^{ZMP}(s)}{x_{err}^{ZMP}(s)} = 3.0 \cdot \frac{\frac{s}{0.5 \cdot \lambda_0}}{\frac{s}{0.5 \cdot \lambda_0} + 1} \cdot \frac{1}{\frac{s}{1.0 \cdot \lambda_0} + 1} \quad (25)$$

すなわち、この伝達関数は、ゲイン 3.0 と、カットオフ角周波数 $0.5 \cdot \lambda_0$ のローカットフィルタと、カットオフ角周波数 $1.0 \cdot \lambda_0$ の ハイカットフィルタとの積となる。 λ_0 は 3.5 [rad/s]、定常歩容 の基本角周波数は 5.0 [rad/s] であるので、この補正によって、基本波成分は約 0.7 倍にしか低減されないが、第 n ($n=2,3,\ldots$) 高調波成分は、約 0.7/n 倍に低減される。 Fig. 7 の波形をこの補正に通して得られる $x_{err_mdfd}^{ZMP}(t)$ を、 Fig. 10 に示す。 1 質点モデルの場合に比べて、3 質点モデルの場合には、ZMP 誤差のうちの基本波成分が少ないため(Fig. 8)、 $x_{err_mdfd}^{ZMP}(t)$ が約 1/2 倍に低減している。

3 質点モデルを用いることによって、ASIMO においては、歩行周期 $0.4\sim1.0$ [s]、歩幅 $-0.27\sim0.45$ [m] の範囲で任意の直線歩行が実現されている。また、脚同士の干渉を回避するために、直線歩行よりは最高移動速度が低下するが、ほぼ同様の範囲で旋回歩行も可能となっている。これらの範囲の中では、歩幅が大きいほど、また歩行周期が短いほど、 $x_{err_mdfd}^{ZMP}(t)$ のピーク値は増大する傾向があり、上記の歩行例は、ほぼ最悪な場合となっている。しかし、図から分かるように、提案モデルを用いた場合には、ピーク値は十分小さく抑えられている。

5.2 発散成分による接続の効果

提案した発散成分による接続の効果を調べるために、Fig. 11 に、高さ 1 [m] の単純倒立振子を、0.1 [m] オフセットした状態から直立静止状態に遷移させるための ZMP 軌道の設計例を示す.修正用 ZMP の発生期間は 0.35 [s] である.位置と速度を接続する場合、倒立振子位置 (a) は接続時刻で直立状態になるが、ZMP 軌道 (e) の最大値は 0.58 [m] となる.一方,発散成分を接続する場合には、倒立振子位置 (b) は、無限時間かけて収束していくが、ZMP 軌道 (f) の最大値は 0.18 [m] に低減される.なお、この場合,発散成分 (d) は、接続時刻で目標発散成分 0 [m] になっているが、収束成分 (c) は、無限時間かけて 0 [m] に漸近する.

5.3 歩容生成例

Fig. 12 は、 $1.0 \, [\text{km/h}]$ (歩幅 $0.25 \, [\text{m}]$, 歩行周期 $0.90 \, [\text{s}]$) の 定常直線歩行から、 $3.0 \, [\text{km/h}]$ (歩幅 $0.45 \, [\text{m}]$, 歩行周期 $0.54 \, [\text{s}]$) の定常直線歩行へ、歩行速度を変更した場合の歩容生成例である。左から $1 \, \text{歩目は}$, $1.0 \, [\text{km/h}]$ の定常歩容である。 $2 \, \text{歩目は}$ 今回歩容であり、 $3 \, \text{歩目}$ 4 歩目は、 $3.0 \, [\text{km/h}]$ の定常歩容である。縦軸は支持脚座標系で表されており、 $1 \, \text{歩ごとに座標系}$

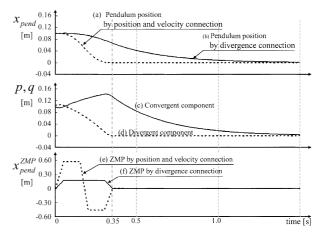


Fig. 11 ZMP trajectory for connection

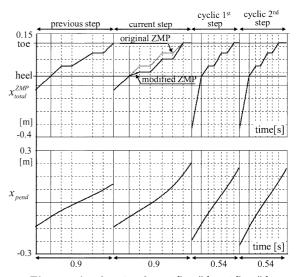


Fig. 12 Acceleration from 1 [km/h] to 3 [km/h]

が切り換わるので、軌道に不連続が生じているように見えるが、 実際には連続している.

今回歩容の元のパラメータには、1歩目の歩容パラメータの値が設定されている。Fig. 12より、今回歩容を3.0 [km/h] の定常歩容に漸近させるために、今回歩容の ZMP が後方に0.03 [m] 修正され、上体が加速していることが分かる。このように、急峻な運動変化に対しても、提案した手法によって、ZMP 修正量は比較的小さく抑えられ、修正された ZMP 軌道は、支持多角形を逸脱しにくくなる。

なお、今回歩容を生成したあとに、改めて、今回歩容、第 1、第 2 定常歩容のパラメータそれぞれに、上記の 3 歩目、4 歩目、3 歩目の歩容パラメータの値を設定すると、今回歩容パラメータの修正量は 0 となる。

また Fig. 13 に、提案した手法によって、歩行開始から停止まで歩容を生成したときの、発散成分、収束成分、倒立振子質点の挙動を示す。歩行周期は 0.55 [s]、最大速度は 3.0 [km/h] である。倒立振子質点位置は、発散成分と収束成分の平均値になる、収束成分は、ZMP 軌道に一次遅れで追従し、停止時には ZMP の真上に収束することが分かる。

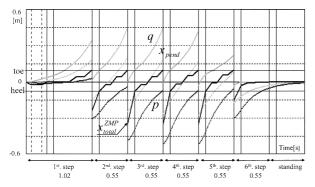


Fig. 13 Divergent and convergent component during walking

6. お わ り に

本稿では、脚運動の影響を考慮しつつ、部分的に線形性を有する、線形倒立振子質点、支持脚足部質点および遊脚足部質点からなる3質点モデルを提案した。さらに、今回歩容に続く定常歩容を暫定的に設定し、今回歩容の終端発散成分が定常歩容の初期発散成分に一致するように、今回歩容の目標 ZMP 軌道パラメータを修正する歩容生成手法を提案した。この手法により、目標 ZMP 軌道の修正量は比較的小さく抑えられ、修正された ZMP 軌道は支持多角形を逸脱しにくくなるとともに、今回歩容は定常歩容に漸近する。この結果、急激な運動変化を伴うような様々な歩行に対しても、動バランスが良くかつ継続性が保証された歩容を生成できるようになった。

上体の動きを積極的に利用することで、より俊敏で自在な歩容を生成することが、今後の課題である。

参考文献

- [1] M. Vukobratović and J. Stepanenko: "On the Stability of Anthropomorphic Systems," Mathematical Biosciences, vol.15, Oct., pp.1–37, 1972.
- [2] S. Kajita, O. Matsumoto and M. Saigo: "Real-time 3D Walking Pattern Generation for a Biped Robot with Telescopic Legs," Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2299–2306, 2001.

- [3] J.H. Park and K.D. Kim: "Biped Robot Walking Using Gravity-Compensated Inverted Pendulum Mode and Computed Torque Control," Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3528–3533, 1998
- [4] K. Nagasaka, Y. Kuroki, S. Suzuki, Y. Itoh and J. Yamaguchi: "Integrated Motion Control for Walking, Jumping and Running on a Small Bipedal Entertainment Robot," Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3189–3194, 2004.
- [5] K. Harada, S. Kajita, K. Kaneko and H. Hirukawa: "An Analytical Method on Real-time Gait Planning for a Humanoid Robot," Journal of Humanoid Robotics, vol.3, no.1, pp.1–19, 2006
- [6] K. Nishiwaki, S. Kagami, Y. Kuniyoshi, M. Inaba and H. Inoue: "Online Generation of Humanoid Walking Motion based on a Fast generation Method of Motion Pattern that Follows Desired ZMP," Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2684–2689, 2002.
- [7] R. Kurazume, T. Hasegawa and K. Yoneda: "The Sway Compensation Trajectory for a Bipeda Robot," Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automations, pp.925–931, 2003.
- [8] T. Sugihara and Y. Nakamura: "Boundary Condition Relaxation Method for Stepwise Pedipulation Planning of Biped Robots," IEEE Transaction on Robotics, vol.25, no.3, pp.658– 669, 2009.
- [9] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi and H. Hirukawa: "Biped Walking Pattern Generation by using Preview Control of Zero-Moment Point," Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1620–1626, 2003.
- [10] 山口, 高西, 加藤: "上体運動により3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットの開発", 日本ロボット学会誌, vol.11, no.4, pp.581-586, 1993
- [11] 重見, 河口, 吉池, 川辺, 小川: "新型 ASIMO の開発", Honda R&D Technical Review, vol.18, no.1, pp.38–44, 2006.
- [12] T. Takenaka, T. Matsumoto and T. Yoshiike: "Real Time Motion Generation and Control for Biped Robot —3rd Report: Gait Pattern Modification to Compensate Approximated Dynamics Error—," Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009.
- [13] 長阪:動力学フィルタによる人間型ロボットの全身運動生成、東京大学博士課程論文、2000.



竹中 透 (Toru Takenaka)

1983 年東京工業大学大学院修士課程修了(制御工学専攻). 現在(株)本田技術研究所基礎技術研究センター上席研究員. ヒューマノイドロボットマン・マシン・システム等の研究に従事.

(日本ロボット学会正会員)



松本隆志(Takashi Matsumoto)

1991 年東京工業大学工学部機械工学科卒業. 現在 (株) 本田技術研究所基礎技術研究センター主任研 究員. ヒューマノイドロボットの研究に従事.



吉池孝英(Takahide Yoshiike)

1998 年東京大学大学院修士課程修了(機械情報工学 専攻). 1998 年より(株)本田技術研究所基礎技術 研究センター研究員. 2009 年より Honda Research Institute Europe GmbH にて Principal Scientist. ヒューマノイドロボットの運動生成の研究に従事. (日本ロボット学会正会員)