ヒューマノイドロボットの脚腕協調におけるZMP解析

原 田 研 介* 梶 田 秀 司* 金 広 文 男* 藤 原 清 司*
金 子 健 二* 横 井 一 仁* 比 留 川 博 久*

ZMP Analysis of a Humanoid Robot under Coordination of Arms and Legs

Kensuke Harada*, Shuuji Kajita*, Fumio Kanehiro*, Kiyoshi Fujiwara*,
Kenji Kaneko*, Kazuhito Yokoi* and Hirohisa Hirukawa*

This paper discusses the analysis of the ZMP (Zero Moment Point) of a humanoid robot under coordination of two arms and two legs. We show that there are two kinds of ZMPs for such coordination tasks, i.e., the conventional ZMP considering all sources of the force/moment acting in the foot supporting area, and the “Generalized Zero Moment Point (GZMP)” which is a generalization of the conventional ZMP. By projecting the edges of the convex hull of the supporting points onto the floor, we show that the position and the region of the GZMP for keeping the dynamical balance can be uniquely obtained. We also show that there are edges of the convex hull where the robot can roll around the edge. The effectiveness of the proposed method is shown by some simulation results.

Key Words: Humanoid Robot, ZMP, Coordination of Arms and Legs

1. 緒 言

ヒューマノイドロボットは、ヒトと同様に2本のアームと2本の脚を有しており、ヒトと同じ作業環境でヒトの代わりに作業することが期待されている。従来、ヒューマノイドロボットに関する研究は、そのハードウェアデザインや、歩行やバランス維持といった基礎的動作の実現に重点が置かれてきた[1]~[4]。しかしながら、ヒューマノイドロボットが実環境で作業を遂行するためには、手先で対象物や環境と接触しながら歩行するなどといった腕と脚の協調動作（脚腕協調動作）を実現させることが必要となる。このとき、ロボットが転倒することなしに計画された動作を実行可能とする条件について考える。

まず、ロボットの手先が対象物や環境と接触しない場合に、ロボットの足裏が床面との接地を保つために用いられる概念としてZMP (Zero Moment Point) [11] がある。ZMPとは、ロボットが運動することによって、床面上のある作用点に発生する力とモーメントの合計を考えたとき、モーメントの床面に対して平行な成分が0となる点として定義される。ZMPが足裏支持領域が形成する凸包の内部に含まれる限り足裏の接地が維持される。本論文では、ロボットが転倒することなしに計画された動作が実行可能な、床面上でのZMPの領域を安定領域と呼ぶ

Fig. 1 Tasks of the coordination of arms and legs

ことにする。

次に、ヒューマノイドロボットが手先で環境や対象物と接触している場合に、手先が対象物や環境と接触していない場合と比較して困難な点について考える。まずFig. 1 (a)では、ヒューマノイドが歩きながら手先で対象物と接触している。このとき、接触状態が時々刻々変化することになり、接触状態の変化する前後においてZMPの軌道を計画するためには工夫が必要であ

原稿受付 2002年12月10日

*産業技術総合研究所

*National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

る。また、Fig. 1 (b) では、ヒューマノイドロボットが対象物を引いている。このような場合、ZMP がどのような範囲に存在すればロボットが安定であるか定義することは直感的に困難であると考えられる。そこで本研究では、これらの場合も含むような、ヒューマノイドロボットの脚腕協調に対する一般的な ZMP (一般化 ZMP) を構成することを目的とする。

Fig. 1 (c) に本論文で提案する手法の概要を示す。この手法では、一般化 ZMP やその安定領域を単一の面上に投影することで一意に求める。まず、手先が対象物や環境と接触しないヒューマノイドの場合に足裏支持領域の凸包を定義したように、手先と対象物や環境との接触点も考慮に入れた支持領域の凸包を求める。次に、この凸包の稜線に着目し、凸包を構成する稜線のうちに、転倒に関係する稜線のみを抽出する。さらに、稜線まわりのモーメントに着目し、この稜線を単一面に投影することで、様々な脚腕協調作業に対して ZMP の概念が拡張される。本論文では、まず第 2 章で従来研究との比較を述べた後、第 3 章で一般化 ZMP を定義し、定式化する。第 4 章では一般化 ZMP の安定領域を求める方法について述べる。最後に第 5 章では数値例を示す。

2. 関連研究

ヒューマノイドロボットに関する研究として、Inaba ら [1] は“remote-brain”と呼ばれる手法を提案した。Hirai ら [2], Kagami ら [3], Konno ら [4] はヒトと同等なサイズのヒューマノイドロボットを開発し、歩行やバランス制御などの基礎的動作を実現させた。また、Inoue ら [5] は HRP (Humanoid Robotics Project) を組織し、ヒューマノイドロボットを開発すると共に、実環境に適用できるようなロボットの動作アルゴリズムの研究を行っている。HRP の一環として Kaneko ら [6] は、HRP-2P と呼ばれる股関節に片持ち構造を有し背中にバックパックを持たないヒトと同等なサイズのヒューマノイドロボットを開発した。

ヒューマノイドロボットの運動学や運動制御に関する研究として、山根ら [7] は計画された動作を動力学的に整合したものに変換する Dynamics Filter と呼ばれる概念を提案した。Kajita らは線形倒立振子モードに基づいた二次元 [9] や三次元 [10] の歩行動作生成手法を提案した。井上ら [8] はヒューマノイドロボットの脚腕協調作業において、手先の可操作性を考慮したロボットの姿勢を決定する手法を提案した。竹中 [17] は手先に受ける反力に応じてヒューマノイドロボットの胴体の位置を補償する手法を提案した。

多脚式歩行ロボットが転倒せず安定に動作を実現するための評価指標として、Vukobratovic ら [11] は ZMP (Zero Moment Point) を提案した。また、Goswami [12] は FRI (Foot Rotation Indicator) と呼ばれる概念を提案した。ZMP は平地での歩行に対して定義されたのに対して、米田ら [13] は転倒安定性と呼ばれる概念を提案した。転倒安定性では、足裏の接地部によって構成される支持多角形の境界線まわりに働くモーメントがすべて安定な方向のモーメントであれば、ロボットが転倒しないことが保証される。北川ら [15] はヒューマノイドロボットの脚腕協調作業に対して、拡張 ZMP (Enhanced ZMP) と呼

ばれる概念を提案した。才田ら [14] は ZMP ではなく接触点で働く Wrench に着目した概念である FSW (Feasible Solution of Wrench) を提案した。しかしながら、緒言で述べたように脚腕協調の様々な形態に対して一般化することを目指した研究は現在まで行われていない。

3. 定義

Fig. 2 に、ヒューマノイドロボットが手先で対象物や環境と接触しながら作業を行うモデルを示す。ここで、手先は対象物と点接触しており、足裏は床面と面接触していると仮定する。 Σ_R は基準座標系であり、 Σ_i は第 i リンク ($i = 1, \dots, n$) に固定された座標系を表す。 Σ_R に関する位置ベクトルについて、 $\mathbf{p}_{Hj} (= [x_{Hj} \ y_{Hj} \ z_{Hj}]^T)$ ($j = 1, 2$) は手先、 $\mathbf{p}_{Fj} (= [x_{Fj} \ y_{Fj} \ z_{Fj}]^T)$ ($j = 1, 2$) は各足裏の支持領域における代表点、 $\mathbf{p}_i (= [x_i \ y_i \ z_i]^T)$ は Σ_i の原点を表す。また、 $\mathbf{p}_{Fjk}$ ($j = 1, 2, k = 1, \dots, K$) は各足裏の支持領域を構成する多角形の頂点を表す。また、 $\mathbf{p}_G (= [x_G \ y_G \ z_G]^T)$ はロボットの重心を表す位置ベクトルであり、 $\mathbf{p}_G = \sum_{i=1}^n m_i \mathbf{p}_i / \sum_{i=1}^n m_i$ のように定義される。さらに、 $\mathbf{p}_P (= [x_P \ y_P \ z_P]^T)$ 、 $\mathbf{p}_E (= [x_E \ y_E \ z_E]^T)$ は ZMP、ならびに提案する一般化 ZMP の位置を表すベクトルである。 $\mathbf{f}_{Hj} (= [f_{Hjx} \ f_{Hjy} \ f_{Hjz}]^T)$ は各手先が受ける反力を表し、 $\mathbf{f}_{Fj}$ 、 $\boldsymbol{\tau}_{Fj}$ ($j = 1, 2$) は各足裏が受ける力・モーメントを表すベクトルである。また、 $\mathbf{f}_P$ 、 $\boldsymbol{\tau}_P$ 、および $\mathbf{f}_E$ 、 $\boldsymbol{\tau}_E$ は、それぞれ ZMP、および一般化 ZMP でロボットが受ける力・モーメントを表すベクトルである。なお、図ではモーメントを二重矢印で表している。 $\mathbf{n}_F$ は床面の外向き単位法線ベクトルを表し、 $\mathbf{n}_{Hj}$ ($j = 1, 2$) は手先が接触する環境や対象物の表面における外向き単位法線ベクトルを表す。 $\mathbf{I}_i$ 、 $\boldsymbol{\omega}_i$ はそれぞれ第 i リンクの基準座標系に関する慣性テンソル、角速度ベクトルを表す。なお本論文では、手先と対象物との接触は点接触とし、また、手先と足先の接触点間に働く内力の影響は無視することにする。また、滑りの影響も無視する。

まず、ヒューマノイドロボットの手先が対象物や環境と接触

Fig. 2 Model of the system

する場合のZMPについて考える。ZMPとは足裏と床との支持領域における圧力中心である[12]。つまり、ZMPを求めるためには、足裏支持領域が受ける力・モーメントを発生させる要素をすべて考慮する必要がある。手先が環境や対象物と接触する場合、足裏支持領域が受ける力・モーメントを発生させる要素は、ロボットを加速するのに要する力、重力、ならびに手先反力である。つまり、ヒューマノイドロボットの脚腕協調動作においてZMPは以下のように再定義される。

定義 1 (Zero Moment Point (ZMP))

ZMPは、ロボットを加速するのに要する力、重力、ならびに手先反力が床面上に作用点を仮定した力とモーメントで表現されたとき、モーメント成分 $\tau_P = [\tau_{Px} \ \tau_{Py} \ \tau_{Pz}]^T$ のうち $\tau_{Px} = \tau_{Py} = 0$ を満足する点である。

この定義は従来から用いられているZMP[11]の拡張であると考えることができ、竹中[17]によっても同様な拡張がなされている。このとき、ZMPでロボットが受ける力 ($\mathbf{f}_P$)・モーメント (τ_P) は次式により定式化される。

$$\mathbf{f}_P = M(\ddot{\mathbf{p}}_G - \mathbf{g}) - \sum_{j=1}^2 \mathbf{f}_{Hj} \quad (1)$$

$$\tau_P = \dot{\mathbf{L}}_G + M(\mathbf{p}_G - \mathbf{p}_P) \times (\ddot{\mathbf{p}}_G - \mathbf{g}) - \sum_{j=1}^2 (\mathbf{p}_{Hj} - \mathbf{p}_P) \times \mathbf{f}_{Hj} \quad (2)$$

ここで、 $M = \sum_{i=1}^n m_i$ はロボットの質量、 $\mathbf{g} = [0 \ 0 \ -g]^T$ は重力ベクトルを表す。また、 $\mathbf{L}_G (= [\mathbf{L}_{Gx} \ \mathbf{L}_{Gy} \ \mathbf{L}_{Gz}]^T)$ は重心 ($\mathbf{p}_G$) まわりの角運動量を表し、

$$\mathbf{L}_G = \sum_{i=1}^n \{m_i(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_G) \times \dot{\mathbf{p}}_i + \mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}_i\} \quad (3)$$

により定義される。 $\mathbf{f}_P$ 、 τ_P は各足裏に加わる力・モーメントの総和として、次式によっても定義することができる。

$$\mathbf{f}_P = \sum_{j=1}^2 \mathbf{f}_{Fj} \quad (4)$$

$$\tau_P = \sum_{j=1}^2 \{(\mathbf{p}_{Fj} - \mathbf{p}_P) \times \mathbf{f}_{Fj} + \tau_{Fj}\} \quad (5)$$

ZMPの位置は、式(2)に $\tau_{Px} = \tau_{Py} = 0$ を代入し、 $\mathbf{p}_P$ について解くことにより、次式のように導出される。

$$x_P = \frac{-\dot{\mathbf{L}}_{Gy} + Mx_G(\ddot{z}_G + g) - M(z_G - z_P)\ddot{x}_G}{M(\ddot{z}_G + g) - \sum_{j=1}^2 f_{Hjz}} - \frac{\sum_{j=1}^2 \{x_{Hj}f_{Hjz} - (z_{Hj} - z_P)f_{Hjx}\}}{M(\ddot{z}_G + g) - \sum_{j=1}^2 f_{Hjz}} \quad (6)$$

$$y_P = \frac{\dot{\mathbf{L}}_{Gx} + My_G(\ddot{z}_G + g) - M(z_G - z_P)\ddot{y}_G}{M(\ddot{z}_G + g) - \sum_{j=1}^2 f_{Hjz}} - \frac{\sum_{j=1}^2 \{y_{Hj}f_{Hjz} - (z_{Hj} - z_P)f_{Hjy}\}}{M(\ddot{z}_G + g) - \sum_{j=1}^2 f_{Hjz}} \quad (7)$$

ここで、このZMPの定義では式(4)、(5)において、手先反力が陽に含まれていない。このとき、式(1)、(2)においてZMPに加わる力 ($\mathbf{f}_P$)・モーメント (τ_P) が手先が受ける反力 ($\mathbf{f}_{Hj}$) と釣り合うため、ZMPが足裏の支持領域の境界に達してもロボットが転倒しない場合が存在することが分かる。そこで、ZMPを手先が環境に接触する場合も含めて一般化することで、次のように一般化ZMPを定義する。

定義 2 (Generalized Zero Moment Point (GZMP))

一般化ZMPとは、ロボットを加速するのに要する力、ならびに重力が床面上に作用点を仮定した力とモーメントで表現されたとき、モーメント成分 $\tau_E = [\tau_{Ex} \ \tau_{Ey} \ \tau_{Ez}]^T$ のうち $\tau_{Ex} = \tau_{Ey} = 0$ を満足する点である。

この定義は、手先に反力を受けない場合のZMPの定義と等価であり、一般化ZMP ($\mathbf{p}_E$) においてロボットが受ける力 ($\mathbf{f}_E$)・モーメント (τ_E) は次式により定式化される。

$$\mathbf{f}_E = M(\ddot{\mathbf{p}}_G - \mathbf{g}) \quad (8)$$

$$\tau_E = \dot{\mathbf{L}}_G + M(\mathbf{p}_G - \mathbf{p}_E) \times (\ddot{\mathbf{p}}_G - \mathbf{g}) \quad (9)$$

式(8)、(9)は式(1)、(2)から手先反力に関する項を除いたものであるため、 $\mathbf{f}_E$ 、 τ_E は次式によっても表現が可能である。

$$\mathbf{f}_E = \sum_{j=1}^2 (\mathbf{f}_{Hj} + \mathbf{f}_{Fj}) \quad (10)$$

$$\tau_E = \sum_{j=1}^2 \{(\mathbf{p}_{Hj} - \mathbf{p}_E) \times \mathbf{f}_{Hj} + (\mathbf{p}_{Fj} - \mathbf{p}_E) \times \mathbf{f}_{Fj} + \tau_{Fj}\} \quad (11)$$

一般化ZMPの位置は、式(9)に $\tau_{Ex} = \tau_{Ey} = 0$ を代入し、 $\mathbf{p}_E$ について解くことにより、次式のように導出される。

$$x_E = \frac{-\dot{\mathbf{L}}_{Gy} + Mx_G(\ddot{z}_G + g) - M(z_G - z_E)\ddot{x}_G}{M(\ddot{z}_G + g)} \quad (12)$$

$$y_E = \frac{\dot{\mathbf{L}}_{Gx} + My_G(\ddot{z}_G + g) - M(z_G - z_E)\ddot{y}_G}{M(\ddot{z}_G + g)} \quad (13)$$

式(12)、(13)は手先に反力を受けないロボットに対するZMPの式と等価である。一般化ZMPでは、式(10)、(11)において、すべての接触点でロボットが受ける力・モーメントが含まれており、一般化ZMPがある領域の境界に達するとロボットが転倒することが想像できる。次章以降では、この一般化ZMPの安定領域を導出する。

4. 安定領域

4.1 領域の投影

本節では、一般化ZMPの安定領域を単一の面上で求めるために、ZMPを投影する方法について議論する。なお、特に床面に投影する場合について考える。

新たに変数 $\tilde{\mathbf{p}}_G (= [\tilde{x}_G \ \tilde{y}_G \ \tilde{z}_G]^T)$ を設け、 $\mathbf{p}_G$ と $\tilde{\mathbf{p}}_G$ の間に次のような座標変換を定義する。

Fig. 3 Projection of the generalized zero moment point

$$-\dot{L}_{Gy}/M + x_G(\ddot{z}_G + g) - (z_G - z_E)\ddot{x}_G = \ddot{x}_G(\ddot{z}_G + g) - (\ddot{z}_G - \ddot{z}_E)\ddot{x}_G \quad (14)$$

$$\dot{L}_{Gx}/M + y_G(\ddot{z}_G + g) - (z_G - z_E)\ddot{y}_G = \ddot{y}_G(\ddot{z}_G + g) - (\ddot{z}_G - \ddot{z}_E)\ddot{y}_G \quad (15)$$

上式は非線形の座標変換であるため、与えられた $\mathbf{p}_G$ に対して $\tilde{\mathbf{p}}_G$ を計算する方法は自明ではない。しかし、上式では3変数間の座標変換に対して二つの式しか定義されていないため、もう一つ式を仮定することが可能である。そこで、例えば $\tilde{z}_G = z_G$ を仮定する。この座標変換を式 (12), (13) に代入することにより、一般化 ZMP の定義から見かけ上重心まわりの角運動量の項が消えた形になる。つまり、

$$x_E = \frac{\ddot{x}_G(\ddot{z}_G + g) - (\ddot{z}_G - \ddot{z}_E)\ddot{x}_G}{\ddot{z}_G + g} \quad (16)$$

$$y_E = \frac{\ddot{y}_G(\ddot{z}_G + g) - (\ddot{z}_G - \ddot{z}_E)\ddot{y}_G}{\ddot{z}_G + g} \quad (17)$$

今、実際の床面は $z_E = 0$ のときの $x_E - y_E$ 平面に等しいとする。このとき、Fig. 3 に示すように、 $z_E = z_{Ev}$ によって表される仮想的な床面上で定義された一般化 ZMP を実際の床面に投影する方法に関して、次の定理が成立する。

定理 1 (Projection of the Generalized ZMP)

$z_E = z_{Ev}$ の仮想的な床面上で一般化 ZMP を求める。 $\tilde{\mathbf{p}}_G$ と仮想的な床面上での一般化 ZMP を通る直線を描き、この直線と床面との交点が床面上での一般化 ZMP に相当する。

証明

$z_E = \tilde{z}_G$ の仮想的な床面を考える。このとき、式 (16), (17) において $x_E = \tilde{x}_G$, $y_E = \tilde{y}_G$ が成立するため、一般化 ZMP は次の 1 点に集約される。

$$\tilde{\mathbf{p}}_G = \begin{bmatrix} x_G - \dot{L}_{Gy}/(M(\ddot{z}_G + g)) \\ y_G + \dot{L}_{Gx}/(M(\ddot{z}_G + g)) \\ z_G \end{bmatrix} \quad (18)$$

また、式 (16), (17) は $\mathbf{p}_E$ に関して線形である。以上の議論をもとに、 $\tilde{\mathbf{p}}_G$ と $z_E = z_{Ev}$ で定義される仮想的な床面上での一般化 ZMP を結ぶ直線を考える。その直線上の点は、その点を含む仮想的な床面上での一般化 ZMP であるため、定理が示

Fig. 4 Explanation of the proposed method

される。

□

次節以降では、手先を含む接触点集合の凸包を定義するが、この定理を利用することで、凸包の稜線を床面上に投影して床面上で一般化 ZMP の領域を得る。

4.2 支持点集合の凸包

手先が対象物や環境と接触しないロボットでは、足裏支持領域の凸包内に ZMP が含まれるとき、ロボットは転倒せずに計画された動作を実行可能である。この概念をロボットの手先が対象物や環境と接触する場合に拡張し、手先の接触点も含めた接触点集合の凸包を求める。例えば、手先と対象物の接触を点接触で近似すると、Fig. 4 (a) に示すような凸包を描くことができる。

凸包の頂点と床面や環境との接触が単方向接触になることに着目すると、凸包の微小変位に対して次のような不等式を導くことができる。

$$\mathbf{d}_{Fjk}^{(XY)T} \Delta \mathbf{q}_{\text{rot}} \geq 0 \quad (j = 1, 2, k = 1, \dots, K) \quad (19)$$

$$\mathbf{d}_{Hj}^{(XY)T} \Delta \mathbf{q}_{\text{rot}} \geq 0 \quad (j = 1, 2) \quad (20)$$

ここで、式 (19), (20) はそれぞれ足裏支持領域の代表点、手先接触点の接触に関する式であり、

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_{Fjk}^{(XY)} &= \begin{bmatrix} \mathbf{n}_F \\ (\mathbf{p}_{Fjk} - \mathbf{p}_{\text{rot}}) \times \mathbf{n}_F \end{bmatrix} \\ \mathbf{d}_{Hj}^{(XY)} &= \begin{bmatrix} \mathbf{n}_{Hj} \\ (\mathbf{p}_{Hj} - \mathbf{p}_{\text{rot}}) \times \mathbf{n}_{Hj} \end{bmatrix} \\ \Delta \mathbf{q}_{\text{rot}} &= [\Delta \mathbf{p}_{\text{rot}}^T \Delta \theta^T]^T \end{aligned}$$

と定義される。また $\mathbf{p}_{\text{rot}}$ は稜線上の点を表す位置ベクトルであり、凸包の頂点を表す位置ベクトル $\mathbf{p}_{Fjk}$ ($j=1, 2, k=1, \dots, K$), $\mathbf{p}_{Hj}$ ($j=1, 2$) のうち任意の二つのベクトルを $\mathbf{p}_X, \mathbf{p}_Y$ とおくことにより、 $\mathbf{p}_{\text{rot}} = t\mathbf{p}_X + (1-t)\mathbf{p}_Y$ ($0 \leq t \leq 1$) と定義される。また、 $\Delta \theta_{\text{rot}}$ は $\mathbf{p}_{\text{rot}}$ まわりの凸包の微小回転変位を表すベクトルである。次に、凸包を稜線まわりに回転させることを考え、次式を仮定する。

$$\Delta \mathbf{p}_{\text{rot}} = \mathbf{0} \quad (21)$$

$$\Delta \theta_{\text{rot}} = \frac{\mathbf{p}_X - \mathbf{p}_Y}{\|\mathbf{p}_X - \mathbf{p}_Y\|} \Delta \theta \quad (22)$$

ここで、 $\Delta \theta$ は稜線まわりの微小回転角である。式 (21), (22) を式 (19), (20) に代入し、凸包のすべての頂点に関してまとめる。これにより、次式を満足するとき凸包は頂点 $\mathbf{p}_X, \mathbf{p}_Y$ によって構成される稜線まわりに回転する可能性がある。

$$\mathbf{d}^{(XY)} \Delta \theta > 0 \quad (23)$$

ここで、

$$\mathbf{d}^{(XY)} = \begin{bmatrix} \{(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_{\text{rot}}) \times \mathbf{n}_1\}^T \\ \vdots \\ \{(\mathbf{p}_L - \mathbf{p}_{\text{rot}}) \times \mathbf{n}_L\}^T \end{bmatrix} \frac{\mathbf{p}_X - \mathbf{p}_Y}{\|\mathbf{p}_X - \mathbf{p}_Y\|}$$

であり、 $\mathbf{p}_l$ ($l=1, \dots, L$) は $\mathbf{p}_{Fjk}$ ($j=1, 2, k=1, \dots, K$), $\mathbf{p}_{Hj}$ ($j=1, 2$) より $\mathbf{p}_X, \mathbf{p}_Y$ を除いたものであり、 $\mathbf{n}_l$ ($l=1, \dots, L$) は対応する行に含まれる $\mathbf{p}_l$ が $\mathbf{p}_{Hj}$ ($j=1, 2$) のいずれかであるとき $\mathbf{n}_{Hj}$ となり、 $\mathbf{p}_{Fjk}$ ($j=1, 2, k=1, \dots, K$) のいずれかであるとき $\mathbf{n}_F$ となる。以上より、次のような定理を導くことができる。

定理 2 (Feasible Edge of the Convex Hull)

式 (23) においてベクトル $\mathbf{d}^{(XY)}$ の成分がすべて正、あるいはすべて負であるとき、凸包は頂点 $\mathbf{p}_X, \mathbf{p}_Y$ によって構成される稜線まわりに回転可能である。このとき、ロボットはこの稜線まわりに回転することで、転倒する可能性がある。

4.3 エッジまわりのモーメント

凸包の頂点 X, Y によって構成される稜線まわりのモーメントに着目する。式 (23) と双対の関係として、このモーメントは次式を満足する。

$$\mathbf{m}^{(XY)} = \mathbf{d}^{(XY)T} \mathbf{k}, \quad \mathbf{k} \geq \mathbf{0} \quad (24)$$

ここで、定理 2 が満足されるとき、モーメントの向きは $\Delta \theta$ の向きと同じである。

次に、Fig. 4 (b) に示すように、実際の床面の上空にある仮想的な床面上で定義された一般化 ZMP に着目する。一般化 ZMP

でロボットが受ける力 $\mathbf{f}_E$ 、モーメント $\boldsymbol{\tau}_E$ により、凸包の頂点 X, Y によって構成される稜線まわりのモーメントは次式によっても表すことができる。

$$\mathbf{m}^{(XY)} = \frac{\mathbf{p}_X^T - \mathbf{p}_Y^T}{\|\mathbf{p}_X - \mathbf{p}_Y\|} (\Delta \mathbf{p} \times \mathbf{f}_E + \mathbf{e}_Z \mathbf{e}_Z^T \boldsymbol{\tau}_E) \quad (25)$$

この式から分かるように、床面と稜線が平行な場合は $\mathbf{e}_Z^T \boldsymbol{\tau}_E = 0$ が成立するため、一般化 ZMP と稜線の位置関係により、稜線まわりのモーメントの向きが決定される。それに対して、床面に平行ではない稜線まわりのモーメントは $\boldsymbol{\tau}_E$ に影響を受ける。ここで、稜線が床面に対して平行でない場合、 $\boldsymbol{\tau}_E$ の任意性により単純に一般化 ZMP と稜線の位置関係で稜線まわりのモーメントの方向を決定することはできない。そこで、一般化 ZMP をモーメント $\boldsymbol{\tau}_E$ が稜線と直交する点として再定義する (Fig. 4 (c)).

定義 3 (GZMP (Modified))

ロボットを加速するのに要する力、ならびに重力が床面上に作用点を仮定した力とモーメントで表現されたとき、モーメント成分 $\boldsymbol{\tau}_E$ が凸包の頂点 X, Y を結んだ線分に垂直になる一般化 ZMP の位置を $\mathbf{p}_E^{(XY)} = [x_E^{(XY)} \ y_E^{(XY)} \ z_E^{(XY)}]^T$ と定義する。

このように再定義することで、稜線まわりのモーメントから $\boldsymbol{\tau}_E$ の影響を取り除くことができる。なお、 $\boldsymbol{\tau}_E$ の方向を表す単位ベクトルを $\mathbf{e}_z^{(XY)}$ とし、これに垂直な方向に $\mathbf{e}_x^{(XY)}, \mathbf{e}_y^{(XY)}$ をとる。このとき、定義 3 で修正された一般化 ZMP の位置は次式で求めることができる。

$$\begin{bmatrix} x_E^{(XY)} \\ y_E^{(XY)} \end{bmatrix} = -\{\mathbf{M}\mathbf{E}[(\ddot{\mathbf{p}}_G - \mathbf{g}) \times] \mathbf{D}\}^{-1} \{\mathbf{M}\mathbf{E}(\mathbf{p}_G - \mathbf{e}_z^{(XY)}) \times (\ddot{\mathbf{p}}_G - \mathbf{g}) + \mathbf{E}\dot{\mathbf{L}}_G\} \quad (26)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= [\mathbf{e}_x^{(XY)} \ \mathbf{e}_y^{(XY)}]^T \\ \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{e} &= [0 \ 0 \ 1]^T \end{aligned}$$

である。

次に、一般化 ZMP の安定領域を導出するため、共通の頂点を持つ二つの稜線に着目する (Fig. 4 (d)). この二つの稜線によってつくられる平面上での一般化 ZMP に着目する。定義 3 を導入したことにより、平面上でモーメント $\mathbf{m}^{(XY)}$ の符号は頂点 X, Y によって構成される稜線を境界として変化し、またモーメント $\mathbf{m}^{(XZ)}$ についても同様な議論が成立する。さらに、定理 2 が成立するとき、式 (24) よりモーメントの向きは $\mathbf{m}^{XY} \geq 0$ か $\mathbf{m}^{XY} \leq 0$ のいずれかである。つまり、平面を構成する二つの稜線が共に定理 2 を満足するとき、平面上で二つの稜線によってつくられる四つの領域のうち、一般化 ZMP が存在するのは一つである (Fig. 4 (e)).

Fig. 5 Algorithm of the proposed method

最後に、床面上で一般化 ZMP の領域を求める方法をまとめる (Fig. 5)。まず、接触点の位置を求めることで、接触点集合の凸包を求める。次に定理 2 に従って凸包を構成する稜線のうち、ロボットの転倒を引き起こす可能性のある稜線を求め、その稜線まわりのモーメントを考慮する。さらに定理 1 に従って、この稜線を含む直線を床面に投影することで (Fig. 4(f))、床面上で一般化 ZMP の安定領域を得る。また定義 3 に従って、各稜線に対応した一般化 ZMP を求める。この一般化 ZMP が安定領域に含まれるとき、ロボットは転倒せずに計画された動作が実行可能であり、安定領域の境界に一般化 ZMP が到達すると、ロボットは転倒する。

4.4 線形倒立振子による近似

ヒューマノイドロボットを含む 2 足歩行ロボットの動作計画において、ロボットの運動を重心軌道が平面内に拘束された倒立振子 (線形倒立振子モード) によって近似する手法が提案されている [9] [10]。また、倒立振子で近似できるようなロボットの動作計画が提案されている [18]。線形倒立振子モードにおいて、ロボットの重心の運動が水平面内に拘束される場合、ロボット重心の加速度の床面に対して鉛直な方向成分と重心まわりの角加速度は微小であるとして無視される。このような近似を用いると、次に示すような利点がある。

- 倒立振子では支点まわりのトルクは 0 であるため、一般化 ZMP の位置において $\tau_E = 0$ が成立する。このとき、 $\mathbf{p}_E^{(XY)} = \mathbf{p}_E$ が成立するため、一般化 ZMP の定義は定義 3 に依存しない。つまり、稜線を投影することで得られる床面上での安定領域に式 (12)、(13) により求めた一般化 ZMP が含まれていれば、ロボットは転倒することなしに計画された動作が実行可能である。また、このとき接触状態が不連続に変化する場合でも、連続した一般化 ZMP の軌道を得ることが可能である。
- 式 (14)、(15) で $\mathbf{p}_G$ と $\tilde{\mathbf{p}}_G$ の間の座標変換を定義した。 $\tilde{\mathbf{L}}_G \cong 0$ を仮定すると $\mathbf{p}_G \cong \tilde{\mathbf{p}}_G$ が得られる。この近似により、座標変換が不要になるため、床面上で安定領域を得る計算が単純化される。

Fig. 6 Numerical examples 1 and 2

Table 1 Result of calculation

(a) Example 1

$\mathbf{d}^{(EA)}$	$[0.6667 \ -0.6667 \ -1.3333]^T$
$\mathbf{d}^{(EC)}$	$[0.2481 \ 1.4884 \ -1.2403]^T$
$\mathbf{d}^{(EB)}$	$[-0.3123 \ -1.8741 \ -2.1864]^T$
$\mathbf{d}^{(ED)}$	$[0.6963 \ 2.4371 \ 1.7408]^T$
$\mathbf{d}^{(AB)}$	$[-2 \ -2 \ 1]^T$
$\mathbf{d}^{(CD)}$	$[-2 \ -2 \ -1]^T$
$\mathbf{d}^{(AD)}$	$[2 \ 2 \ -2]^T$
$\mathbf{d}^{(BC)}$	$[-2 \ -2 \ -2]^T$

(b) Example 2

$\mathbf{d}^{(EA)}$	$[0.6667 \ -0.6667 \ -1.3333]^T$
$\mathbf{d}^{(EC)}$	$[0.2481 \ 1.4884 \ -1.2403]^T$
$\mathbf{d}^{(EB)}$	$[-0.3123 \ -1.8741 \ -2.1864]^T$
$\mathbf{d}^{(ED)}$	$[0.6963 \ 2.4371 \ 1.7408]^T$
$\mathbf{d}^{(AB)}$	$[-2 \ -2 \ -1]^T$
$\mathbf{d}^{(CD)}$	$[-2 \ -2 \ 1]^T$
$\mathbf{d}^{(AD)}$	$[2 \ 2 \ -2]^T$
$\mathbf{d}^{(BC)}$	$[-2 \ -2 \ -2]^T$

5. シミュレーション

まず、Fig. 6 に示す多面体により、転倒を引き起こす可能性のある稜線について考える。 $\tilde{\mathbf{p}}_G = [0 \ 0 \ 2]^T$ [m]、 $\tilde{\mathbf{p}}_G = [1 \ 1 \ 0]^T$ [m/s²]、 $\tilde{\mathbf{L}}_G = 0$ [kg rad/s] とした。これらは頂点 A, B, C, D によって形成される領域が足裏支持領域で、頂点 E が手先であるとみなすことができる。Fig. 6 (a), (b) は手先が接触する環境の法線ベクトルの方向が異なるだけである。定理 2 に従って各稜線について $\mathbf{d}^{(XY)}$ を計算した。その結果を Table 1 に示す。

これより、(a) の場合は線分 ED, CD, BC, EB まわりに多面体は回転する可能性があり、(b) の場合は線分 EB, ED, AB,

Fig. 7 Numerical examples 3 and 4

BCまわりに回転する可能性があることが分かる。この情報を基に床面上で描いた一般化ZMPの領域をFig.6(c), (d)に示す。図には回転する可能性がある稜線を点線で示しており、安定領域を太線で示している。

次に、Fig. 7に示す例を考える。ここで、Fig. 7(a)は対象物を押す場合に対応し、Fig. 7(b)は引く場合に対応する。これは、どちらの場合も接触点集合によって構成される凸包は等しい形をしているが、エッジまわりのモーメント $m^{(BC)}$ が二つの場合について異なっている。つまり、モーメントの向きの違いに応じて、一般化ZMPが存在する領域が異なる。

次に、実際のヒューマノイドロボットを想定したシミュレーションを行った。ヒューマノイドロボットが机の上に両手をついた状態を考える。このとき、両手に体重を乗せている状態で片方の手を机から離すと、力のバランスが崩れることでロボットが転倒することが予想される。つまり、両手をついた状態で、片方の手と両足によって形成される一般化ZMPの安定領域に一般化ZMPが含まれるようにロボットの重心を制御した後に、もう片方の手を机から離さなくてはならない。

シミュレーションソフトとして、OpenHRP [19] [20] を用いた。このシミュレーションの模様をFig. 8に示す。シミュレーションでは、まずロボットを中腰の姿勢にして (Fig. 8(a))、両手を前に出し (Fig. 8(b))、その姿勢でしゃがみ込む (Fig. 8(c))。さらに、机に体重を乗せるように重心を前方に移動させる (Fig. 8(d))。この状態において、左手と机の接触点と足裏支持領域によって形成される一般化ZMPの安定領域を計算し、その安定領域に一般化ZMPが含まれるように、目標となる胴体の重心位置を計算した。この計算結果に従って、ロボットの重心の制御を行った (Fig. 8(e))。これにより、ロボットは安定に右手を机から離すことが可能となっている (Fig. 8(f))。

また、Fig. 8(d)の姿勢からFig. 8(e)の姿勢に移動するまで

Fig. 8 Result of simulation 1

Fig. 9 GZMP and its stable region

の一般化ZMPとその安定領域を計算した結果をFig. 9に示す。図には、すべての接触点によって形成される安定領域を点線で、また、左手と両足の接触点によって形成される安定領域を実線

Fig. 10 Result of simulation 2

で示す。このシミュレーションではロボットの重心まわりの角運動量は微小である。このため、定義2で定義された一般化ZMPの位置と定義3で定義された一般化ZMPの位置は、ほぼ計算誤差程度の差であった。図において x 軸がロボットの正面を向く方向を表す。Fig. 9(a) では一般化ZMPがすべての接触点によって形成される安定領域に含まれるため転倒していない。それに対して、左手と両足によって形成される安定領域には含まれていないため、この状態で右手を対象物から離すと転倒することが分かる。それに対して、Fig. 9(c), (d) では左手と両足によって形成される安定領域に一般化ZMPが含まれるため、右手を対象物から離しても、ロボットは転倒しないことが分かる。このように、単一の面上でZMPを考えることで、ついていた手を離すような、接触状態の不連続な変化を含むような動作に対しても連続なZMP軌道を得ることができ、ロボットの安定性を吟味できる。

最後に、Fig. 10に重心の制御を行わなかった場合のシミュレーションの模様を示す。この場合、Fig. 9(a)に示す一般化ZMPが左手と両足の接触点によって形成される安定領域に含まれていない状態で右手を対象物から離したため、Fig. 10(e)に示すように、最終的にロボットが転倒していることが分かる。

6. 結 言

本論文では、ヒューマノイドロボットの手先が環境と接する場合のZMPに関して、一般化ZMPを提案し、その安定領域を導出した。その結果、与えられたロボットの運動に対して、単一の面上で一意的にZMPやその安定領域を導出することが可能となった。さらに、このZMPの概念をシミュレーションにより確認することで、ヒューマノイドの手先が環境と接触したり、その接触が離れる作業が安定に実行できることを示した。今後の課題としては、提案する手法を実際にヒューマノイドロボットの作業に適用することが考えられる。

参 考 文 献

- [1] M. Inaba, S. Kagami, F. Kanehiro, Y. Hoshino and H. Inoue: "A Platform for Robotics Research Based on the Remote-Brained Robot Approach," Int. Journal of Robotics Research, vol.19, no.10, pp.933-954, 2000.
- [2] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka: "The Development of Honda Humanoid Robot," Proc. of 1998 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1321-1326, 1998.
- [3] S. Kagami, A. Konno, R. Kageyama, M. Inaba and H. Inoue: "Development of a Humanoid H4 with Soft and Distributed Tactile Sensor Skin," Peter Corke and James Trevelyan, editors, Experimental Robotics VI, Lecture Notes in Control and Information Sciences 250, pp.499-507, Springer, 1999.
- [4] A. Konno, N. Kato, S. Shirata, T. Furuta and M. Uchiyama: "Development of a Light-Weight Biped Humanoid Robot," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1565-1570, 2000.
- [5] H. Inoue et al.: "HRP: Humanoid Robotics Project of MITI," The First IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, 2000.
- [6] K. Kaneko et al.: "Design of Prototype Humanoid Robotics Platform for HRP," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, 2002.
- [7] K. Yamane and Y. Nakamura: "Dynamics Filter—Concept and Implementation of On-Line Motion Generator for Human Figures—," Proc. of 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.688-694, 2000.
- [8] 井上, 石井, 大川: "腕で作業をしながら移動する人間型ロボットの実時間制御", 日本ロボット学会誌, vol.18, no.1, pp.75-86, 2000.
- [9] S. Kajita, T. Yamaura and A. Kobayashi: "Dynamic Walking Control of a Biped Robot Along a Potential Energy Conserving Orbit," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.8, no.4, pp.431-438, 1992.
- [10] S. Kajita, O. Matsumoto and M. Saigo: "Real-time 3D Walking Pattern Generation for a Biped Robot with Telescopic Legs," Proc. of 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2299-2306, 2001.
- [11] M. Vukobratovic and J. Stepanenko: "On the Stability of Anthropomorphic Systems," Mathematical Biosciences, vol.15, pp.1-37, 1972.
- [12] A. Goswami: "Postural Stability of Biped Robots and the Foot Rotation Indicator(FRI) Point," Int. J. of Robotics Research, vol.19, no.6, pp.523-533, 1999.
- [13] 米田, 広瀬: "歩行機械の転倒安定性", 日本ロボット学会誌, vol.14, no.4, pp.517-522, 1996.
- [14] 才田, 横小路, 吉川: "多脚式歩行ロボットの反力有効解", 日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会予稿集, 2002.
- [15] 北川, 長阪, 西脇, 稲葉, 井上: "遺伝的アルゴリズムを用いた人間型ロボットの脚腕協調動的起立動作の生成", 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1191-1192, 1999.
- [16] 竹中: 脚式移動ロボットの歩容生成装置, 特許第3132156号, 2001.
- [17] 竹中: 脚式移動ロボットの姿勢制御装置, 特開平10-230485, 1998.

- [18] 梶田, 金広, 横井, 比留川: “モーメンタム・コントロール: 運動量と角運動量に基づくヒューマノイドロボットの全身運動生成”, 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集, 2002.
- [19] F. Kanehiro et al.: “Virtual humanoid robot platform to develop controllers of real humanoid robots without porting,”

Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2001.

- [20] H. Hirukawa et al.: “OpenHRP: Open Architecture Humanoid Robot Platform,” Proc. of Int. Symp. on Robotics Research, 2001.

原田研介 (Kensuke Harada)

1968 年 9 月 28 日生。1997 年 3 月京都大学大学院工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了。博士 (工学)。同年 4 月広島大学工学部助手, 2002 年 4 月独立行政法人産業技術総合研究所研究員。ヒューマノイドロボット, ロボットハンド, ロボットマニピュレータ等, ロボット機構の力学と制御に関する研究に興味を持つ。IEEE, 計測自動制御学会, 日本機械学会などの会員。
(日本ロボット学会正会員)

金広文男 (Fumio Kanehiro)

1971 年 7 月 22 日生。1999 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)。1998 年より日本学術振興会特別研究員。2000 年電子技術総合研究所入所。現在産業技術総合研究所知能システム研究部門研究員。ヒューマノイドロボットのシステム構成法, 全身行動制御に興味がある。IEEE, 人工知能学会, 日本ソフトウェア科学会, 情報処理学会の各会員。
(日本ロボット学会正会員)

金子健二 (Kenji Kaneko)

1965 年 9 月 22 日生。1990 年慶應義塾大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年工業技術院機械技術研究所に入所。1995 年 9 月より半年間米国カーネギーメロン大学客員研究員, 1999 年 9 月より 1 年間仏国 CNRS パリロボット研究所客員研究員。2001 年より組織改変に伴い独立行政法人産業技術総合研究所主任研究員, 現在にいたる。博士 (工学)。モーショントラッキング, マイクロマシン, 遠隔制御, ヒューマノイドロボット等の研究に従事。日本機械学会, 電気学会の各会員。
(日本ロボット学会正会員)

比留川博久 (Hirohisa Hirukawa)

1959 年 1 月 15 日生。1987 年神戸大学大学院自然科学研究システム科学専攻博士課程修了。学術博士。同年通産省工業技術院電子技術総合研究所に入所。1994~1995 年米国スタンフォード大学計算機科学科客員研究員。2001 年改組より独立行政法人産業技術総合研究所知能システム研究部門ヒューマノイド研究グループ長。ロボットの動作計画アルゴリズム, ネットワークロボティクス, ヒューマノイドロボット等の研究に従事。
(日本ロボット学会正会員)

梶田秀司 (Shuuji Kajita)

1961 年 1 月 26 日生。1985 年東京工業大学大学院修士課程修了 (制御工学専攻)。同年通産省工業技術院機械技術研究所に入所。2 足歩行ロボット等の動的制御技術の研究に従事。1996 年 2 月より 1 年間米国カリフォルニア工科大学客員研究員。2001 年より組織改変に伴い独立行政法人産業技術総合研究所主任研究員, 現在にいたる。1996 年 3 月東京工業大学より学位取得 (工学博士)。1996 年度計測自動制御学会論文賞受賞。計測自動制御学会, IEEE (Robotics and Automation Society) の会員。
(日本ロボット学会正会員)

藤原清司 (Kiyoshi Fujiwara)

1972 年 4 月 11 日生。1997 年筑波大学大学院工学研究科修了。同年電子技術総合研究所入所。現在独立行政法人産業技術総合研究所知能システム部門ヒューマノイド研究グループ研究員。生体制御, 医療福祉工学, マンマシンインタフェース, ヒューマノイドロボットなどの研究に従事。
(日本ロボット学会正会員)

横井一仁 (Kazuhito Yokoi)

1961 年 11 月 11 日生。1986 年東京工業大学大学院機械物理工学専攻修了。博士 (工学)。1986 年工業技術院機械技術研究所に入所。1995~1996 年スタンフォード大学客員研究員。2001 年産業技術総合研究所知能システム研究部門主任研究員。神奈川工科大学連携大学院助教授, 東京工業大学非常勤講師併任。人間協調・共存型ロボットシステムプロジェクトに従事。IEEE, 日本機械学会会員。
(日本ロボット学会正会員)