将来にわたる ZMP 許容領域を考慮した オンライン 2 足歩行軌道生成法

西 脇 光 一^{*1*2} 加賀美 聡^{*1*2}

Online Walking Pattern Generation for Bipedal Robots that Considers Future Permissible Region of ZMP

Koichi Nishiwaki^{*1*2} and Satoshi Kagami^{*1*2}

The present paper describes a newly proposed method of planning the CoM trajectory that realizes the desired ZMP. We introduce the permissible ZMP region as well as the desired ZMP trajectory. When the robot suffers from disturbances, the ZMP trajectory desired in the future is adjusted and the future permissible region is used evenly in order to suppress the change of the ZMP at the moment of disturbance. The proposed method is based on the CoM trajectory generation method that uses preview control theory. Simulation results reveal the feasibility of the proposed method. The proposed method is then implemented as a part of walking control system of HRP-2, which generates a walking pattern that starts from the estimated actual robot motion at 40 [Hz]. Walking experiments on unknown terrain are conducted in order to demonstrate the performance of the proposed method.

Key Words: Humanoid, Bipedal Walking, ZMP, Balance Control

1. 緒 言

多自由度、分布質量系の複雑な動力学モデルをもち、高減速比で位置制御に適した駆動系をもつヒューマノイドの歩行の多くは、事前に動的バランスを考慮した位置軌道を生成し、それをセンサフィードバックによりモデル世界と実世界の差を吸収しながら再生することによって実現されてきた (e.g. [1]~[3]). また近年では、オンラインで与えられる目標に従う歩行を実現するために、オンラインで高速に歩行軌道を生成する方法が多数考案されている [4]~[18].

筆者らは、ヒューマノイドの歩行制御において、10 [ms]~40 [ms] といった短い周期で歩行軌道を生成するシステムを開発してきた。生成の初期条件として推定された実際の運動状態を用いることで、歩行軌道生成器が実際の歩行の継続を担う、歩行制御システムを実現した [19]。さらに床反力制御システムと組み合わせることにより、未知の不整地への適応能力の高いシステムを実現してきた [20].

歩行軌道生成手法には、Kajita らにより提案された、予見制御理論に基づき目標 ZMP 軌道を実現する重心軌道生成法 [21]

を用いてきた。目標値追従制御に基づく同手法は、初期値への制約が少ないため、オンラインで推定された運動状態を初期値に用いることができ、また計算コストが低いことから、少ない時間遅れでの高頻度の繰り返し生成が可能となるため、提案手法に適した生成法であるといえる。しかしながら、この手法での生成では、将来の目標 ZMP への追従を図るため、外乱を受け運動状態が目標軌道から変化した際に、生成される軌道の ZMP の目標からの誤差が大きくなりがちである。この点が、同手法をオンラインで歩行継続を担保する制御器として用いる際の問題点として挙げられる。そこで、本論文では、将来にわたる ZMP の許容領域という概念を導入し、予見制御に基づく生成法を拡張し、将来の許容領域を用いることで、外乱を受けた際に生じる、実現される ZMP の目標からの誤差を従来より抑制する方法を提案する。

予見制御理論に基づく軌道生成法を元に将来の目標 ZMP 軌道を変更することで現在のバランス回復を図る方法については、梶田らが歩行速度や着地位置を変更する方法を提案している [22]。筆者らもこの手法に基づき、オンライン歩行制御システムにおいて、着地位置や時刻を変化させることで、胴部や手部にかかる外力 [23] や想定と異なる路面 [24] に適応できることを示してきた。一方、本稿の提案手法では、主に現在の 1 歩の期間中に、ZMP 許容領域を用いて目標 ZMP を変化させる方法を論じる。

与えられた初期条件から定常歩行に到る歩行軌道を生成する際に、事前に設計した修正パターンの拡大・縮小したものを目標 ZMP 軌道に加えることにより、初期条件および定常歩行への

原稿受付 2011 年 12 月 9 日

^{*1}独立行政法人産業技術総合研究所

^{*2}独立行政法人科学技術振興機構, CREST

^{*1}National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

^{*2}Japan Science and Technology Agency, CREST

■ 本論文は有用性で評価されました。

Fig. 1 Results from simulations showing the concept of the proposed method

接続条件を満たす方法が Buschmann ら [14], Takenaka ら [25] により提案されている。歩行軌道の生成手法はまったく異なるが、目標 ZMP 軌道に拡大・縮小した修正パターンを加えることにより、適切な運動軌道を生成するアプローチが本論文と共通する。

Wieber は、歩行軌道生成を二次計画問題として取り扱い、目標 ZMP を領域として取り扱う方法を提案し [26]、オンラインで用いるための高速化の研究も行っている [15]。本稿の手法は、この手法に比べ、計算量が少なく、計算時間が事前に確定している。また、領域に加えて目標軌道を与えることを特徴とする。

提案手法の狙いを具体的に説明するために、予見制御理論を用いた従来手法と提案手法による、前進歩行運動の軌道生成結果の前後方向成分を **Fig. 1** に示す。ここで、ロボットは単質点モデルで表し、重心高さが水平路面から 0.8 [m] であるとした。外乱を受けた結果、時刻 1.2 [s] において、1 生成周期前に決定された軌道による予定位置より、重心が 0.01 [m] 前方に変位し、速度も予定より 0.1 [m/s] 大きいと推定された際の従来手法による生成結果 (左)、および提案手法による生成結果を示す (右)。ここで、目標 ZMP は軌道生成の目標 ZMP であり、実現 ZMP は軌道生成の結果得られる重心軌道により実現される ZMP である。また灰色の領域は今回導入した ZMP の許容領域である。提案手法では、片脚支持の全期間にわたり設定された許容領域を用いることで、外乱を受けた直後に実現される ZMP の目標値からの誤差が、従来法に比べ低減していることが確認できる。

次章で、予見制御理論を用いた軌道生成法について述べたあと、3 章で本稿で提案する将来の許容領域を利用した軌道生成法について述べる。その後、4 章でシミュレーション実験、5 章で実ロボットへの実装と実験について述べる。

2. 予見制御理論を用いた歩行軌道生成

次章での提案手法説明のため、本章では Kajita らにより提案された予見制御理論を用いた目標 ZMP 軌道を実現する重心軌道生成法 [21] について述べる。ロボットを単質点系として扱い、 z 軸を鉛直方向に取った絶対座標系において、 $\mathbf{P} = [p_x, p_y, p_z]^T$, $\mathbf{Q} = [q_x, q_y, q_z]^T$ をそれぞれ ZMP および重心位置とする (**Fig. 2**)。 $\ddot{q}_z = 0$ を仮定すると、 p_x は次のとおり表される。

$$p_x = q_x - \frac{h}{g} \ddot{q}_x \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度、また $h = q_z - p_z$ である。さらに、 h を不変とし、 u_x を $\ddot{q}_x$ の微分 (躍度) とすると、式 (1) は、次のシステムの式で表すことができる。

Fig. 2 Coordinate system for the mass concentrated model

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q_x \\ \dot{q}_x \\ \ddot{q}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_x \\ \dot{q}_x \\ \ddot{q}_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_x \quad (2)$$

$$p_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{h}{g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_x \\ \dot{q}_x \\ \ddot{q}_x \end{bmatrix} \quad (3)$$

これを時間 T で離散化することを考え、時刻 kT から $(k+1)T$ の間の躍度が一定で $u(k)$ であるとする、

$$\mathbf{q}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{q}(k) + \mathbf{B}u(k) \quad (4)$$

$$p(k) = \mathbf{C}\mathbf{q}(k) \quad (5)$$

ただし、

$$\mathbf{q}(k) = \begin{bmatrix} q(kT) & \dot{q}(kT) & \ddot{q}(kT) \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{1}{2}T^2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{6}T^3 & \frac{1}{2}T^2 & T \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{h}{g} \end{bmatrix} \quad (9)$$

となる (添え字 x を省略した)。この系をエラーシステムで表現するため、

$$e(k) = p^{\text{ref}}(k) - p(k) \quad (10)$$

とおく。ここで、 $p^{\text{ref}}(k)$ は、時刻 kT における ZMP の目標値である。

さらに、 Δ を $\Delta x(k+1) = x(k+1) - x(k)$ を表すオペレーターであると定義すると、 $\Delta e(k+1)$ は、

$$\begin{aligned} \Delta e(k+1) &= \Delta p^{\text{ref}}(k+1) - \mathbf{C}\Delta \mathbf{q}(k+1) \\ &= \Delta p^{\text{ref}}(k+1) \\ &\quad - \mathbf{C}\mathbf{A}\Delta \mathbf{q}(k) - \mathbf{C}\mathbf{B}\Delta u(k) \end{aligned} \quad (11)$$

となる。同様に、

$$\Delta \mathbf{q}(k+1) = \mathbf{A}\Delta \mathbf{q}(k) + \mathbf{B}\Delta u(k) \quad (12)$$

となるので、これら 2 式をまとめて、

$$\begin{bmatrix} e(k+1) \\ \Delta \mathbf{q}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\mathbf{CA} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e(k) \\ \Delta \mathbf{q}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\mathbf{CB} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} \Delta u(k) + \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \Delta p^{\text{ref}}(k+1) \quad (13)$$

とし、 $\mathbf{q}^*(k)$ を

$$\mathbf{q}^*(k) = \begin{bmatrix} e(k) \\ \Delta \mathbf{q}(k) \end{bmatrix} \quad (14)$$

と定義する。ここで、評価関数 J を

$$J = \sum_{i=k}^M \{R_1 e^2(i) + R_2 \Delta u^2(i)\} \quad (15)$$

と定義すると (R_1, R_2 は正数)、 N ステップ先まで目標 ZMP を考慮した際、 $M = k + N$ として、評価関数 J を最小にする $\Delta u(k)$ は、次式により与えられる。

$$\Delta u(k) = -\mathbf{G}_x \mathbf{q}^*(k) - \sum_{j=1}^N G_p(j) \Delta p^{\text{ref}}(k+j) \quad (16)$$

ここで、 $\mathbf{G}_x$ および $G_p(j)$ は、 R_1, R_2 、および h/g から予見制御理論を用いて計算される。

この方法を推定された重心の運動状態を始点として、時間方向に繰り返し適用することにより、オンラインで運動軌道を生成することができる。なお、 y 軸方向運動についても同様に生成することができる。

3. 将来にわたる ZMP 許容領域を考慮した軌道生成法

将来の目標 ZMP 軌道を許容領域の形状に応じて変形させることで、外乱により生じる ZMP の目標からの大きな誤差を抑制する方法について、本章で述べる。なお、本章でも引き続き x 軸成分について述べるが、 y 軸成分についても同様に軌道生成を行うことができる。

各サンプリング時刻 ($l = k, k+1, k+2, \dots$) において、目標 ZMP に加え、次のような許容範囲を導入する。

$$p^{\text{ref}}(l) + p_-^{\text{ref}}(l) \leq p(l) \leq p^{\text{ref}}(l) + p_+^{\text{ref}}(l) \quad (17)$$

各時刻の許容範囲は、対応する時刻の接地領域を考慮して決定される。ある片脚支持期における設計例を **Fig. 3** に示す。

ここで、時刻 k における運動状態が与えられたとき、予見制御に基づく方法による生成の結果、時刻 $k+1$ において実現される ZMP が目標 ZMP ($p^{\text{ref}}(k+1)$) より大きい (正の誤差をもつ) としたとき、目標 ZMP 軌道を $p^{\text{ref}}(l)$ から $p^{\text{ref}}(l) + rp_+^{\text{ref}}(l)$ に変更して、この誤差を打ち消すことを考える。

変更量を決定する係数 r を導出するため、目標 ZMP 軌道を $p^{\text{ref}}(l)$ から $p^{\text{ref}}(l) + rp_+^{\text{ref}}(l)$ に変更した際に時刻 $k+1$ において実現される ZMP の変化を考察する。以下の数式で、右肩にダッシュを付けた変数は目標 ZMP 軌道を $p^{\text{ref}}(l) + rp_+^{\text{ref}}(l)$ として計算した場合の値を示す。

Fig. 3 Reference and permissible region of ZMP

$\Delta p^{\text{ref}}(l)$ は、

$$\begin{aligned} \Delta p^{\text{ref}}(l) &= \left(p^{\text{ref}}(l) + rp_+^{\text{ref}}(l) \right) \\ &\quad - \left(p^{\text{ref}}(l-1) + rp_+^{\text{ref}}(l-1) \right) \\ &= \Delta p_x^{\text{ref}}(l) + r \Delta p_+^{\text{ref}}(l) \end{aligned} \quad (18)$$

と変化し、 $\mathbf{q}^*(k)$ は、

$$\begin{aligned} \mathbf{q}^*(k) &= \begin{bmatrix} p^{\text{ref}}(k) + rp_+^{\text{ref}}(k) - p(k) \\ \Delta \mathbf{q}(k) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} e(k) + rp_+^{\text{ref}}(k) \\ \Delta \mathbf{q}(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

となるので、 $\Delta p^{\text{ref}}(l)$ および $\mathbf{q}_x^{*'}(k)$ を式 (16) に代入すると、

$$\begin{aligned} \Delta u'(k) &= \Delta u(k) \\ &\quad + r \left(-G_{x,1} p_+^{\text{ref}} - \sum_{j=1}^N G_p(j) \Delta p_+^{\text{ref}}(k+j) \right) \end{aligned} \quad (20)$$

を得る。ここで、 $G_{x,1}$ は、 $\mathbf{G}_x$ の第 1 列。よって、時刻 $k+1$ における ZMP は、

$$\begin{aligned} p'(k+1) &= \mathbf{C} \mathbf{q}'(k+1) \\ &= \mathbf{C} \mathbf{A} \mathbf{q}(k) + \mathbf{C} \mathbf{B} u'(k) \\ &= \mathbf{C} \mathbf{A} \mathbf{q}(k) + \mathbf{C} \mathbf{B} (u(k) + \Delta u'(k) - \Delta u(k)) \\ &= p(k+1) \\ &\quad + r \mathbf{C} \mathbf{B} \left(-G_{x,1} p_+^{\text{ref}}(k) - \sum_{j=1}^N G_p(j) \Delta p_+^{\text{ref}}(k+j) \right) \end{aligned} \quad (21)$$

と変化する。ここで、 $\kappa_+(k)$ を

$$\kappa_+(k) = \mathbf{C} \mathbf{B} \left(-G_{x,1} p_+^{\text{ref}}(k) - \sum_{j=1}^N G_p(j) \Delta p_+^{\text{ref}}(k+j) \right) \quad (22)$$

と定義すれば、式 (21) は、

$$p'(k+1) = p(k+1) + r\kappa_+(k) \quad (23)$$

となる。

以上で、目標 ZMP を $p^{\text{ref}}(l) + rp_+^{\text{ref}}(l)$ に変更した際に、運動軌道生成の結果実現される ZMP の時刻 $k+1$ における変化が求められた。この関係を用いて、 r を調節することにより、時刻 $k+1$ における目標 ZMP のトラッキングエラーを解消することを考える。すなわち、 r は次の関係式を満たす必要がある。

$$\begin{aligned} p'(k+1) &= p^{\text{ref}}(k+1) + rp_+^{\text{ref}}(k+1) \\ p(k+1) + r\kappa_+(k) &= p^{\text{ref}}(k+1) + rp_+^{\text{ref}}(k+1) \\ r &= \frac{p(k+1) - p^{\text{ref}}(k+1)}{p_+^{\text{ref}}(k+1) - \kappa_+(k)} \end{aligned} \quad (24)$$

ここまでの議論は $e(k+1) = p^{\text{ref}}(k+1) - p(k+1) < 0$ 、すなわち時刻 $k+1$ において実現される ZMP の目標からの誤差が正の場合について適用できるものであるが、 $e(k+1) > 0$ の場合の r も同様にして次のとおり求めることができる。

$$r = \frac{p(k+1) - p^{\text{ref}}(k+1)}{p_-^{\text{ref}}(k+1) - \kappa_-(k)} \quad (25)$$

ここで、

$$\kappa_-(k) = \mathbf{CB} \left(-G_{x,1}p_-^{\text{ref}}(k) - \sum_{j=1}^N G_p(j)\Delta p_-^{\text{ref}}(k+j) \right) \quad (26)$$

これで、各時刻において次のサンプリング時刻の実現 ZMP の誤差を打ち消すように目標 ZMP 軌道を変更するための係数 r を計算する方法が得られた。これを用いて、運動軌道を生成する方法を **Fig. 4** を用いて説明する。軌道生成の開始時刻を mT とし、初期条件として同時刻における重心の運動状態、すなわち $q(mT)$ 、 $\dot{q}(mT)$ 、および $\ddot{q}(mT)$ が与えられるとする。実際のロボットへの実装では、 $q(mT)$ および $\dot{q}(mT)$ は実際の運動状態から推定する一方で、重心の加速度 ($\ddot{q}(mt)$) については指令どおりに実現されていると仮定し、前回に生成された軌道の対応する時刻の値を初期条件として採用した。次に、 $\Delta \mathbf{q}(m)$ および $u(m-1)$ は、

$$\Delta \mathbf{q}(m) = \begin{bmatrix} \dot{q}(mT)T & \ddot{q}(mT)T & 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$u(m-1) = 0 \quad (28)$$

と仮定した。

各時刻における重心の運動状態は、1 サンプリング時刻前の運動状態を用いて、順に決定される。すなわち時刻 kT における重心の運動状態 $q(kT)$ 、 $\dot{q}(kT)$ 、 $\ddot{q}(kT)$ 、および $u(k-1)$ が与えられた際、時刻 $(k+1)T$ における重心の運動状態は次の手順で計算される。

1. 当初設計された目標 ZMP 軌道 $p^{\text{ref}}(l)$ を用いて従来の予見制御に基づく方法により $u(k)$ を計算 (式 (16) および $u(k-1)$ を利用)。
2. 計算された $u(k)$ を用いて $\mathbf{q}(k+1)$ を求める。
3. $e(k+1)$ を評価する。

Fig. 4 Procedure for generating the com with simultaneous ZMP planning

4. $e(k+1)$ が負の場合：
 - a. 式 (24) を用いて r を計算する。
 - b. 目標 ZMP 軌道を $p^{\text{ref}}(l) + rp_+^{\text{ref}}(l)$ に変更する ($l = k, k+1, k+2, \dots$)。
5. $e(k+1)$ が正の場合：
 - a. 式 (25) を用いて r を計算する。
 - b. 目標 ZMP 軌道を $p^{\text{ref}}(l) + rp_-^{\text{ref}}(l)$ に変更する ($l = k, k+1, k+2, \dots$)。
6. 変更された目標 ZMP 軌道を用いて $u(k)$ を再計算する。
7. 再計算された $u(k)$ を用いて $\mathbf{q}(k+1)$ を求める。

ここで、生成過程において、 r が 1 より大きくなった場合は、与えられた初期条件からは、許容領域内に ZMP がとどまる軌道が生成できないことを意味する。

すなわち、Fig. 3 のように現在の 1 歩の着地領域のみに対して許容領域を設定した場合には、 r が 1 以下の場合には、その許容領域を用いて 1 歩の間にバランスを回復し、次の 1 歩からは目標 ZMP 軌道を実現する重心軌道を生成できることを意味する。一方、 r が 1 より大きい場合には、許容領域内では次の 1 歩から目標 ZMP 軌道に復帰する重心軌道を生成できないことを意味する。

4. シミュレーション実験

本章では質点集中モデルに位置、速度の想定からの変化として外乱を与えた際の軌道生成例を示す。重心高さ h は、0.8 [m] で一定とし、サンプリング時間 T は、0.01 [s] とした。

Fig. 5 は、歩幅 0.25 [m] の前進歩行における前後方向軌道の

Fig. 5 Generation results with a simulated disturbance while walking forward

生成例である。目標 ZMP は、片脚支持期中は足底部の中心に固定し、両脚支持期中に次の支持脚の足底部中心に等速移動するよう設計した。なお、片脚支持期間および両脚支持期間はそれぞれ、0.9 [s]、0.1 [s] とした。時刻 1.2 [s] における ZMP の許容領域を図中に灰色領域で示す。ここで片脚支持期中は、 $p_{+}^{\text{ref}}(l)$ および $p_{-}^{\text{ref}}(l)$ をそれぞれ 0.1 [m]、-0.1 [m] とし、両脚支持期中にこれらが 0 に収束するような領域として設計した（前後方向の長さ 0.2 [m] の長方形接地領域を有する足部を想定している）。ここで、時刻 1.2 [s] に外乱により、前回生成された軌道から位置で 0.01 [m]、速度で 0.2 [m/s] の誤差を生じたと仮定した。実際の不整地歩行では、生成した重心軌道が完全に実現されることはないので、毎回の軌道生成において、前回の軌道生成からの誤差を持つが、ここでは、軌道生成の挙動を分かりやすく示すため、着目時刻の前回の軌道生成までは理想どおりに重心軌道が実現され、今回の軌道生成までの間に重心軌道が突然ずれたような状況を示す。この例において、従来手法を用いた場合には、生成された重心軌道により実現される ZMP が、バランス回復のため、許容領域から外に出ている。一方、提案手法を用いた場合には、実現される ZMP は、許容領域内にとどまり、外乱を受けたあとの片脚支持期全期にわたって、ほぼ平坦となっている。さらに、時刻 2 [s] に始まる次の 1 歩における、目標 ZMP への追従も提案手法のほうが優っている。これは、提案手法では、外乱により生じた追従誤差が 1 歩内の目標 ZMP 変更により完全に補償されるためである。

また提案手法を用いることにより、許容領域内で目標 ZMP を変更することで、次の 1 歩から当初の目標 ZMP 軌道に復帰する軌道を生成できるか否かを見積もることができる。これは、着地位置や時刻の変更を必要とするかどうかの決定に役立つ。

次につま先リンクを用いた歩行を想定した、歩幅 0.35 [m] の前進歩行における生成例を **Fig. 6** に示す。目標 ZMP は、片脚支持期中に後方から前方へ移動し、許容領域（灰色領域）も片脚支持期中に変化する。片脚支持期間および両脚支持期間は前の生成例と同一である。目標 ZMP が許容領域の境界に近い期間は、従来手法において特にバランスを崩しやすい期間である。そこで、時刻 1.1 [s] において、外乱により生成された軌道より、重心が 0.01 [m] 後方に変位し、速度も -0.1 [m/s] の誤差が生じていたと仮定して、軌道生成を行った。従来手法による生成で

Fig. 6 Generation results with simulated disturbance while walking forward (Moving reference ZMP)

は、生成の結果実現される ZMP は許容領域外となるが、提案手法では、将来の許容領域を用いることで、許容領域内に ZMP がとどまる軌道を生成することができた。また、外乱がない場合は、提案手法で生成された運動軌道においても、非常によく目標 ZMP 軌道に追従する。これは、許容領域と同時に目標軌道を与えられる提案手法の利点の一つである。

5. 等身大ヒューマノイドへの実装と実験

提案手法を従来より開発してきた等身大ヒューマノイド HRP-2 のオンライン歩行制御システム [20] の一部として実装し、評価を行った。

5.1 不整地適応オンライン歩行制御システム

文献 [20] で提案したオンライン歩行制御システムの概要を **Fig. 7** に示す。同図の Walking Pattern Generation 部に提案手法を実装した。絶対座標系におけるロボットの運動状態は、1 [ms] 周期のセンサフィードバックループ内で、姿勢角センサおよび前周期で指令した腰部・足部位置を用いて推定され、40 [ms] 周期の軌道生成の初期条件となる重心の運動状態はこれらを用いて計算される。軌道生成の結果として、腰部および足部の運動速度に加えて、目標床反力がセンサフィードバックループに与えられる。センサフィードバックループでは、足部について目標の位置軌道を実現するのではなく、目標床反力を得ようとするにより、地形形状に想定から多少の差異が存在しても、軌道生成の結果として実現されるべき ZMP を満足し、目標重心軌道の実現を図る。床反力制御は、足部に実装した 6 軸力計を用いて、足部位置・姿勢の各要素について、バネ定数 0 のインピーダンス制御を行うことにより実現している。目標床反力制御性能には限界があり、また接地領域も想定どおりとは限らないため、重心軌道を目標どおり完全に実現することはできないが、その乖離はオンラインで軌道が再度生成される際に考慮される。

5.2 許容領域の設計

片脚支持期に提案手法を適用することとし、足部の接地形状を長方形と近似して、その直交 2 辺に平行な座標系を設定して、軌道生成を行った (**Fig. 8**)。Fig. 8 に示すように、時刻 mT から $T_e - \alpha$ までの間、許容領域は接地領域の幅にマージンを設

Fig. 7 Overview of the walking control system

Fig. 8 Design of the permissible region using the stance foot local coordinate system

定した一定の幅とし、時刻 $T_e - \alpha$ から T_e の間に、線形に 0 へと減少させた。ここで、 mT は生成開始時刻、 T_e は片脚支持期の終了時刻であり、本論文では、 α は 0.1 [s] とした。なお、両脚支持期には予見制御に基づく従来の軌道生成法を採用した。

ここで両脚支持期においても許容領域を設計し、提案手法を適用することも考えられる。その際には、片脚支持期の終了時刻に許容領域の幅を 0 にする必要がなくなるものの、接地領域形状が座標軸と平行でなくなるため、 x 軸と y 軸の干渉を考慮した許容領域形状設計が必要となる。そこで本論文では、許容領域を片脚支持期のみとし、両脚支持期を含む許容領域形状設計は今後の課題とする。

5.3 未知路面の歩行実験

0.08 [rad] の上り斜面でその場足踏みをした際の ZMP の前後方向成分を Fig. 9, 10 に示す。Fig. 9 が予見制御に基づく従来の方法、Fig. 10 が提案手法を適用した場合である。図中、Original Ref. が計画された目標 ZMP で、許容領域 (Designed Limits) とともに歩行軌道生成器への入力である (従来手法では許容領域は考慮されないが、比較のため図中に示してある)。実現 ZMP (Generated ZMP) は、生成された重心軌道により実現される ZMP であり、実際の歩行では床反力制御の目標値として利用される。計測 ZMP (Measured ZMP) は、両脚の足首部の 6 軸力計により計測された床反力から算出された ZMP

Fig. 9 Walking on an unknown forward slope (Standard generation method)

Fig. 10 Walking on an unknown forward slope (Proposed generation method)

である。

路面は水平で立脚足部と同じ高さにあると仮定し、歩行軌道生成・制御を行った。このため、足部は水平に着地し、つま先部が最初に接地する。その結果として、着地直後に、重心は生成された軌道より後方に移動する。従来手法を適用した場合では、軌道生成の結果実現される ZMP が着地直後に計画 ZMP より急峻に後方に移動して、バランスの回復を図り、その後、片脚支持期の中央付近で実現 ZMP が計画 ZMP 付近に回復している。一方、提案手法を用いた場合では、実現 ZMP の後方への移動量は、従来手法に比べ抑制され、片脚支持期間の全期間を使ってバランスを回復している。

この路面では、つま先部が最初に接地するため、実際の接地多角形は、ZMP の許容領域より小さくなる。実現 ZMP が接地多角形外となった際には、インピーダンス制御の結果として、実現 ZMP での接地を得ようと足部が回転する。すなわち、本論文での許容領域の設定法は、足部を回転すれば許容領域内の任意の点を床反力中心 (計測 ZMP) とできることを期待している。接地可能領域をオンラインで推定する方法がある場合、あるいは階段等で足部を故意に縁から出して接地させるような場合には、これとは異なる許容領域設計法が適していると考えられる。

次に、各足をそれぞれ内側に 0.17 [rad] 傾いた異なる斜面に乗

Fig. 11 Photographs of the experiments of walking on unknown slopes

Fig. 12 Walking on an unknown sideward slope (Standard generation method)

Fig. 13 Walking on an unknown sideward slope (Proposed generation method)

せた状態での足踏み実験について述べる。実験の様子を Fig. 11 (左) に、ZMP の左右方向成分を Fig. 12, 13 に示す。Fig. 12 が予見制御に基づく従来の方法、Fig. 13 が提案手法を適用した場合である。実験条件は、前の実験と同様であり、本実験においても提案手法を用いた場合には、実現 ZMP の急激な移動が抑制され、1 歩の全期間にわたり当初の目標より内側に実現 ZMP を置くことでバランス回復を図っていることが観察される。なお、単脚支持期の最後の方で実現 ZMP が外側に動くのは、遊脚が予定より早く着地しているためである。

Fig. 14 Forward walking on an unknown forward slope (Standard generation method)

Fig. 15 Forward walking on an unknown forward slope (Proposed generation method)

最後に 0.17 [rad] の上り坂を歩幅 0.2 [m]、1 歩 0.9 [s] で前進歩行した際の実験結果について述べる (Fig. 11 (右) に実験の様子を示す)。路面形状は未知であるとし、足踏み歩行実験同様、次の着地位置には、前の着地位置と同じ高さの水平路面があると仮定して、歩行制御を行った。ただし、遊脚が前方移動中に路面と接触することを避けるため、遊脚足部の最高高さを 0.15 [m] に変更した。遊脚足部は、片脚支持期の 85% の時刻に想定着地位置の直上に達し、姿勢も想定着地姿勢と同じ (本実験では水平) となる。その後、文献 [20] の着地準備相に移行し、予定着地時刻に予定着地高さの 0.01 [m] 下方に達するような、鉛直下方への等速運動を行い、着地を検知したあと、 50 [ms] をかけて目標速度 0 となる (詳細は、文献 [20])。また、許容領域は、足底部中心より前後 0.111 [m] とし、片脚支持期の最後の 0.1 [s] を使って計画 ZMP に収束する形とした (ここで、6 軸力計により求められる計測 ZMP の誤差等を考慮し、許容領域は実際の足部支持多角形より小さく設定している)。Fig. 14 および Fig. 15 にそれぞれ、従来手法および提案手法を適用した場合の前後方向の ZMP の挙動を示す。従来手法では、実現された ZMP 軌道は着地後バランス回復のため大きく後退し、許容領域境界付近に達し、その後、片脚支持期の中間付近で、目標に回復している。一方で、提案手法では、片脚支持期全期間を使ってバランス回復を行っていることが分かる。なお、セン

サフィードバックによる床反力制御においては、ZMP が接地領域外になるような目標値は自動的に修正される設計としているので、実現 ZMP が接地領域外となっても、ただちに転倒することはないが、目標の床反力が得られないため生成された運動と実際の運動との間に乖離が生じる。

通常未知路面における歩行制御では、大きな外乱は片脚支持期の初期に発生するため、このような許容領域設計法による提案手法の適用は有効な方法であると考ええる。

6. 結 言

本稿では、外乱に対して頑健なオンライン歩行軌道生成を行う方法として、予見制御に基づく方法を拡張し、将来の許容 ZMP 領域を考慮した歩行軌道生成法を提案した。将来の ZMP 変更許容領域を活用することにより、外乱を受けた際に生成される運動軌道の結果実現される ZMP の変化を抑制することが可能である。またシミュレーションおよび実機での実験を通じて、提案手法の妥当性を示した。本手法は、1 歩内でのバランス回復の可否を精度よく見積もる方法である。そこでこの特性を活かし、今後、次の 1 歩の着地位置変更や着地時刻変更と組み合わせた歩行制御システム構築法について研究する。また、両脚支持期を含めた許容領域設計法の研究も今後の課題である。

参 考 文 献

- [1] K. Hirai: "Current and future perspective of Honda humanoid robot," Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.500-508, 1997.
- [2] J. Yamaguchi, S. Inoue, D. Nishino and A. Takanishi: "Development of a bipedal humanoid robot having antagonistic driven joints and three DOF trunk," Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.96-101, 1998.
- [3] K. Nagasaka, M. Inaba and H. Inoue: "Walking pattern generation for a humanoid robot based on optimal gradient method," Proc. of Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, pp.908-913, 1999.
- [4] S. Setiawan, S. Hyon, J. Yamaguchi and A. Takanishi: "Physical interaction between human and a bipedal humanoid robot - realization of human-follow walking-", Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.361-367, 1999.
- [5] K. Nishiwaki, T. Sugihara, S. Kagami, M. Inaba and H. Inoue: "Realtime generation of humanoid walking trajectory by mixture and connection of pre-designed motions - online control by footprint specification -, Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.4110-4115, 2001.
- [6] K. Yokoi, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, S. Kajita and H. Hirukawa: "A Honda humanoid robot controlled by aist software," Proc. of Int. Conf. on Humanoid Robots, pp.259-264, 2001.
- [7] 金島, 菅原, 安藤, 佐藤, 林, 高西: "2 足ヒューマノイドロボットの準リアルタイムパターン生成に関する研究", 第 19 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集 CD-ROM, pp.987-988, 2001.
- [8] 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," Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2684-2689, 2002.
- [9] K. Löffler, M. Gienger and F. Pfeiffer: "Sensor and control design of a dynamically stable biped robot," Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.484-490, 2003.
- [10] K. Harada, S. Kajita, K. Kaneko and H. Hirukawa: "An analytical method on real-time gait planning for a humanoid robot," Proc. of Int. Conf. on Humanoid Robots, no.60, 2004.
- [11] T. Sugihara and Y. Nakamura: "A fast online gait planning with boundary condition relaxation for humanoid robots," Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.306-311, 2005.
- [12] I. Park, J. Kim, J. Lee and J. Oh: "Online free walking trajectory generation for biped humanoid robot KHR-3 (HUBO)," Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2667-2672, 2006.
- [13] K. Harada, S. Kajita, K. Kaneko and H. Hirukawa: "An Analytical Method on Real-time Gait Planning for Humanoid Robots," International Journal of Humanoid Robotics, vol.3, no.1, pp.1-19, 2006.
- [14] T. Buschmann, S. Lohmeier, M. Bachmayer, H. Ulbrich and F. Pfeiffer: "A collocation method for real-time walking pattern generation," Proc. of Int. Conf. on Humanoid Robots, pp.1-6, 2007.
- [15] D. Dimitrov, J. Ferreau, P. Wieber and M. Diehl: "On the implementation of model predictive control for on-line walking pattern generation," Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2685-2690, 2008.
- [16] T. Sugihara and Y. Nakamura: "Boundary Condition Relaxation Method for Stepwise Pedipulation Planning of Biped Robots," Trans. on Robotics, vol.25, no.3, pp.658-669, 2009.
- [17] H. Kondo, J. Shimizu, K. Hashimoto, K. Hattori, Y. Takezaki, K. Nishikawa, Y. Hama, Y. Yoshimura, H. Lim and A. Takanishi: "Realization of Walking by FFT-based Online Pattern Generation," Proc. of Intl. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, pp.615-622, 2009.
- [18] A. Herdt, H. Diedam, P. Wieber, D. Dimitrov, K. Mombaur and M. Diefl: "Online Walking Motion Generation with Automatic Footstep Placement," Advanced Robotics, vol.24, no.5-6, pp.719-737, 2010.
- [19] K. Nishiwaki and S. Kagami: "High frequency walking pattern generation based on preview control of ZMP," Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2667-2672, 2006.
- [20] 西脇, 加賀美: "推定絶対運動状態を始点とする短周期軌道生成を用いたヒューマノイドの不整地適応歩行制御", 日本ロボット学会誌, vol.29, no.1, pp.111-121, 2011.
- [21] 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," Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1620-1626, 2003.
- [22] 梶田, 森澤, 原田, 金子, 金広, 藤原, 比留川: "未来 ZMP 調整に基づく適応的な歩行パターン生成", 第 23 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 2G16, 2005.
- [23] K. Nishiwaki and S. Kagami: "High frequency dynamically stable walking pattern generation that enables change of foot placement during the step," Proc. of Int. Symp. on Robot Control, R-125, 2006.
- [24] K. Nishiwaki and S. Kagami: "Strategies of adjusting zmp reference trajectory for the balance maintenance of humanoid walking," Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.4230-4236, 2010.
- [25] T. Takenaka, T. Matsumoto and T. Yoshiike: "Real time motion generation and control for biped robot -1st report: Walking pattern generation-, Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1084-1091, 2009.
- [26] P. Wieber: "Trajectory free linear model predictive control for stable walking in the presence of strong perturbations," Proc. of Int. Conf. on Humanoid Robots, pp.137-146, 2006.

西脇光一 (Koichi Nishiwaki)

2002 年東京大学大学院工学系研究科機械情報工学専攻博士課程修了。博士 (工学)。同年 4 月東京大学大学院情報理工学系研究科科学技術振興特任教員。2004 年 4 月産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター研究員。2010 年 4 月より同デジタルヒューマン工学研究センター研究員。2010 年 10 月同主任研究員となり現在に至る。 (日本ロボット学会正会員)

加賀美聡 (Satoshi Kagami)

1997 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。博士 (工学)。同年より日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「マイクロ・ソフトメカニクス統合体としての高度生体機能機械の研究」プロジェクトにより東京大学リサーチアソシエート。2001 年産業技術総合研究所に新設されたデジタルヒューマン研究ラボに主任研究員として入所。2003 年改組によりデジタルヒューマン研究センター・ヒューマノイドインタラクションチームの研究チーム長。2009 年副センター長。2010 年改組によりデジタルヒューマン工学研究センターの副研究センター長。ロボットの認識・計画・制御とそのリアルタイムシステムの研究に従事。

(日本ロボット学会正会員)