上体を有する 2 足歩行ロボットの学習制御

李 清 華* 高 西 淳 夫** 加 藤 一 郎**

Learning Control for a Biped Walking Robot with a Trunk

Qinghua LI Atsuo TAKANISHI Ichiro KATO

In this paper, the authors propose a learning control method of the compensative trunk motion for a biped walking robot which has a trunk, based on the ZMP (Zero Moment Point) stability criterion, for the cases of the ZMP within and outside the stable region. And the authors develop a biped walking robot with a ZMP measurement system and a support device. By computer simulation and learning control experiments, the authors confirmed the convergency of the learning method and the change of the convergence rate with the change of the weight coefficient. By the learning control experiments for the case of ZMP outside the stable region, the authors showed that even though the walking state of the robot itself changes, by supporting it with a human and its learning with the ZMP and the support force, stable walking even without the support of a human is realized at last.

Key Words: Robot, Biped Walking Robot, Locomotion, ZMP, Learning Control

1. は じ め に

本研究の目的は、上体を有する 2 足歩行ロボットにおいて上体補償運動の学習制御を実現することである。

現在のロボットには、様々な形で知能が要求されている。ロボットにおける知能の重要な機能としては、環境適応能力や学習能力などが挙げられる。

我々は、1987 年より 2 足歩行ロボットに環境適応能力を付加する研究として、外力を受けてもそれに対応する能力^{1),2)}、階段、斜面などの不整地においても歩行できる能力³⁾などに関する研究を行ってきた。学習能力の付加は我々の新たな研究テーマである。

我々は、2 足歩行ロボットの歩行における安定判別の規範として ZMP (Zero Moment Point) 規範⁴⁾を用いている。これを用いた歩行制御方式としては、我々が既に提案した上体補償型 2 足歩行制御方式を採用し

ている⁵⁾。本方式は、あらかじめ歩行前に路面の形状に合わせて任意に作成した下肢運動パターンに対し、足部と路面との接点が形成する支持多角形(安定領域)内に入るように ZMP 軌道(以下これを設定 ZMP と呼ぶ)を設定し、これを動的に補償する上体の運動を算出することで上体運動パターンを作成しておき、歩行中は上記の手順で作成した下肢運動パターンと上体運動パターンとを用いてロボットをプログラム制御することにより 2 足歩行を実現するというものである。

しかし、上記の歩行制御方式は歩行中の実際の ZMP (以下これを実 ZMP と呼ぶ)を利用するものではない。計算モデルと機械モデルとのパラメータ誤差や構造部材の弾性によるたわみなどによって、実 ZMP と設定 ZMP との間には偏差があることが考えられる。そこで我々は、もし実 ZMP を測定できれば、それを利用して歩行を繰り返すごとに実 ZMP が設定 ZMP に近づくような学習的な制御も可能となり、より安定度の高い(stability margin の大きい)歩行の実現にとって有効であると考え、研究を開始した。

原稿受付 1992 年 12 月 14 日

*早稲田大学大学院

**早稲田大学理工学部

これまでのところ、2足歩行ロボットの動的歩行に関する学習制御の研究例は、川村らの1件だけである⁶⁾。しかし、これは設定した各自由度の目標軌道に正確に追従するための学習制御であり、ZMP等の安定状態を表すパラメータを用いたものではなく、例えば計算モデルと機械モデルとのパラメータなどが大きく異なっている場合には学習を行っても歩行そのものの安定性は保証されない。

これに対し、本論文ではZMP規範に基づく上体を有する2足歩行ロボットにおける上体補償運動の学習アルゴリズムを提案する。この学習制御方法は、実質上ZMPの学習であり、ZMP規範からみれば2足歩行の安定性そのものを高めることが可能である。

本論文の骨子は以下の3点よりなる。

(1) ZMPが安定領域内にある場合の上体補償運動の学習

歩行を繰り返す過程で、歩行中の実ZMPの測定及び、これを利用した上体運動の修正を行っていくことにより、実ZMPを設定ZMPに近づけるアルゴリズム。

(2) ZMPが安定領域外にある場合の上体補償運動の学習

実ZMPが安定領域外にある場合、人間の介助によりロボットの歩行を繰り返しながら、歩行中の実ZMPと介助力を測定し、それらを利用して上体運動を修正することにより、実ZMPを設定ZMPに近づけることで、最終的には介助なしでの歩行を実現する方法。

(3) ZMP及び介助力測定機能を有する2足歩行ロボットの開発

両脚下肢部及び介助機構に6軸力センサを取り付けることで歩行中の実ZMP及び人間の介助力の測定する機能を有する2足歩行ロボットの開発。

2. 2足歩行ロボットのモデル化と上体補償運動

2足歩行ロボットを質点系として見た力学モデルをFig. 1に示す。同質点系において絶対座標系O-XYZに関するZMPの方程式は以下のように表せる⁷⁾。

$$\begin{aligned} Y_{zmpx} &= \frac{\sum_{i=0}^{n-1} m_i (\ddot{z}_i + g) x_i - \sum_{i=0}^{n-1} m_i \ddot{x}_i z_i}{\sum_{i=0}^{n-1} m_i (\ddot{z}_i + g)} \\ Y_{zmpy} &= \frac{\sum_{i=0}^{n-1} m_i (\ddot{z}_i + g) y_i - \sum_{i=0}^{n-1} m_i \ddot{y}_i z_i}{\sum_{i=0}^{n-1} m_i (\ddot{z}_i + g)} \end{aligned} \quad (1)$$

Fig. 1 Model of a biped walking robot having a trunk as a system of n -particles.

ただし、 m_i は質点 i の質量、 $(x_i, y_i, z_i)^T$ は質点 i の座標、 $(Y_{zmpx}, Y_{zmpy}, 0)^T$ はZMPの座標、 g は重力加速度、 T は転置記号である。

以後の計算の便宜上、Fig. 1のようにロボットの腰部に並進運動座標系 $O'-X'Y'Z'$ を設けると、空間の1点はO-XYZに対し $(x, y, z)^T$ 、 $O'-X'Y'Z'$ に対し $(x', y', z')^T$ と表され、次の式が成り立つ。

$$(x, y, z)^T = (x_0, y_0, z_0)^T + (x', y', z')^T \quad (2)$$

ただし、 $(x_0, y_0, z_0)^T$ はO-XYZにおける O' の座標である。

ここで、2足歩行ロボットは下肢と上体とから構成されるものとする。下肢は移動機能を担い、上体は歩行の安定化機能を担う。つまり、上体はあらかじめ任意に設定された下肢運動に対し設定されたZMP軌道を補償する運動を行う。

この上体の補償運動の算出には、これまでに我々が提案している上体補償運動算出アルゴリズム⁵⁾を用いる。このアルゴリズムの概要(Fig. 2)は、次のようになる。

式(1)において、任意に設定された下肢運動とZMP軌道を既知として、未知の上体運動 x_0, y_0, z_0 を求める。しかし、式(1)から導かれる微分方程式が干渉・非線形となるため、一般に解析解を求めるのは困難である。そこで、歩行中にロボットの腰の高さが一定であり、上体が Z 軸方向に動かないもの($z_0 = \text{constant}$)と仮定し、微分方程式を非干渉・線形化する。

また、歩行開始から歩行終了までを1周期とみなせば、同方程式は周期関数となる。そこで、FFT(Fast Fourier Transformation)を用いた周波数領域での係数比較により x_0, y_0, z_0 の周期解を求める。ただし、ここで得られた解は近似解である。この解を元の式(1)に代入し、非線形モデルに対するZMPを計算す

Fig. 2 Iterative algorithm of computing compensative trunk motion. e : allowable error between the computed ZMP and the input ZMP.

る。この計算された ZMP と入力 ZMP との偏差を利用し、繰り返し計算を行うことで x_0, y_0, z_0 の厳密解を得る。こうして同じ下肢運動に対し、与えられた ZMP 軌道に対応する上体補償運動が得られる。

3. 上体補償運動学習アルゴリズム

システムの出力を用いて次の入力を修正し、システムの出力を目標出力に近づけるという学習制御方法は、幾つか提案されている^{8),9)}。この学習制御方法を上体を有する2足歩行ロボットの歩行安定化に適用すると、以下ようになる。ただし、学習は上体の補償運動に対してのみ行い、下肢運動はあらかじめ路面の形状に合わせて作成しておき、学習の過程では不変であるとする。ここで、 k 回目の試行に対して、入力 ZMP $Y_{i(k)} = (Y_{ix(k)}, Y_{iy(k)}, 0)^T$ をシステムの入力、ZMP 測定機構により測定した実 ZMP $Y_{m(k)} = (Y_{mx(k)}, Y_{my(k)}, 0)^T$ をシステムの出力、設定 ZMP $Y_d = (Y_{dx}, Y_{dy}, 0)^T$ をシステムの目標出力とする。

本章では ZMP が安定領域の内側にある場合と外側にある場合とに分けて学習アルゴリズムについて述べ

Fig. 3 Learning control method for the case of the ZMP within the stable region. The iterative algorithm is shown in Fig. 2. e : allowable error between the actual ZMP and the preset ZMP. $G(s)$: a low-pass filter. α : a weight coefficient.

る。

3.1 ZMP が安定領域内にある場合の学習

最初の入力 ZMP $Y_{i(0)}$ を Y_d とする。

- (1) 第2章で述べた上体補償運動算出アルゴリズムにより $Y_{i(k)}$ に対応する上体補償運動を求める。
- (2) 実際に歩行ロボットを用いて歩行を行い、 $Y_{m(k)}$ を測定する。
- (3) ZMP 偏差 $e_{(k)} = (e_{x(k)}, e_{y(k)}, 0)^T$ を次の式のように求める。

$$e_{(k)} = Y_d - Y_{m(k)} \quad (3)$$

- (4) $Y_{i(k+1)}$ を次の式のように修正し、 $Y_{i(k+1)}$ に対応する新たな上体補償運動を求める。

$$Y_{i(k+1)} = Y_{i(k)} + \alpha G(s) e_{(k)} \quad (4)$$

以上のプロセスを繰り返すことで、 $Y_{m(k)}$ を Y_d に近づける。このアルゴリズムのフローチャートを Fig. 3 に示す。

式(4)のように ZMP 偏差に重み係数 α をかけたも

のを利用している. この α は, 偏差を利用する度合いを表す. また, 高周波ノイズを除去するため ZMP 偏差にローパスフィルタ $G(s)$ をかけている.

学習アルゴリズムの収束性を評価する関数には,

$$d_k = \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{e_x^2(k) + e_y^2(k)} dt \quad (5)$$

を用いる. ただし, T は歩行周期である.

もし,

$$d_{k+1} < d_k \quad \text{or} \quad \lim_{k \rightarrow \infty} d_k = 0 \quad (6)$$

となる場合, 収束性があるとする.

3.2 シミュレーションによる学習の収束性の検討

上記の学習アルゴリズムの収束性, つまり実 ZMP が設定 ZMP に近づくかどうかについては, 数理解析的な証明は行っていない. 代わりに, 実モデルを想定して計算モデルの上体の質量などのパラメータを変化させた場合に算出した ZMP を実 ZMP と仮定し, この ZMP と設定 ZMP との偏差を利用して, 学習の収束性について検討するためのシミュレーション解析を行った.

その結果の一例を Fig. 4 に示す. これは, 実モデルの上体の質量を 60 kg と仮定した (計算モデルでは 30 kg) 場合に, 実 ZMP が設定 ZMP に近づく様子である. また, 同じ物理パラメータで, α をそれぞれ 0.7, 0.5 としたときの偏差を評価関数で表した結果を Fig. 5 に示す.

様々な条件でシミュレーションを行った結果, 学習するごとに偏差がゼロに向かい, 本学習アルゴリズムによる ZMP の収束性があることが確認できた. また, 学習する際に偏差にかける重み係数 α により, 収束のスピードが違うことも確認できた.

3.3 ZMP が安定領域外にある場合の学習

3.1 で述べた学習制御では, 実 ZMP が最初から安定領域内にあることを前提としている. つまり, 最初に上体補償運動の算出に用いる入力 ZMP は安定領域内に任意に作成されるが, 種々の要因によって設定 ZMP と実 ZMP との間に偏差が生じたとしても, 実 ZMP も安定領域内に収まっている必要がある. この場合には, ロボットの支持状態が崩れることなく歩行ができ, ロボット単独での学習が可能となる.

しかし, ZMP が安定領域の外に出てしまうような場合には^{*)}, ロボットの支持状態が崩れることになり, 3.1 で述べた方法によるロボット単独での学習は不可能である. この問題に対処するため, 我々はロボットの支持状態が崩れないように人間が介助しながら

Fig. 4 ZMP trajectories on X' axis in the learning simulation. $\alpha=0.7$. Trunk mass: suppositional model, 60 kg; mathematical model, 30 kg.

Fig. 5 Simulation results expressed in terms of performance index.

歩行することで, そのときのロボットの実 ZMP 及び介助力情報を用いて学習を行う方法を考案した. この学習アルゴリズム (Fig. 6) は以下になる.

最初の入力 ZMP $Y_{i(0)}$ を “任意に” 作成する.

- (1) 上体補償運動算出アルゴリズムにより $Y_{i(k)}$ に対応する上体補償運動を求める.
- (2) ロボットを歩かせてみる. ロボットの支持状態が崩れてしまうような場合には, 人間の介助により支持状態を保持しつつロボットを歩かせる. このとき ZMP 測定機構によりロボットの歩行中の実 ZMP $Y_{m(k)}$, 及び介助機構にある 6 軸力センサにより人間の介助力を

注 1) 実際には実 ZMP は支持多角形の辺上あるいは頂点上に移り, 外に出ることはないが, ここでは以後に述べているように, 仮にロボットの足部が路面に固定されていると仮定した場合の ZMP (仮想 ZMP) を指している.

Fig. 6 Learning control method for the case of the ZMP outside the stable region. The iterative algorithm is shown in Fig. 2. e : allowable error between the virtual ZMP and the preset ZMP. $G(s)$: a low-pass filter. α : a weight coefficient.

同時に測定する。 $Y_{m(k)}$ と介助力から、介助力がなくとも支持状態が保持されているものと仮定した場合の仮想上の ZMP $Y'_{m(k)} = (Y'_{mx(k)}, Y'_{my(k)}, 0)^T$ (今後これを仮想 ZMP と呼ぶことにする) を計算する (式 (9) を参照)。

- (3) ZMP 偏差 e'_k を次のように求める。

$$e'_k = Y_d - Y'_{m(k)} \quad (3')$$

- (4) $Y_{i(k+1)}$ を次の式のように修正し、 $Y_{i(k+1)}$ に対応する新たな上体補償運動を求める。

$$Y_{i(k+1)} = Y_{i(k)} + \alpha G(s) e'_k \quad (4')$$

以上のプロセスを繰り返すことで、最初は安定領域から外れた ZMP $Y_{m(0)}$ を安定領域内にある設定 ZMP Y_d に近づける。

Fig. 7 Photograph of WL-12RH.

4. ZMP 及び介助力測定機能を有する2足歩行ロボット

4.1 機械モデルの概要

2 足歩行ロボット WL-12 RH (Waseda Leg-12 Refined with Handle) の写真を Fig. 7 に示す。このロボットは、両脚の股関節・膝関節及び足関節にそれぞれピッチ軸回りの 1 自由度、上体にピッチ・ロール・ヨー軸回りの 3 自由度、合計 9 自由度を有しており、総重量 110 kg、高さ 1.7 m となっている。アクチュエータとしては、油圧式の RA (Rotary Actuator) とサーボ弁を組み合わせた電気-油圧サーボシステムを採用している。各アクチュエータにはレゾルバを取り付けることで、各関節の角度と角速度の同時検出を可能としている。

ロボットの制御システムの概略を Fig. 8 に示す。この制御システムには、4 台の 16 ビットマイクロコンピュータを使用している。3 台のコンピュータはそれぞれ右脚、左脚、上体のアクチュエータを直接制御しており、各々ローカルに位置 (角度) フィードバックを行っている。もう 1 台のコンピュータは、ほかの 3 台のコンピュータの上位にあり、メインコンピュータとして、ホストコンピュータとの通信や、出力角度パターンの補間、ロボット全体のモニタなどを行っている。

4.2 ZMP 測定機構及び介助機構

Fig. 8 Control system of WL-12RH.

Fig. 9 The biped walking robot supported by a human.

Fig. 9 は人間の介助でロボットが歩行する様子である。ロボットの両脚の下腿部にそれぞれ 6 軸力センサ (Universal Force-moment Sensor: UFS) UFS₁, UFS₂ を付加することにより歩行中の実 ZMP を測定する機構を構成した。また、腰の後部には介助ハンドルと人間の介助力を測定する 6 軸力センサ UFS₃ より構成される介助機構を設置した。歩行中、各センサからの 6 軸力データはシリアル通信回線を介してロボ

ットの制御用コンピュータに送られ、メモリにストアされる。歩行後、これらの 6 軸力データはホストコンピュータにロードされる (Fig. 8 を参照)。

UFS₁, UFS₂ の 6 軸力データを用いてロボットの実 ZMP $Y_m = (Y_{mx}, Y_{my}, 0)^T$ を以下の式 (7) により求める^{10), 11)}。

$$Y_{mx} = \frac{\sum M_{y1} + \sum M_{y2}}{\sum F_{z1} + \sum F_{z2}} \quad (7)$$

$$Y_{my} = \frac{\sum M_{x1} + \sum M_{x2}}{\sum F_{z1} + \sum F_{z2}}$$

ただし、

$$\begin{aligned} \sum M_{yi} &= x_{ai} m_{ai} g + x_{si} F_{zi} - z_{si} F_{xi} - M_{yi} \\ \sum M_{xi} &= y_{ai} m_{ai} g + y_{si} F_{zi} - z_{si} F_{yi} + M_{xi} \\ \sum F_{zi} &= F_{zi} + m_{ai} g \end{aligned} \quad (8)$$

$F_i = (F_{xi}, F_{yi}, F_{zi})^T$ と $M_i = (M_{xi}, M_{yi}, M_{zi})^T$ は UFS_i からの力とモーメント、 $S_i = (x_{si}, y_{si}, z_{si})^T$ は UFS_i の位置、 m_{ai} と $(x_{ai}, y_{ai}, z_{ai})^T$ は足部 $A_i (i=1, 2)$ の質量と位置である。

また、UFS₃ の 6 軸力データとロボットの実 ZMP を用いて仮想 ZMP $Y'_m (Y'_{mx}, Y'_{my}, 0)^T$ を以下の式 (9) により求める。

$$Y'_{mx} = \frac{Y_{mx} (\sum F_{z1} + \sum F_{z2}) - \sum M_{y3}}{\sum F_{z1} + \sum F_{z2} - \sum F_{z3}} \quad (9)$$

$$Y'_{my} = \frac{Y_{my} (\sum F_{z1} + \sum F_{z2}) - \sum M_{x3}}{\sum F_{z1} + \sum F_{z2} - \sum F_{z3}}$$

ただし、

$$\begin{aligned} \sum M_{y3} &= x_{s3} F_{z3} - z_{s3} F_{y3} - M_{y3} \\ \sum M_{x3} &= y_{s3} F_{z3} - z_{s3} F_{x3} + M_{x3} \\ \sum F_{z3} &= F_{z3} \end{aligned} \quad (10)$$

$F_3 = (F_{x3}, F_{y3}, F_{z3})^T$ と $M_3 = (M_{x3}, M_{y3}, M_{z3})^T$ は UFS₃ からの力とモーメント、 $S_3 = (x_{s3}, y_{s3}, z_{s3})^T$ は UFS₃ の位置である。

介助機構の設計において考慮した点は、まず軽量であること、そして人間が介助しやすい機構とすることである。具体的には、棒の部分には CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) を使用して軽量化を図り、介助機構を人間の腰程度の高さでロボットの後方に設置することにより人間がロボットの歩く様子をよく見ながら介助できるようにした。また、介助機構の握りの部分には握りやすさを考慮して市販のハンドルを採用した。

5. 学習制御実験

本学習アルゴリズムの有効性を実証するため、ZMP 測定機構と介助機構を有する 2 足歩行ロボット WL-12 RH を用いて学習制御実験を行った。

ところで、第1章で述べた上体補償型2足歩行制御方式によりロボットの各関節のサーボ制御に高ゲインの位置フィードバックを用いて関節軌道の追従性を高くして学習制御実験を行った。しかし、この実験において、高ゲインフィードバックを用いた場合には関節の剛性が上がり、主にロボットの足部が着地するときに大きな衝撃が発生して歩行が不安定になりやすく、学習制御に支障をきたすという問題が生じた。これに対する解決策として、足関節と膝関節のサーボ制御系の位置ゲインを下げ、ある程度のコンプライアンスを持たせ、再び学習制御実験を行った。その結果、足部が着地するときに生じる衝撃をかなり吸収することができた^{12),13)}。そこで、足部が着地するときに位置ゲインを下げ足部にコンプライアンスを持たせ、足部が単脚支持期のときには位置ゲインを上げ関節軌道の追従性を高めることで、以下の学習制御実験を行った。ここで、ロボットがあらゆる方向からの外乱に対し安定に歩行できるように、ZMPは安定領域のほぼ中心のところに設定し、下肢運動はあらかじめ路面の形状(平坦地)に合わせて作成した。また、実測ZMPデータにけるフィルタにはバターワースフィルタを使用し、次数を4、カットオフ周波数を約0.5 Hzとしている。

5.1 ZMPが安定領域内にある場合の学習制御実験

最初の入力ZMPを設定ZMPにして上体補償運動を算出し、プログラム制御で歩行を試行する。このとき、歩行中の実ZMPをZMP測定機構により測定し、実ZMPと設定ZMPとの偏差を利用し学習制御実験を行った。その結果を以下に述べる。

Fig. 10に歩幅0.3 m, 歩行速度3.4 s/stepの歩行において、 α を0.5として3回学習を行った結果を示す。Fig. 10(a)は最初の試行の結果であり、実ZMPが安定領域内にあるものの、実ZMPと設定ZMPとの間にはかなりの偏差があることが分かる。Fig. 10(b)は3回目の学習の結果であり、実ZMPが設定ZMPに収束していることが分かる。Fig. 11に評価関数による結果を示す($\alpha=0.3$ を含む)。

これらの図に示すように、試行を繰り返すごとに実ZMPが設定ZMPに近づいていることが分かる。また、重み係数により収束のスピードが違うことも確認できる。

5.2 ZMPが安定領域外にある場合の学習制御実験

ロボットの支持状態が崩れるような場合を想定し、

(a) first trial (before learning)

(b) fourth trial

Fig. 10 ZMP trajectories on X' axis in the learning control experiment of walking. Step length: 0.3 m, walking speed: 3.4 s/step. $\alpha=0.5$. SR: Stable Region.

Fig. 11 Results expressed in terms of performance index in the learning control experiment of walking. Step length: 0.3 m, walking speed: 3.4 s/step.

最初の入力ZMPを設定ZMPより X 軸(前後)方向で後方にずらして作成する。5.1と同様に上体補償運動を算出し、プログラム制御で歩行を試行する。ロボットの支持状態が崩れてしまうような場合には、人間

Fig. 12 ZMP trajectories on X' axis in the learning control experiment of stepping supported by a human. Stepping speed : 2.6 s/step. $\alpha=0.5$. SR: Stable Region.

Fig. 13 Results expressed in terms of performance index in the learning control experiment of stepping supported by a human. Stepping speed : 2.6 s/step.

の介助によりロボットを歩かせる。このときロボットの歩行中の実 ZMP と人間の介助力を測定し、式(9)より仮想 ZMP を計算する。この仮想 ZMP と設定 ZMP との偏差を利用して学習制御実験を行った。その結果を以下に述べる。

Fig. 12 に足踏みにおいて α を 0.5 として 3 回学習を行った際の実 ZMP の軌跡を示す。Fig. 13 に評価関数による結果を示す ($\alpha=0.3$ を含む)。これらの図に示すように、安定領域から外れている ZMP が試行を繰り返すごとに安定領域内にある設定 ZMP に収束していくことが分かる。また、重み係数により収束のスピードが違っても確認できる。

Fig. 14 に歩幅 0.3 m, 歩行速度 3.4 s/step の歩行において、 α を 0.3 として 4 回学習した結果を示す。Fig. 14(a) は学習する前の人間の介助で行った試行の結果であり、実 ZMP が安定領域から外れていることが分かる。Fig. 14(b) は 4 回目の学習の結果であり、人間の介助なしで歩行が可能となり、つまり

(a) first trial (before learning)

(b) fifth trial

Fig. 14 ZMP trajectories on X' axis in the learning control experiment of walking supported by a human. Step length : 0.3 m, walking speed : 3.4 s/step. $\alpha=0.3$. SR: Stable Region.

Fig. 15 Results expressed in terms of performance index in the learning control experiment of walking supported by a human. Step length : 0.3 m, walking speed : 3.4 s/step.

ZMP が安定領域に入り、設定 ZMP に収束していることが分かる。Fig. 15 に評価関数による結果を示す。

以上より、ZMP が最初は安定領域外にある場合で

も、人間の介助力情報を用いた学習により設定ZMPに収束し、最終的には介助なしでの歩行を実現していることが分かる。

6. 結 論

上体を有する2足歩行ロボットにおいてZMP規範に基づく上体補償運動の学習アルゴリズムを、ZMPが安定領域の内側にある場合と外側にある場合のそれぞれにおいて提案した。また、ZMP及び介助力測定機能を有する2足歩行ロボットを開発し、その特徴的な機構について述べた。計算機シミュレーション及びロボットを用いた学習制御実験により、学習アルゴリズムに収束性があること及び重み係数の大きさによって収束率が異なることを確認した。さらに、ZMPが安定領域の外側にある場合の学習制御実験により、2足歩行ロボット単独では支持状態が崩れるような場合でも人間が介助を行うことで、その介助力情報を用いた学習を行い、最終的には介助なしでの安定な歩行が実現できることを示した。

以上より、本論文で提案した2足歩行ロボットにおける上体補償運動の学習アルゴリズムが有効であることを確認した。

謝 辞

本研究を進める過程で、2足歩行ロボットのハードウェアに関してご協力をいただいた黒田精工(株)、日本ムーグ(株)、東レ(株)、アナログ・デバイセズ(株)、ニッタ(株)に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) A. Takanishi et al., "Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized with Trunk Motion under Known External Force," in Advanced Robotics 1989: Proc. the Fourth Int. Conf. Advanced Robotics, K. J. Waldron, Ed., Springer-Verlag, pp. 299-310 (1989)
- 2) A. Takanishi et al., "A Control Method for Dynamic Biped Walking under Unknown External Force," Proc. IEEE Int. Workshop Intelligent Robots and Systems '90, pp. 795-801 (1990)
- 3) A. Takanishi et al., "Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized by Trunk Motion on a Sagittally Uneven Surface," Proc. IEEE Int. Workshop Intelligent Robots and Systems '90, pp. 323-330, (1990)
- 4) M. Vukobratovic et al., "On the Stability of Biped Locomotion," IEEE Trans. Biomedical Engineering, Vol. BME-17-1 (1970)
- 5) A. Takanishi et al., "Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized with Trunk Motion," in RoManSy 7: Proc. the Seventh CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators, A. Morecki et al., Eds., Hermes, Paris, pp. 68-79 (1990)
- 6) 川村他, "運動パターン学習による2足歩行ロボットの歩行実現", 日本ロボット学会誌, Vol. 3-3, pp. 177-187 (1985)
- 7) 高西他, "2足歩行ロボットWL-10 RDによる動歩行の実現", 日本ロボット学会誌, Vol. 3-4, pp. 325-336 (1985)
- 8) 内山, "試行による人工の手の高速運動パターンの形成", 計測自動制御学会論文集, Vol. 14-6, pp. 706-712 (1978)
- 9) 川村他, "動的システムの学習的制御法(Betterment Process)の提案", 計測自動制御学会論文集, Vol. 22-1, pp. 56-62 (1986)
- 10) Q. Li et al., "A Biped Walking Robot Having a ZMP Measurement System Using Universal Force-moment Sensors," Proc. IEEE/RSJ Int. Workshop Intelligent Robots and Systems '91 pp. 1568-1573 (1991)
- 11) 李他, "6軸力センサを用いた2足歩行ロボットのZMP測定システムの開発", 日本ロボット学会誌, Vol. 10-6, pp. 828-833 (1992)
- 12) Q. Li et al., "Learning Control of Compensative Trunk Motion for Biped Walking Robot Based on ZMP Stability Criterion," Proc. 1992 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp. 597-603 (1992)
- 13) 李他, "ZMPを安定規範とした2足歩行ロボットの上下体補償運動の学習制御", 日本ロボット学会誌, Vol. 11-4, pp. 557-563 (1993)

李 清華 (Qinghua LI)

1965年12月24日生。1986年中国上海交通大学自動制御学科卒業。1989年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程入学。1991年同課程修了の後、博士課程入学。現在に至る。2足歩行ロボットに関する研究に従事。(日本ロボット学会学生会員)

加藤 一郎 (Ichiro KATO)

1925年5月2日生。1950年早稲田大学理工学部電気工学科卒業。現在同機械工学科教授。ロボット学、サイborg学などの研究に従事。(日本ロボット学会名誉会員)

高西 淳夫 (Atsuo TAKANISHI)

1956年4月12日生。1985年早稲田大学大学院理工学研究科博士課程修了。同年同大理工学部助手。1988年同専任講師を経て、1990年より同助教授。2足歩行ロボット、咀嚼ロボットなどヒューマノイド関連の研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会、バイオメカニズム学会などの会員。工学博士。(日本ロボット学会正会員)