極配置法によるヒューマノイドロボットの 両脚期における緊急停止動作生成

森 澤 光 晴* 梶 田 秀 司* 金 子 健 二* 金 広 文 男*
中 岡 慎一郎* 原 田 研 介* 藤 原 清 司* 比留川 博 久*

Motion Generation of Emergency Stop at Double Support Phase for Humanoid Robot by Pole Assignment

Mitsuharu Morisawa*, Shuuji Kajita*, Kenji Kaneko*, Fumio Kanehiro*,
Shin'ichiro Nakaoka*, Kensuke Harada*, Kiyoshi Fujiwara* and Hirohisa Hirukawa*

A motion planner of emergency stop must make an operating humanoid robot to a stationary state from the emergency signal. It plays an important role in prevention of falling over because humanoid robots fall over easily. Immediately after the emergency signal, the emergency stop motion must be generated in real-time. We model a humanoid robot as a simple dynamic system consists of the ZMP (Zero-Moment Point) and the COG (Center of Gravity) as its states. The emergency stop motion is generated by a state feedback. We determine optimal feedback gains in terms of the initial conditions and the pole assignment. The proposed method realizes a reliable emergency stop with low computational cost. Furthermore, it can easily predict the possibility of the successful emergency stop at any time. The validity of the proposed method is confirmed by some experiments using humanoid robot HRP-2.

Key Words: Biped Robot, Humanoid Robot, Real-time Gait Planning, Emergency Stop

1. は じ め に

2足歩行ロボットは、立脚状態では重心位置の高さに比べて支持多角形が小さいため、安定余裕が小さく転倒しやすいという致命的とも言える弱点を持つ。したがってヒューマノイドロボットが実環境で動作するには、移動制御技術に加え、転倒を未然に防ぐ緊急停止技術 (Fig. 1), 転倒が不可避な状態になった際にロボット自身や環境へのダメージを最小限に抑えるための転倒制御技術 [1], 倒れた状態から自力で立脚状態へ回復する転倒回復技術 [2] の向上が欠かせない。

(独)産業技術総合研究所 (産総研) ではヒューマノイドで培った2足歩行技術の応用の一環として恐竜型2足ロボットを開発し [3], 2005年3月25日から同年9月25日にかけて開催された愛・地球博で185日間運用展示を行った。恐竜ロボットの長期の運用に当たり、動作中の観客への安全性の確保およびロボットの転倒防止を目的として、緊急停止システムを開発した [4] [5]。このシステムは、任意の動力学的に安定な動作パターンを実行中のロボットが、センサ情報に基づく判断やオペレー

Fig. 1 Emergency stop

タによって停止指令が与えられた後、1歩以内に停止させるパターンを生成するものである。

本稿では、さらに計算コストの低減化と信頼性を高めた停止動作生成法について述べる。重心の近似モデルである単質点線形倒立振子の動力学を状態空間で表し、安定な状態フィードバック制御器を設計することによって重心の停止軌道を生成する。また信頼性の観点から、停止軌道を動力学の影響が少ない両脚期に生成する。フィードバックゲインの導出において、実時間の計算に適した極配置による手法が、ZMP [6] の二乗積分で表される評価関数を用いた最適レギュレータよりも ZMP 最大値の小さい停止軌道を生成可能なことを示す。最後に HRP-2 [7] を用いた種々の停止実験結果を報告する。

原稿受付 2007年7月30日

* (独) 産業技術総合研究所

* National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

■ 本論文は有用性で評価されました。

2. 関連研究

緊急停止を行うに当たって、ロボットは実行中の動作を変更し、1歩以内に静的に安定な姿勢へ移行することが望ましい。緊急停止のための軌道生成は、任意の軌道と連続に接続するための初期条件と、停止時間や重心の停止位置に任意性のある終端条件からなる実時間歩容計画問題となる。

これまでヒューマノイドロボットの実時間歩容計画として、重心運動とそれ以外の運動に分け、特に重心運動は、ヒューマノイドロボットを重心高さが一定の単質点倒立振子モデルで近似表現し、ロボットの挙動を線形微分方程式で記述することにより、その離散化表現[8]、状態空間表現[9]、あるいはその解析解[10][11]による手法などが提案されている。

加賀美らは運動方程式を離散化し、区間ごとの目標 ZMP を満たす重心軌道を高速に生成する手法[8]を考案したが、この手法では任意の重心軌道との接続に対して位置と速度の連続性を同時に満たすことはできない。原田らは目標 ZMP を区分多項式で計画し、線形倒立振子モデルの運動方程式の解析解を用いて、その未知数を境界条件から決定する実時間歩容計画法[10]を考案した。この手法では目標 ZMP の次数に応じて境界条件を与えることができるが、両脚期に次の1歩目の着地位置を変更すると目標 ZMP が大きく変動することが示されている。杉原らは境界値問題における初期および終端の ZMP 位置および終端の重心位置、速度の誤差を許容することにより、停止を含む1歩ごとの歩行を実現している[11]。この手法は軌道の接続に当たって ZMP の連続性を満たさないため、生成された動作の実現可能性の見通しが悪くなる。

これまでの停止動作生成に関する研究として、田窪らは梶田らの予見制御による手法[9]を応用し、目標着地位置および歩幅変更のタイミングから安定に着地可能な歩幅修正量との関係をあらかじめ求めておくことで、歩行中の任意のタイミングでの安定な停止動作を実現している[12]。しかし、目標着地位置や歩行周期などの歩容パラメータを与えられていない動作パターンについて適用することが困難である。金子らは緊急停止の判断の方法と重心の一定減速パターンを与えることにより、少ない計算量で停止動作を実現している[4]。この手法は、動作パターンの重心軌道と ZMP 軌道が両脚期に交差するのを検出して停止動作を開始するため、踊りなどの複雑なステップを有する動作パターンでは1歩以内に停止できない可能性がある。筆者らは解析解による実時間歩容計画法[10]を応用して、単脚期および両脚期における動作時間を最適化する停止動作生成法を提案している[5]。この手法は収束計算を伴うため計算負荷が比較的大きく、単脚期において着地軌道を新たに生成する際にモデルで考慮していない遊脚の慣性力の影響で着地時の床反力が大きくなり、低速の歩行にしか実用上適用できない問題があった。

3. 緊急停止軌道生成

3.1 システム構成

初めに本研究で用いるヒューマノイドロボット HRP-2[7]の歩行制御システムのブロック図を Fig. 2 に示す。通常動作時においてオペレータ端末で選択されたオンラインまたはオフライン

Fig. 2 Block diagram of humanoid robot system

Fig. 3 Emergency system

ンパターンを、緊急停止システム（Emergency system）は、安定化制御器（Stabilizer）にそのまま受け渡し、安定化制御器では、各種センサ情報に基づいてパターンを微修正することにより、実環境での安定な2足歩行を実現している。また動作パターンとして、絶対座標系における腰リンクの目標姿勢、腰リンク座標系における目標 ZMP、目標関節角が与えられる。ロボットの各関節には、安定化制御器で生成された関節角度指令を目標値とした位置制御系が組まれている。

3.2 緊急停止シーケンス

オペレータによって停止指令が与えられたとき、あるいは各種センサの異常信号の検出による緊急停止要求を受けたとき、適切な緊急停止パターンを実時間で生成し、現在の動作パターンに上書きする（Fig. 3: Stop motion）。ロボットが停止した後、力覚センサや姿勢センサあるいはアクチュエータに異常がなければ、オペレータからの指示でステップを経てホームポジションに移行し、通常状態へ復帰する（Recovery home position）。ただし、これらの緊急停止の判断は金子ら[4]によって示されている指標に従い、本稿では扱わないこととする。

緊急停止パターンは緊急停止指令が与えられてから生成するため、直前の動作パターンと連続に、かつ実時間で計算しなければならない。一方、ヒューマノイドロボットは歩容生成や安定化制御などで計算負荷が高く、緊急停止動作生成のために多くの計算資源を割くことができない。しかし、このような制約下では全身の動力学モデルを考慮した停止動作を生成することは困難であるため、近似モデルを用いて動力学の影響を受けにくい両脚期において停止動作を生成する。Fig. 4 に緊急停止指令が与えられてから、実際に停止動作が行われるまでのタイムチャートを示す。Fig. 4(a) 停止指令が単脚期（Single support phase: S.S.）で与えられたとき、ロボットは既存の動作パターンに従って動き、両脚期（Double support phase: D.S.）が現

Fig. 4 Time chart of emergency motion

われたとき停止動作を開始する. Fig. 4 (b) 停止指令が両脚期で与えられたとき, その時点から停止動作を開始する.

4. 停止軌道生成

4.1 停止軌道のダイナミクス

ロボットが両脚期で停止運動を開始する瞬間, ロボットの腰および上半身はある速度で運動しており, 両脚足裏の少なくとも一部が地面に接触している. HRP-2 の歩行パターンでは支持脚側の足裏全面が地面に接地し, もう一方の足裏は踵のエッジが接地している (Fig. 5 (a)).

停止動作の目標は両足の接地状態を保ちつつ, 腰と上半身の速度を 0 とし, 適切な「ホームポジション」に戻すことである. 腕振り等の上半身の運動については後で述べることとし, まず腰の並進運動を停止する方法について検討しよう. 多くのヒューマノイドロボットでは近似的に腰の運動と重心の運動を同一視できる. 加えて, 停止動作中のロボットの腰の上下動はわずかなので, ロボット全体を Fig. 5 (b) のような重心高さが一定で, 床反力の圧力中心である ZMP を支点として, その ZMP が支持多角形内を移動する線形倒立振子でモデル化できる [13].

$$\ddot{x} = \omega_c^2(x - p_x) \quad (1)$$

$$\omega_c \equiv \sqrt{\frac{g}{z}}$$

ここで x は重心の水平位置, z は重心高さ, p_x は ZMP, g は重力加速度である. また支持多角形の中央にホームポジションをとるものとし, ここを原点とする. 以下では式 (1) を用いて sagittal 平面内の停止運動について議論するが, frontal 平面内の停止運動について, まったく同様に扱うことができる.

4.2 漸近停止軌道

緊急停止動作生成において, 我々の第一の目標は任意の状態から支持多角形の極力内側に ZMP を保ちつつ重心速度を 0 にすることである. すなわち, 停止動作に伴う ZMP の最大絶対値を最小化したい. ZMP p_x が固定されているとき, 式 (1) の両辺に $\dot{x}$ を乗じて積分することにより, ZMP を支点とする線形倒立振子の軌道エネルギーは一定となる [14].

$$\frac{1}{2}\dot{x}^2 - \frac{1}{2}\omega_c^2(x - p_x)^2 = E = \text{const.} \quad (2)$$

ここで, ある運動を行っている線形倒立振子に対し, ZMP の不連続な変化を許容し, ZMP をステップ状に変化させて軌道エネルギーを瞬間的に 0 にして停止させることを考える. 停止

Fig. 5 Stop motion model

Fig. 6 Asymptotical stop trajectory

運動を開始する瞬間のロボットの重心位置, 重心速度をそれぞれ x_0, v_0 とすると, 式 (2) における線形倒立振子の軌道エネルギーが 0 となる ZMP は, 次式で与えられる.

$$p_x = x_0 \pm \frac{v_0}{\omega_c} \quad (3)$$

一方, ZMP が定数の場合の式 (1) の解析解は以下で与えられる.

$$x(t) = x_0 \cosh(\omega_c t) + \frac{v_0}{\omega_c} \sinh(\omega_c t) + (1 - \cosh(\omega_c t)) p_x \quad (4)$$

式 (3) を式 (4) に代入して整理すると, 式 (3) の右辺第二項が負の場合は重心軌道は発散する. 正の場合の重心位置は Fig. 6 のように時刻 $t \rightarrow \infty$ で p_x に収束する軌道となる.

$$x(t) = x_0 + \frac{v_0}{\omega_c}(1 - e^{-\omega_c t}) \quad (5)$$

この軌道は, p_x を原点にした倒立振子の位相面図の漸近線に一致する. そこでこれを「漸近停止軌道」, また式 (3) の右辺第二項が正の場合の ZMP 位置 p_x を「漸近停止 ZMP」と呼び, 以後 p_x^{asym} と表すことにする. すなわち,

$$p_x^{asym} \equiv x_0 + \frac{v_0}{\omega_c}, \quad (6)$$

である. 漸近停止軌道は与えられた初期条件のもとで最も安定余裕の大きな停止動作を与えるが, 以下の問題を持っている.

(1) 時刻 0 において, ZMP の不連続な変化を要求する. これはロボットに不連続な加速度変化をもたらし, ハードウェ

アに望ましくない振動を励起してしまう。

- (2) 初期条件に応じて異なる位置に停止し、ホームポジション(原点)に戻らない。

以上の問題を解決するため、次節ではロボットのダイナミクスを線形システムで表現し、フィードバック則によって停止軌道を生成することを考える。

4.3 線形フィードバックによる停止軌道

Fig. 5 (b) の線形倒立振子モデルを線形ダイナミックシステムとして表現する。ZMP の 1 階微分が入力 u_x により直接制御できるものと仮定する。

$$\dot{p}_x = u_x \quad (7)$$

式 (1), (7) より重心位置、重心速度および ZMP を状態量とする状態空間表現を得る。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ p_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \omega_c^2 & 0 & -\omega_c^2 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ p_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_x \quad (8)$$

式 (8) のシステムに対し次式の状態フィードバックを施す。

$$u_x = -k_1 x - k_2 \dot{x} - k_3 p_x \quad (9)$$

k_1, k_2, k_3 はフィードバックゲインであり、適切に設定することにより式 (8) を安定化、すなわち状態を 0 にできる。

具体例として、フィードバックゲインを $[k_1, k_2, k_3] = [15, 5, -10]$ 、初期状態を $[x, \dot{x}, p_x] = [-0.1, 1.0, 0.05]$ で与えた場合の重心位置、速度および ZMP の応答を Fig. 7 に示す。Fig. 7 の漸近停止軌道と比較すると、

- (1) ZMP が与えられた初期値から滑らかに変化する。
- (2) 重心位置および ZMP は原点へ収束する。
- (3) 漸近停止 ZMP (Fig. 7 破線) に比べて大きな ZMP のピーク ($p_x^{\max}$) が発生し安定余裕が小さくなる。

この問題を緩和するため、以下の 4.4 節、4.5 節でフィードバックゲインの決定法について検討する。

Fig. 7 Stop trajectory by linear feedback

4.4 最適レギュレータによる停止軌道の性質

まず最適レギュレータを用いた場合について調べてみる。ZMP を小さくするため評価関数を次式で与えるものとする。

$$J = \int_0^\infty \{Q p_x^2 + u_x^2\} dt \quad (10)$$

ここで Q は ZMP に関する重みであり、これを大きくすることによって、よりピークの小さな ZMP 応答が期待できる。

Q として 0.1, 10, 1000, 初期状態を $[x, \dot{x}, p_x] = [0.0, 0.5, 0.0]$ を与えて計算した最適フィードバックゲインに基づく ZMP と重心の応答例を Fig. 8 に示す。 Q を増大させていくと重心のピークは小さくなっていくが、ZMP のピークは必ずしも小さくならない。また入力 u_x は初期値が最も大きく、 Q の増大と共に大きくなっている。Fig. 9 では Q を横軸にとって、ZMP のピークの変化を示した。 Q を一定以上大きくすると ZMP ピークの減少効果は頭打ちとなり、逆に $Q = 10$ を超えたあたりから増大していくことが分かる。その結果、ピークを理論的な限界である漸近停止 ZMP まで抑えることができない。この原因は ZMP の二乗積分で定義される式 (10) の評価関数が、ZMP のピークを抑えたいという我々の要求を正しく表現していないためと考えられる。なお、ZMP のピーク値は初期条件に応じて変化するため、単一の初期条件で評価しただけでは最悪のケースを見落とすおそれがある。ここでは Fig. 9 に示した ZMP ピー

Fig. 8 Stop trajectory by optimal regulator

Fig. 9 Relation between ZMP peak and Q

クを計算するに当たって、比較を容易にするため等しい漸近停止 ZMP (破線) に対し、初期位置と初期速度の異なる複数の初期条件 ($x_0 + \frac{v_0}{\omega_c} = 0.143$, $p_{x0} = 0$) を用いた。これらの初期条件にかかわらず、等しい漸近停止 ZMP に対して同じ ZMP ピークを与えることが分かる。

4.5 極配置法による停止軌道生成

次に極配置により、ZMP のピークを抑制するフィードバックゲインについて考えてみる。式 (9) のフィードバック則を施したシステムの極を実軸上に配置するものとし、それぞれ α , β , γ ($\alpha \neq \beta \neq \gamma < 0$) とする。このときフィードバックゲイン k_1 , k_2 , k_3 は、システムの極を用いて以下のように置き換えられる。

$$k_1 = -\alpha - \beta - \gamma - \frac{\alpha\beta\gamma}{\omega_c^2} \quad (11)$$

$$k_2 = \frac{\alpha\beta + \beta\gamma + \alpha\gamma}{\omega_c^2} + 1 \quad (12)$$

$$k_3 = \alpha + \beta + \gamma \quad (13)$$

このとき ZMP の初期値応答は、以下のように求まる。

$$p_x(t) = n_1 e^{\alpha t} + n_2 e^{\beta t} + n_3 e^{\gamma t} \quad (14)$$

ただし、式 (14) の各係数は、

$$\begin{aligned} n_1 &= \frac{(\omega_c^2 - \alpha^2)((\omega_c^2 + \beta\gamma)x_0 - (\beta + \gamma)v_0 - \omega_c^2 p_{x0})}{\omega_c^2(\alpha - \beta)(\alpha - \gamma)}, \\ n_2 &= -\frac{(\omega_c^2 - \beta^2)((\omega_c^2 + \alpha\gamma)x_0 - (\alpha + \gamma)v_0 - \omega_c^2 p_{x0})}{\omega_c^2(\alpha - \beta)(\beta - \gamma)}, \\ n_3 &= \frac{(\omega_c^2 - \gamma^2)((\omega_c^2 + \alpha\beta)x_0 - (\alpha + \beta)v_0 - \omega_c^2 p_{x0})}{\omega_c^2(\alpha - \gamma)(\beta - \gamma)}, \end{aligned}$$

で与えられる。 x_0 , v_0 , p_{x0} は、重心位置、重心速度、および ZMP の初期値である。ここで極配置の極限値として、

$$\{\alpha, \beta, \gamma\} \rightarrow \{0, -\omega_c, -\infty\}, \quad (15)$$

のように与えると、式 (14) の ZMP の極限値 p_x^{lim} は、

$$p_x^{lim} = x_0 + \frac{v_0}{\omega_c}, \quad (16)$$

となり、式 (6) と同じ漸近停止 ZMP が得られる。すなわち ZMP のピークを抑えるためには、極の一つを原点から遠い左半平面に、残りを左半平面における原点付近と倒立振子の固有周波数付近に配置するのが望ましいと言える。

極の一つに倒立振子の固有周波数を用いると、安定零点と安定極が相殺される。このとき残りの極を α , β ($\alpha \neq \beta$) とし、ZMP のピーク値をとる時刻 t_{peak} が以下のように求まる。

$$\begin{aligned} t_{peak} &= \frac{1}{\alpha - \beta} \log(\kappa) \\ \kappa &\equiv \frac{\beta(\omega_c - \beta)((\omega_c - \alpha)(\omega_c x_0 + v_0) - \omega_c^2 p_0)}{\alpha(\omega_c - \alpha)((\omega_c - \beta)(\omega_c x_0 + v_0) - \omega_c^2 p_0)} \end{aligned} \quad (17)$$

式 (17) で求めた t_{peak} を式 (14) に代入することにより、ZMP のピーク値が得られる。この値が設定した許容値以下であれば、安定な停止動作の実現が期待できる。

次に極配置の見通しを良くするために、 α のみをパラメータとして残りの極を次のように与える。

$$\beta = -\omega_c, \quad \gamma = \frac{\omega_c^2}{\alpha} \quad (18)$$

Fig. 10 に α として -3.5 , -10.0 , -50.0 を、初期状態として Fig. 8 と同じ値を与えた場合の ZMP と重心の応答例を示す。 α の絶対値が増大するにつれて ZMP ピークは小さくなり、漸近停止 ZMP に近づいていくことが観察できる。このとき入力 u_x は最適レギュレータと同様初期値が最も大きい。Fig. 11 の α と ZMP ピークの関係でも同じ傾向が観察できる。このグラフでは Fig. 9 と同じ漸近停止 ZMP を満たす初期条件 ($x_0 + \frac{v_0}{\omega_c} = 0.143$, $p_{x0} = 0$) について ZMP をプロットしているが、最適レギュレータによる方法と同様に漸近停止 ZMP が等しければ、どの初期条件を用いても ZMP の最大値はすべて一致していることが分かる。一方、 α の絶対値が増大するにつれて重心および ZMP の原点への収束性が悪化しており、ZMP ピークと収束性はトレードオフの関係となっている。これは Napoleon [15] らによって示されている、時間応答における制御性能の限界と一致する。

Fig. 9 と Fig. 11 を比較すると最適レギュレータに基づく停止軌道に比べ、ここで提案する極配置法に基づく停止軌道のほうがはるかに小さな ZMP のピークを実現できることが分かる。極配置は最適レギュレータと比較して、少ない計算量でフィードバックゲインを求めることができるため、実時間での計算に適している。特に初期重心高さが異なる場合においても、重心高さごとにフィードバックゲインのテーブルを用意したりする

Fig. 10 Stop trajectory by proposed pole assignment

Fig. 11 Relation between ZMP peak and α

ことなく、安定な停止軌道を生成することが可能である。そこで以降のシミュレーションと実験では常に後者を採用することにする。

5. ヒューマノイドロボット HRP-2 を用いた停止動作

5.1 停止条件評価

ここでは、ヒューマノイドロボット HRP-2 のモデルを用いて停止軌道を生成する。Fig. 12 に示すように、足裏の地面への接地点の凸包として定義される支持多角形の辺と ZMP の最短距離を安定余裕 $d_{\min}$ とする。

例として、時速 1.35 [km/h] の歩行中の両脚期初期および末期に停止したときに生成された軌道を Fig. 13 に示す。重心の初期値を△、ZMP の初期値を○とし、重心および ZMP が足首中心を結んだ直線の間中に位置する原点に収束する様子を表している。両脚期初期では ZMP が重心より後部にあるため重心は前方に加速している。重心が停止するためには、ZMP が重心より前方に移動して加速している重心を減速させるので、ZMP の移動量は大きくなる。一方、両脚期末期では ZMP が重心より前方にあるため、重心は減速している。重心が停止するためには、ZMP を前方に移動させて重心の減速量を大きくするだけでよいので、両脚期初期と比べると ZMP の移動量は少なく済む。このように、両脚期のどのタイミングで停止軌道を開始するかによって ZMP の移動量が異なり、ZMP の安定余裕が異なってくるのが分かる。

HRP-2 の動力学モデルに対し、(A) 低速 (0~1.35 [km/h])、

Fig. 12 Stability margin of the ZMP

Fig. 13 Stop trajectories of the COG and the ZMP on the floor (walking speed: 1.35 [km/h])

(B) 中速 (1.07~2.0 [km/h]), (C) 中高速 (1.33~2.5 [km/h]) の各直進歩行パターンでの両脚期において、両脚期の様々なタイミングで停止軌道を生成したときの安定余裕の大きさを Fig. 14 に示す。歩行パラメータを Table 1 に示す。

ここでは式 (18) の極配置として、 x, y 軸共に α を -30 に設定した。 α の値は、実機のロボットが安定に歩行可能な上限速度である 2.5 [km/h] において、安定余裕を確保できる値を選んだ。Fig. 14 の太線は、両脚期の途中で停止軌道を生成したときの安定余裕の大きさを表している。細線は、歩行速度ごとに両脚期の様々なタイミングで停止軌道を生成したときの安定余裕の最大値および最小値である。安定余裕の最大値や最小値は、必ずしも両脚期の初期に安定余裕が最大に、あるいは両脚期の末期に安定余裕が最小になるわけではないことに注意されたい。これらの結果から 2.5 [km/h] までの直進歩行においては、両脚期のどのタイミングで停止動作を開始しても、安定な停止軌道を生成することが可能であることが分かる。

5.2 全身の停止動作生成

4 章では腰の並進運動を重心運動に見立て、元の重心軌道と加速度の次元まで連続な停止軌道を生成する手法について述べた。ヒューマノイドロボットは脚以外に腕や頭部にも関節を有しており、腰の並進以外の部位についても停止動作を生成する必要がある。また停止動作生成に当たって、3 章で述べたように、絶対座標系における腰リンクの目標姿勢、腰リンク座標系における目標 ZMP および目標関節角から構成される動作パターンから停止軌道を生成し、歩行周期などの歩容パラメータは与えられないとする。これらの前提から全身運動を伴うヒューマノイドロボットの安定な停止動作を行うに当たって、次のことを行う必要がある。

- 動作パターンから両脚期の推定
- 足裏の地面への倣い動作

Fig. 14 Relation between walking speed and stability margin of the ZMP ($\alpha = -30$)

Table 1 Walking parameters

	Speed [km/h]	Step length [m]	S.S. [s]	D.S. [s]	COG height [m]
(A)	0 - 1.35	0 - 0.300	0.700	0.100	0.81
(B)	1.07 - 2.00	0.200 - 0.375	0.600	0.075	0.79
(C)	1.33 - 2.50	0.200 - 0.375	0.465	0.075	0.75

●上体関節、腰の鉛直方向および腰の姿勢角の停止動作生成
両脚期の全時間帯で停止要求を受け入れるに当たって、両脚期には踵着地や踵離床のように足裏の一部しか地面に接地していない状態も含まれるため、足裏の地面への強い動作が必要となる。床面に面接触していない足裏は、ZMP と両脚中心の距離に応じて足裏姿勢を水平にし、その後は水平姿勢を保つようにする。

また上体関節の停止動作について、初期関節角、初期関節角速度および初期関節角加速度をそれぞれ θ_0 , $\dot{\theta}_0$, $\ddot{\theta}_0$ とし、停止時間 T_f において関節角速度および関節角加速度が 0 となる 4 次多項式で関節角を表現する。

$$\theta(t) = \theta_0 + \dot{\theta}_0 t + \frac{\ddot{\theta}_0}{2} t^2 - \frac{3\dot{\theta}_0 + 2\ddot{\theta}_0 T_f}{3T_f^2} t^3 + \frac{2\dot{\theta}_0 + \ddot{\theta}_0 T_f}{4T_f^3} t^4 \quad (19)$$

$$\dot{\theta}(t) = \frac{1}{T_f^3} (t - T_f)^2 \left((2\dot{\theta}_0 + \ddot{\theta}_0 T_f)t + \dot{\theta}_0 T_f \right) \quad (20)$$

$$\ddot{\theta}(t) = \frac{1}{T_f^3} (t - T_f) \left(3(2\dot{\theta}_0 + \ddot{\theta}_0 T_f)t - \ddot{\theta}_0 T_f^2 \right) \quad (21)$$

停止動作における関節角の極値は、

$$\theta_0, \theta \left(-\frac{\dot{\theta}_0 T_f}{2\dot{\theta}_0 + \ddot{\theta}_0 T_f} \right), \theta(T_f), \quad (22)$$

のいずれかで与えられる。また関節角速度が最大となる時間は、

$$T_{vmax} = \begin{cases} 0 & \left(\text{if } \frac{\ddot{\theta}_0}{2\dot{\theta}_0 + \ddot{\theta}_0 T_f} \leq 0 \right) \\ \frac{\dot{\theta}_0 T_f^2}{3(2\dot{\theta}_0 + \ddot{\theta}_0 T_f)} & \left(\text{if } \frac{\ddot{\theta}_0}{2\dot{\theta}_0 + \ddot{\theta}_0 T_f} > 0 \right) \end{cases} \quad (23)$$

式 (23) を式 (20) に代入して関節角速度の最大値を得る。

$$\dot{\theta}_{max} = \begin{cases} \dot{\theta}_0 & \left(\text{if } \frac{\ddot{\theta}_0}{2\dot{\theta}_0 + \ddot{\theta}_0 T_f} \leq 0 \right) \\ \frac{4(3\dot{\theta}_0 + \ddot{\theta}_0 T_f)^3}{27(2\dot{\theta}_0 + \ddot{\theta}_0 T_f)^2} & \left(\text{if } \frac{\ddot{\theta}_0}{2\dot{\theta}_0 + \ddot{\theta}_0 T_f} > 0 \right) \end{cases} \quad (24)$$

計算量削減のためあらかじめ終端時刻 T_f を設定しておき、式 (22) において、初期値 (θ_0) 以外の関節角の極値が可動範囲を超えた場合は、関節の可動範囲から T_f を再計算する。また式 (24) の $\dot{\theta}_{max}$ が関節角速度の上限値を超えた場合は、角速度の上限値から式 (24) より T_f に関する 3 次方程式を解いて求める。腰の鉛直方向の運動や腰の姿勢角も同様の方法で生成する。

6. 実験結果

本章ではヒューマノイドロボット HRP-2 による緊急停止を行った際の実験結果を示す。本章におけるすべての実験において、極を $[\alpha, \beta, \gamma] = [-1, -\omega_c, -100]$ に設定した。 ω_c は停止指令が与えられた時刻の重心高さから導出し、それ以降の停止動作では一定とした。また上体関節および腰の鉛直方向や腰の姿勢角の停止時間 T_f を 0.3 [s] とした。式 (14) で表される重心の停止軌道は、重心位置、速度、および ZMP が 0 に収束するのに無限大の時間がかかるが、各状態が 1.0×10^{-3} 以下となったときを停止動作の完了とした。

6.1 舞踊動作中の緊急停止

初めに、全身を伴った動作中に停止動作を行った例を示す。Fig. 15 の上段は、東京大学池内研究室においてモーションキャプチャから取得したデータを元に作成された会津磐梯山踊り [16] のオフラインパターンデータを実行している様子を表している。

Fig. 15 Snapshot of emergency stop (Aizu bandaisan dancing)

$t = 13.83$ [s] にオペレータから停止指令が発せられたが、支持状態が両脚期であったため、その直後より安定な重心軌道と関節の停止軌道を生成している。ロボットは、 $t = 20$ [s] で完全に静止した。ロボットは、 $t = 20$ [s] で再度オペレータからの指令を受けて、 $t = 38$ [s] でホームポジションに復帰した。元のモーションデータが可動範囲や関節速度限界に対してある程度余裕を持って作成されているため、それぞれの両脚期においてリンク同士が衝突することなく停止可能であった。

6.2 直進歩行における緊急停止

次に直進歩行中に停止を行った。歩行パターンとして、倒立振子による重心の近似モデルを用いたオンラインで生成された 1.125 [km/h] の歩行パターンおよび全身の動力学モデルを用いてオフラインで生成された 2.5 [km/h] の高速歩行パターンを用いた。このとき歩容パラメータは、前者は歩幅 0.25 [m]、歩行周期 0.8 [s]、後者は歩幅 0.375 [m]、歩行周期 0.54 [s] である。各停止動作の初期値が等しくなるように、停止指令を単脚中に与え、両脚期を検出した直後に停止動作を開始するようにした。 1.125 [km/h] および 2.5 [km/h] の直進歩行パターンについて 10 回繰り返した。

Fig. 16 および Fig. 17 は、(a) Sagittal 平面および (b) Frontal 平面における停止しないときの目標 ZMP と重心指令値、停止時の目標 ZMP と重心指令値、および ZMP の時間応答を示す。(c) は床平面に投影した ZMP および重心の指令値および ZMP の空間軌道応答である。歩行速度にかかわらず、

ZMP がピークに達した後の Frontal 平面および Sagittal 平面の ZMP の追従性が悪化している。この原因として、接地点において手や腰を振る動作によって発生する鉛直回りのモーメントが、足首機構を経由して ZMP として表れたと考えられる。Fig. 17 (b) の Frontal 平面の ZMP 応答では、約 8.7 [s] 後にも大きな追従誤差が見られる。

一方、Fig. 17 (c) では ZMP 応答が支持多角形の境界付近を移動し、その後原点に収束している。これは安定化制御器が ZMP の誤差を補償するために、最大限の重心の復帰モーメントを発生しようとした結果と考えられる。したがって ZMP 誤差は、ZMP 指令値が支持多角形の境界付近に達しているため、HRP-2 の足首関節と足裏の間に取り付けられている衝撃吸収用の弾性体 [7] が大きいたわみ、その非線形特性の影響で安定化制御器による補償が困難となって生じたものと考えられる。 2.5 [km/h] における非常停止実験の様子を Fig. 18 に示す。上段は停止前の歩行の様子を、中段は $t = 8.1$ [s] において停止せずに歩き続けたときの様子、下段は $t = 8.1$ [s] から始まる両脚期において、直前の単脚期で与えられていた緊急停止指令より、停止動作を開始したときの様子をそれぞれ表している。停止動作では、一度腰が前方に移動し、 $t = 8.5$ [s] から両脚中心へ向かっている様子が伺える。これらの結果から、足裏が地面から離れることなく安定な停止動作が実現されていることが分かる。

理論的には目標 ZMP のピーク値は漸近停止 ZMP まで小さくできるが、腰の水平移動量も大きくなるため膝が伸び切っ

Fig. 16 Experimental results (walking speed: 1.125 [km/h])

Fig. 17 Experimental results (walking speed: 2.5 [km/h])

Fig. 18 Snapshot of emergency stop (2.5 [km/h])

しまう可能性がある。この場合、腰を下げる、あるいは伸び切る側の足を浮かして単脚支持で踏ん張るなどで対処可能であるが、いずれも ZMP 安定余裕を損なう可能性が高い。足裏の地面への接地を保ちながら停止するには、2.5 [km/h] の歩行が限界であると言える。

7. おわりに

本稿では動作中のヒューマノイドロボットが緊急停止指令が与えられてから 1 歩以内に停止するための動作生成法について述べた。信頼性と実時間性の観点から、ダイナミクスの影響が少ない両脚期に停止軌道を生成し、単質点の線形倒立振り子による重心の近似モデルのダイナミクスを状態空間で表し、状態フィードバックにより安定化することで重心の停止軌道を生成した。極配置によってフィードバックゲインを定めることにより、ZMP の二乗積分で表される評価関数を用いた最適レギュレータよりも ZMP 最大値の小さい停止軌道が生成可能なことを示し、さらにその停止動作に有効な極配置の指針を示した。本手法の有効性を会津磐梯山踊り、1.125 [km/h] の歩行および 2.5 [km/h] の高速歩行における停止実験により示した。

本手法を用いた重心の停止動作生成法は足裏の支持状態に依存しないが、単脚期における遊脚の運動生成が特に問題になる。ZMP 軌道が支持多角形の内側であれば、遊脚の着地位置、着地時間によらず停止可能であるが、ZMP 軌道が支持多角形を超える場合には、超える時刻までに遊脚が ZMP 軌道を包含する位置に着地しなくてはならない。特に単脚期では関節の可動範囲、角速度、トルクなどの制約を満たす遊脚軌道を生成し、かつ任意の初期値から動力学的に安定な停止動作を生成する必要がある。これを実時間で行うには非常に高い演算能力を必要とする。また予期せぬ不整地を踏んでバランスを崩した場合や未知環境と接触した場合における安定な停止動作、あるいはハードウェアの故障検出や故障箇所を考慮した停止動作生成などが

今後の課題である。

謝 辞 本研究を遂行するに当たって、東京工業大学の三平満司教授および中浦茂樹助教に貴重な助言をたまわりました。この場を借りて感謝の意を表明します。

参 考 文 献

- [1] 藤原, 金広, 梶田, 横井, 齋藤, 原田, 比留川, 五十棲: “等身大ヒューマノイドロボットの後方転倒制御の実現”, 日本ロボット学会誌, vol.23, no.4, pp.427-434, 2005.
- [2] 金広, 金子, 藤原, 原田, 梶田, 横井, 比留川, 赤地, 五十棲: “ヒューマノイドの転倒回復機能の実現”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.1, pp.37-45, 2004.
- [3] 金子, 梶田, 金広, 森澤, 比留川: “恐竜型二足歩行ロボット”, 第 23 回日本ロボット学会学術講演会, CD-ROM, 2G17, 2005.
- [4] 金子, 金広, 森澤, 梶田, 藤原, 原田, 比留川: “ヒューマノイドの動作一時停止システム—実時間動作一時停止判断と実時間パターン修正—”, ロボット学会誌, vol.25, no.2, pp.289-298, 2007.
- [5] M. Morisawa, S. Kajita, K. Harada, K. Kaneko, F. Kanehiro, K. Fujiwara and H. Hirukawa: “Emergency Stop Algorithm for Walking Humanoid Robots,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robotics and Systems, pp.31-37, 2005.
- [6] M. Vukobratovic and D. Juricic: “Contribution to the Synthesis of Biped Gait,” IEEE Trans. on Bio-Med. Eng., vol.BME-16, no.1, pp.1-6, 1969.
- [7] K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, H. Hirukawa, T. Kawasaki, M. Hirata, K. Akach and T. Isozumi: “The Humanoid Robot HRP2,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1083-1090, 2004.
- [8] S. Kagami, K. Nishiwaki, T. Kitagawa, T. Sugihara, M. Inaba and H. Inoue: “A Fast Generation Method of a Dynamically Stable Humanoid Robot Trajectory with Enhanced ZMP Constraint,” Proc. of the 2000 IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, 2000.
- [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,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1620-1626, 2003.
- [10] 原田, 梶田, 森澤, 金広, 藤原, 金子, 比留川: “ヒューマノイドロ

ボットの実時間歩容計画における解析的アプローチ”, 日本ロボット学会誌, vol.23, no.6, pp.752-760, 2005.

- [11] T. Sugihara and Y. Nakamura, “A Fast Online Gait Planning with Boundary Condition Relaxation for Humanoid Robot,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.306-311, 2005.
- [12] T. Takubo, T. Tanaka, K. Inoue and T. Arai: “Emergent walking stop using 3-D ZMP modification criteria map for Humanoid Robots,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2676-2681, 2007.
- [13] T. Sugihara, Y. Nakamura and H. Inoue: “Realtime Humanoid Motion Generation through ZMP Manipulation based on Inverted Pendulum Control,” Proc. of IEEE Int. Conf. on

Robotics and Automation, pp.1404-1409, 2002.

- [14] 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.
- [15] Napoleon, 中浦, 三平: “人間型ロボットの ZMP フィードバック制御における制御性能の限界”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.5, pp.656-665, 2005.
- [16] S. Nakaoka, A. Nakazawa, F. Kanehiro, K. Kaneko, M. Morisawa, H. Hirukawa and K. Ikeuchi: “Learning from Observation Paradigm: Leg Task Model for Enabling a Biped Humanoid Robot to Imitate Human Dances,” Int. Journal of Robotics Research, pp.829-844, 2007.

森澤光晴 (Mitsuharu Morisawa)

2004 年 3 月慶應義塾大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻博士課程修了。博士 (工学)。同年 4 月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研究員。パラレルメカニズム, モーションコントロール, ヒューマノイドロボットなどの研究に従事。IEEE 等の会員。

(日本ロボット学会正会員)

金子健二 (Kenji Kaneko)

1990 年 3 月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, 現在に至る。博士 (工学)。モーションコントロール, 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)

中岡慎一郎 (Shin'ichiro Nakaoka)

2006 年 3 月東京大学大学院工学研究科博士課程修了。博士 (工学)。同年 4 月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研究員。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)

藤原清司 (Kiyoshi Fujiwara)

1997 年筑波大学大学院工学研究科修了。同年通産省工業技術院電子技術総合研究所に入所。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研究員, 現在に至る。2008 年 3 月筑波大学大学院システム情報工学研究科博士課程修了。博士 (工学)。生体制御, 医療福祉工学, マンマシンインターフェース, 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)

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, 現在に至る。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) の各会員。

(日本ロボット学会正会員)

金広文男 (Fumio Kanehiro)

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: 産業技術総合研究所知能システム研究部門主任研究員。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 等の会員。

(日本ロボット学会正会員)

原田研介 (Kensuke Harada)

1997 年 3 月京都大学大学院工学研究科機械工学専攻後期博士課程修了。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入所。現: 産業技術総合研究所主任研究員。2006~2007 年米国スタンフォード大学客員研究員。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, 日本機械学会等の各会員。

(日本ロボット学会正会員)

比留川博久 (Hirohisa Hirukawa)

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副部門長。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。IEEE 等の会員。

(日本ロボット学会正会員)