

JAERI-Tech

94-020



3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットの  
歩行技術に関する調査報告

1994年10月

加藤一郎\*・高西淳夫\*・久米悦雄

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 ㈱原子力資料サービス

### 3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットの歩行技術に関する調査報告

日本原子力研究所東海研究所情報システムセンター

加藤 一郎\*・高西 淳夫\*・久米 悦雄

(1994年8月31日受理)

2足歩行ロボットの動力学シミュレーションでは、安定歩行の解析にZMP規範を用いている。ZMP規範は、ロボットに作用するピッチ軸及びロール軸まわりのモーメントの総和が0となるロボットの動作を解析し、安定歩行動作を得るものである。これまでの研究においては、もう一つのモーメントであるヨー軸まわりのモーメントに関しては、ロボットの足底と床面との摩擦が十分に大きいと仮定し、この影響については取り上げていなかった。しかし、近年、2足歩行ロボット・ハードウェアの歩行高速化につれ、ロボットの足底と床面との間にヨー軸まわりの滑りが発生し歩行を不安定にしているという報告がなされ、このモーメント補償の重要性がクローズアップされてきている。我々の研究においてもこの問題は重要であり、ヨー軸を含めた3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットの歩行技術に関して調査を実施した。

本報告は早稲田大学で開発された、3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットWL-12RVの歩行技術に関する調査報告である。WL-12RVは、ヨー軸まわりのモーメントを含む3軸モーメント補償機能により、従来のピッチ軸及びロール軸まわりの2軸モーメント補償ロボット（例えばWL-12RIV）に比べ、約1.5倍の歩行速度の高速化を実現した。本報告書は、この2足歩行ロボットの機械ハードウェアの概略と上体補償軌道算出アルゴリズム及び歩行実験について述べたものである。

A Survey Report for the Biped Locomotion Robot  
Compensating Three-axis Moment

Ichiro KATO\*, Atsuo TAKANISHI\* and Etsuo KUME

Computing and Information Systems Center  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 31, 1994)

A dynamic walking simulation of biped locomotion robots based on the Zero Moment Point (ZMP) criterion is being conducted at JAERI. The ZMP criterion to obtain the stable walking patterns is that respective sums of moments around pitch-axis and roll-axis which act on the robot are equal to zero. So far, as for the rest moment around yaw-axis, the moment is balanced to frictional force, assuming that the frictional force between robot's sole and floor is sufficiently large in our study. According to a recent paper, however, slipping around yaw-axis between robot's sole and floor has occurred as the walking speed becomes faster, and the slipping has made the walking unstable. So influence of this moment can not be ignored for the fast walking. A survey has been performed for collecting relevant information from already existing biped locomotion robots.

This is a survey report for the biped locomotion robot compensating three-axis moment by a trunk motion : the WL-12RV designed and developed at Waseda University. The WL-12RV has been realized 1.5 times as fast as dynamic walking compared with a biped locomotion robot compensating two-axis moment (e.g. WL-12RIV) . This report includes the machine model, control method and results of walking experiments of the WL-12RV.

Keywords: Robot, Biped Locomotion, Zero Moment Point (ZMP) ,  
Three-axis Moment, Yaw-axis, Trunk Motion

---

\* Waseda University

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 機械モデル WL-12RV .....	1
2.1 機械ハードウェア .....	1
2.2 上体機構部 .....	7
3. 歩行制御方式 .....	9
3.1 歩行系とロボットのモデル化 .....	9
3.2 運動方程式の導出 .....	12
3.3 上体補償軌道の近似解法 .....	14
3.4 上体補償軌道の厳密解法 .....	15
4. 歩行シミュレーション .....	22
5. 歩行実験 .....	29
5.1 実験目的 .....	29
5.2 実験方法 .....	29
5.3 実験結果 .....	29
6. おわりに .....	39
謝 辞 .....	39
参考文献 .....	39

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Machine Model WL-12RV .....	1
2.1 Mechanical System .....	1
2.2 Trunk System .....	7
3. Control Method .....	9
3.1 The Model of Biped Walking Robot .....	9
3.2 Linearized Model of a Biped Walking Robot having Trunk .....	12
3.3 Periodic Solution of Trunk Trajectory .....	14
3.4 Strict Periodic Solution of Trunk Motion .....	15
4. Walking Simulation .....	22
5. Walking Experiments .....	29
5.1 Aim of Experiments .....	29
5.2 Experimentation .....	29
5.3 Experimental Results .....	29
6. Concluding Remarks .....	39
Acknowledgements .....	39
References .....	39

## 1. はじめに

2足歩行シミュレーションの研究において、その前提条件として“ロボットの足底接地点における並進に対する摩擦係数は十分に大きい”としていた。つまり、上体運動によりピッチおよびロール軸モーメントのみを補償し、ヨー軸モーメントについては歩行の安定性に関係であるとして、これを無視していた。しかし、われわれが行った歩行実験において、歩行が高速になるとロボットの足底と路面間にヨー軸回りの滑りが生じ、これが歩行の安定性に大きく影響するという問題が生じてきた。そこでわれわれは、1991年に上体運動により3軸モーメントの補償が可能な2足歩行ロボットWL-12RVを開発し、同時に、その歩行制御方式を考案することで、歩幅0.3[m]で1歩0.54[s]の歩行を実現した。

本報告書では、歩行モデルとして2足歩行ロボットWL-12RVの機械モデル及び制御システムについて述べる。

## 2. 機械モデル WL-12RV

### 2.1 機械ハードウェア

本機械モデルは総重量103.5[kg]、全長は直立静止状態で約1.8[m]である。機械モデルの組立図をFig. 2.1に、自由度配置図をFig. 2.2に示す。

自由度配置は、Fig. 2.2に示すように、下肢にピッチ軸の自由度を6自由度、上体にピッチ、ロール、ヨー軸の自由度を各1自由度持ち3自由度、合計で9自由度である。これらの可動角図をFig. 2.3に、重量配置図をFig. 2.4に示す。

## 1. はじめに

2足歩行シミュレーションの研究において、その前提条件として“ロボットの足底接地点における並進に対する摩擦係数は十分に大きい”としていた。つまり、上体運動によりピッチおよびロール軸モーメントのみを補償し、ヨー軸モーメントについては歩行の安定性に関係であるとして、これを無視していた。しかし、われわれが行った歩行実験において、歩行が高速になるとロボットの足底と路面間にヨー軸回りの滑りが生じ、これが歩行の安定性に大きく影響するという問題が生じてきた。そこでわれわれは、1991年に上体運動により3軸モーメントの補償が可能な2足歩行ロボットWL-12RVを開発し、同時に、その歩行制御方式を考案することで、歩幅0.3[m]で1歩0.54[s]の歩行を実現した。

本報告書では、歩行モデルとして2足歩行ロボットWL-12RVの機械モデル及び制御システムについて述べる。

## 2. 機械モデル WL-12RV

### 2.1 機械ハードウェア

本機械モデルは総重量103.5[kg]、全長は直立静止状態で約1.8[m]である。機械モデルの組立図をFig. 2.1に、自由度配置図をFig. 2.2に示す。

自由度配置は、Fig. 2.2に示すように、下肢にピッチ軸の自由度を6自由度、上体にピッチ、ロール、ヨー軸の自由度を各1自由度持ち3自由度、合計で9自由度である。これらの可動角図をFig. 2.3に、重量配置図をFig. 2.4に示す。



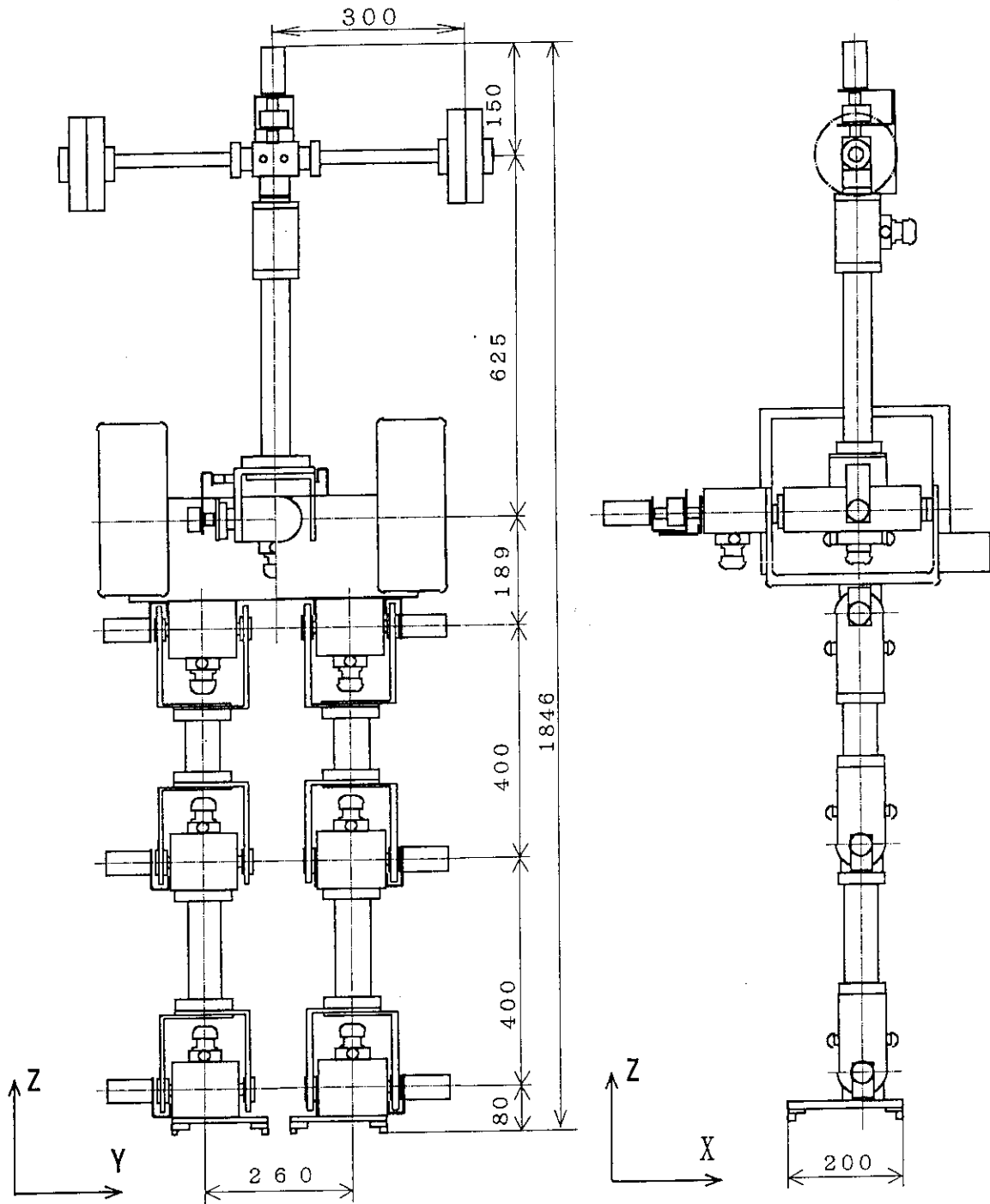


Fig2.1 Assembly drawing of WL-12RV

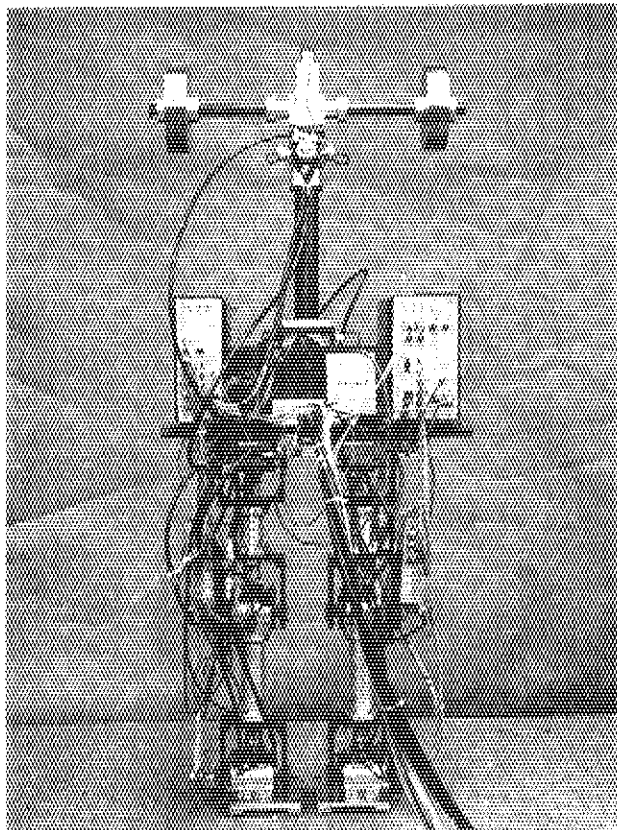
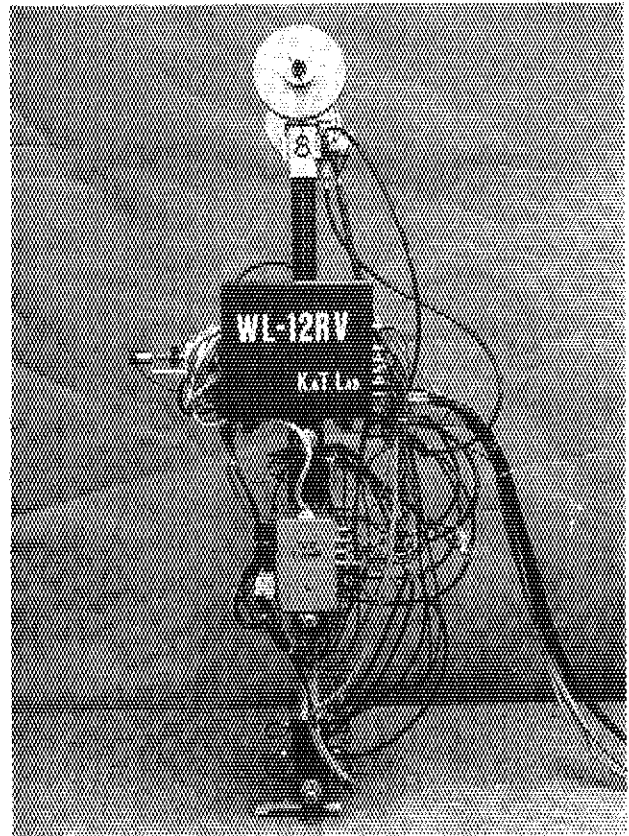
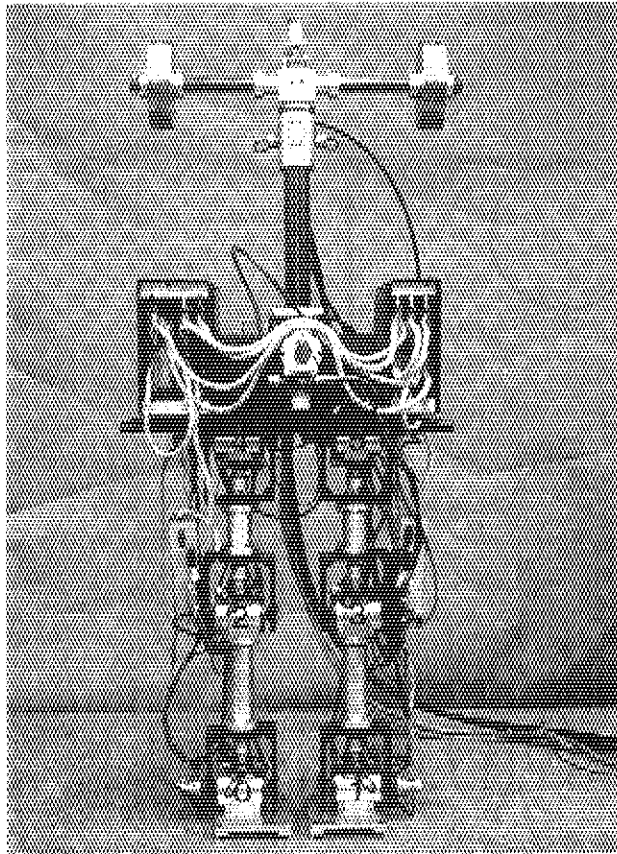


Photo. 2.1 WL-12RV

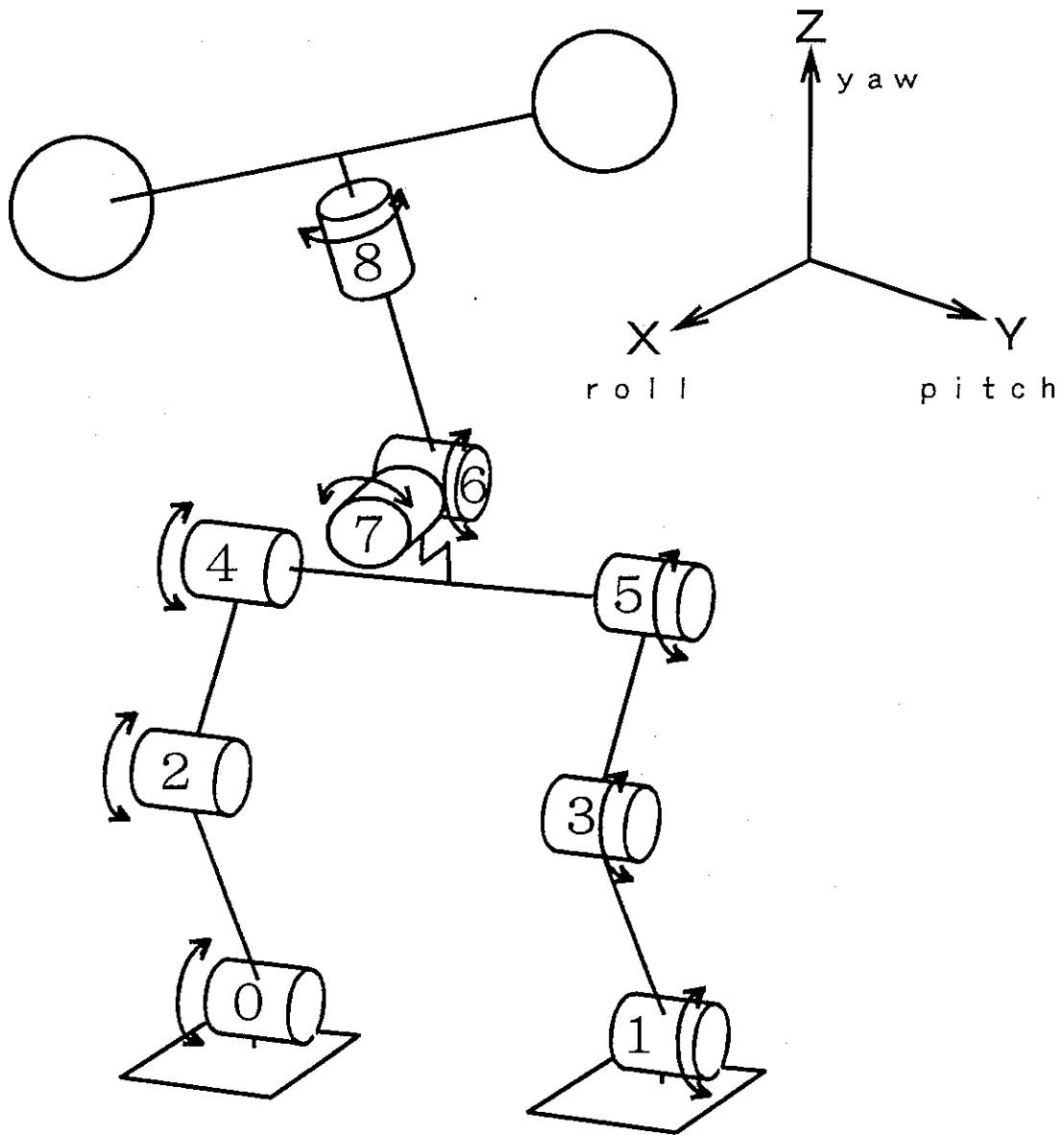


Fig. 2.2 Link structure of WL-12RV

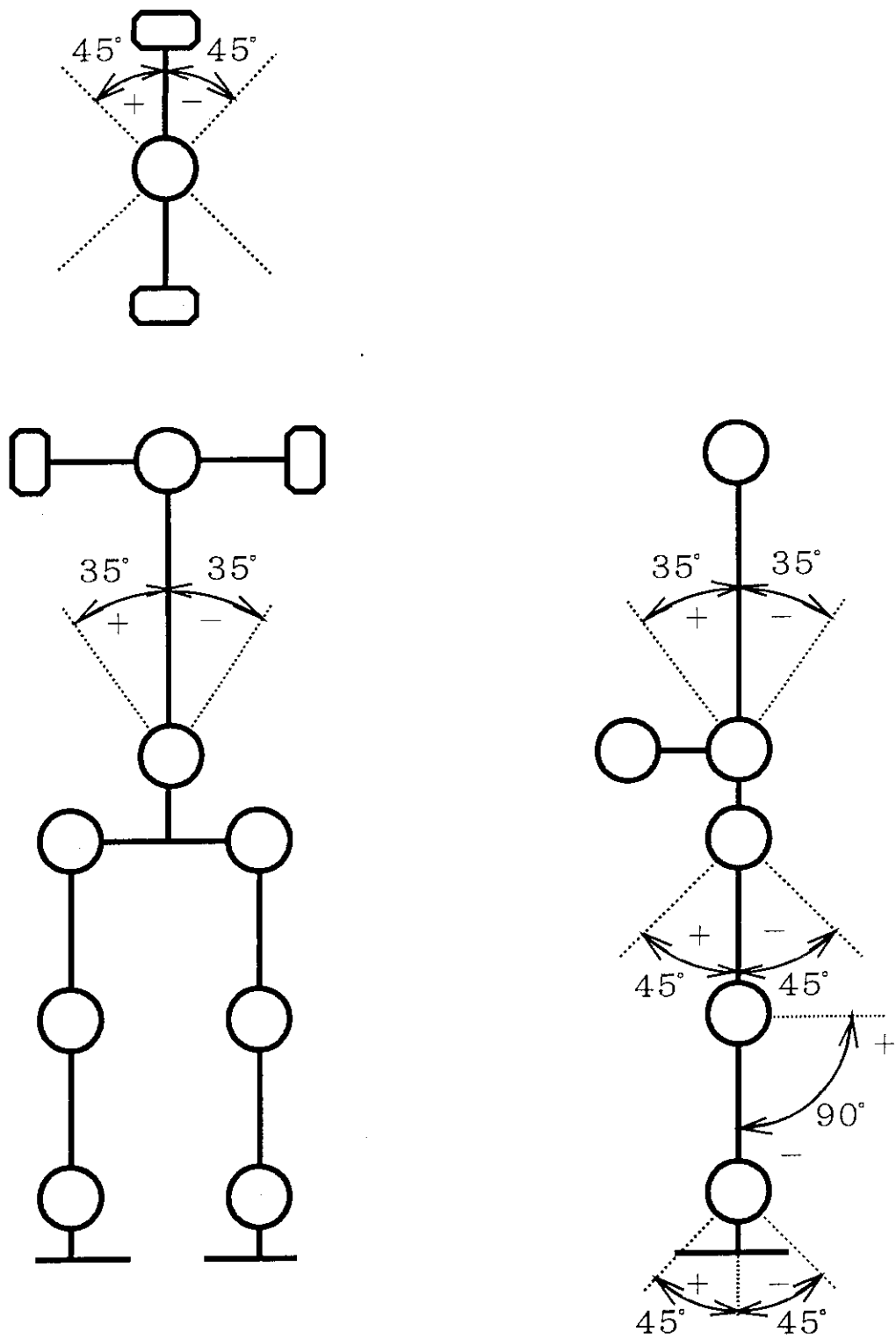


Fig. 2.3 Movable ranges of WL-12RV

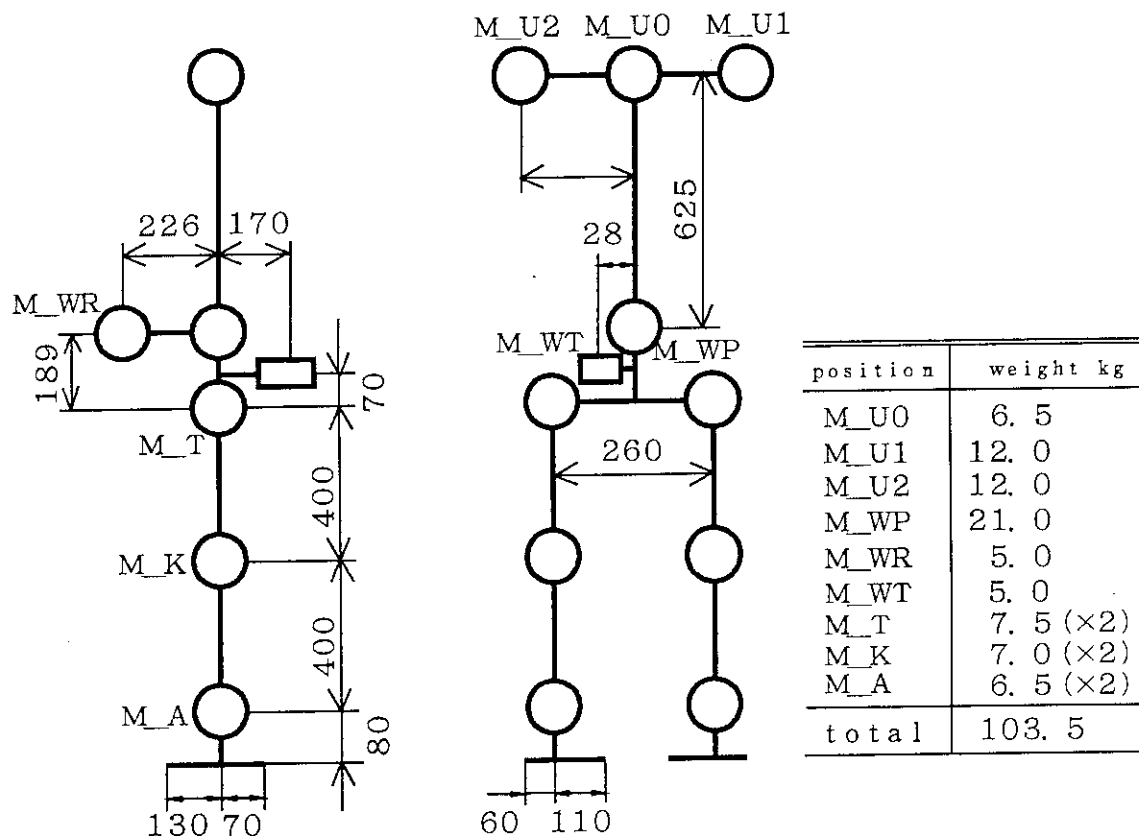


Fig. 2.4 Mass disposition of WL-12RV

## 2. 2 上体機構部

本機械モデルの上体機構部は3軸のモーメントを発生できるものである。その機構の概略図をFig. 2.5に示す。この図に示すように上体の先端部にヨー軸の1自由度を設け、これによりアームに取り付けた2個のおもりを回転することでヨー軸回りの偶力モーメントを、そして、おもりとヨー軸アクチュエータをピッチとロール軸アクチュエータで回転させることでピッチ軸とロール軸回りのモーメントを発生する。このようにヨー軸の自由度を上体の先端部に配置し、その質量もピッチおよびロール軸モーメントの補償に利用することで、ヨー軸モーメントを発生できる機構を持つことによるロボット全体の重量増加をきたすことがない上体機構を実現した。

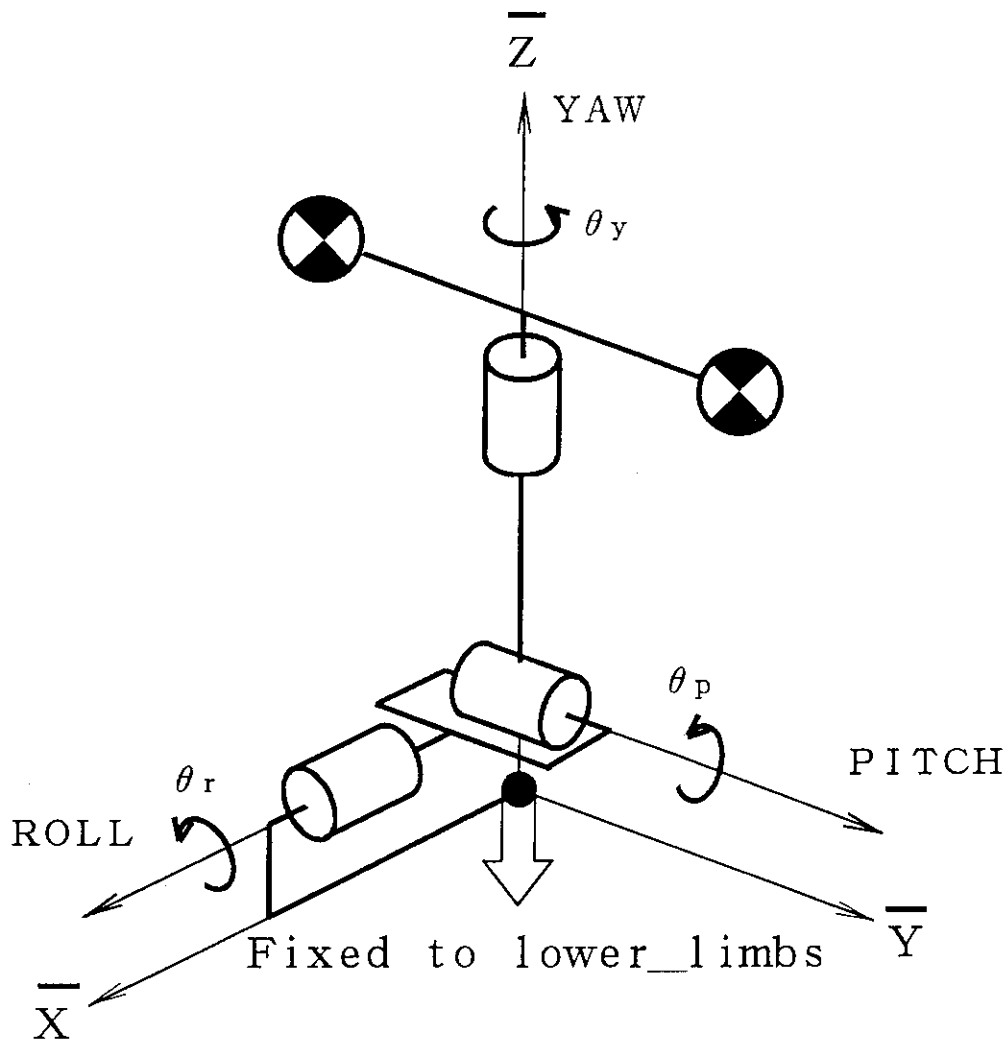


Fig. 2.5 Link structure of trunk

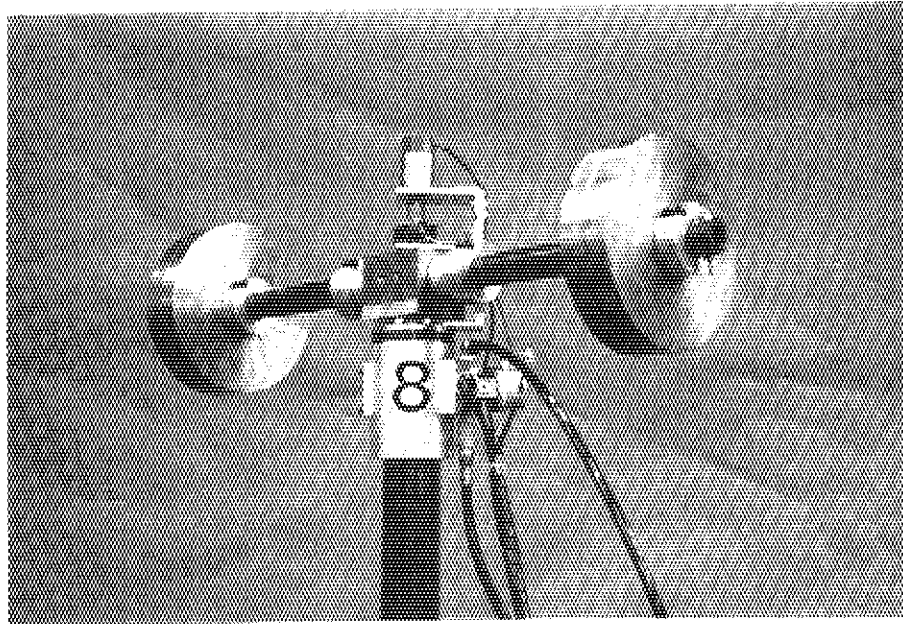


Photo. 2.2 Yaw-Moment Generation Mechanism

### 3. 歩行制御方式

本歩行制御方式の概略は、上体補償軌道算出アルゴリズムを用いて、任意の下肢軌道およびZMP軌道から上体補償軌道を算出し、それらの軌道を設定歩行パターンとして歩行ロボットをプログラム制御するというものである。

本方式の要である3軸モーメントに対応した上体補償軌道算出アルゴリズムの骨子は以下の3点からなる。

- I : 2足歩行ロボットのモデル化
- II : Iのモデルにおけるモーメントに関する方程式の導出
- III : Iの線形化モデルを用いた繰返し計算によりIIを満足する上体補償軌道の厳密解の算出

以下に、その上体補償軌道算出アルゴリズムについて述べる。

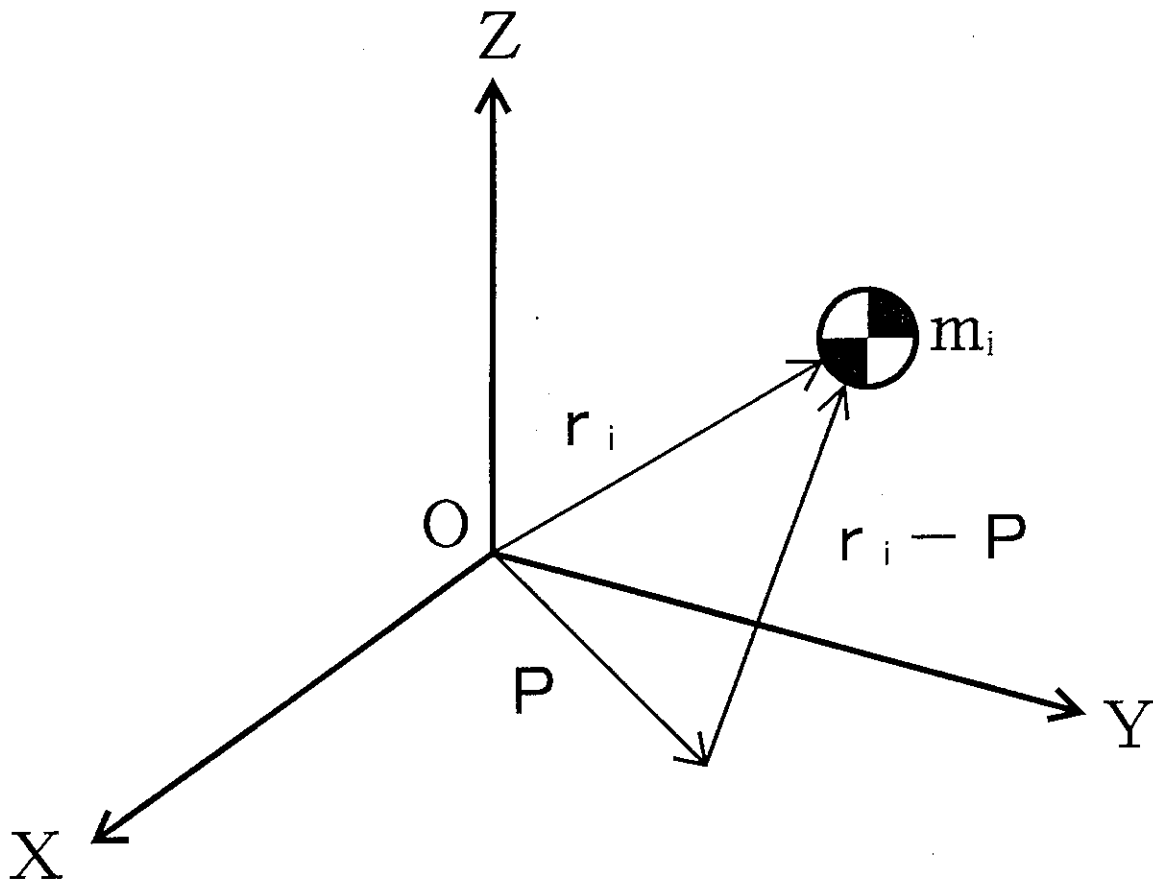
#### 3. 1 歩行系とロボットのモデル化

先に述べた問題点をふまえ、2足歩行ロボットの歩行系に次の前提条件と座標設定を行う。

- (1) 歩行系は質点の集合よりなる。
- (2) 路面は十分に硬く、どんな力が作用しても動かない。
- (3) X軸(ロボットの正面方向に一致)およびY軸を含む平面が路面に一致し、路面に垂直な軸をZ軸とする直交座標O(右手系)を設定する。(Fig. 3.1)
- (4) 歩行系と路面との接地状況は点接地の集合とする。
- (5) 接地点において、路面での回転(X, YおよびZ軸回り)に対する摩擦係数は無視できるほど小さい。

また、Fig. 3.2に示すように機械モデルを上体3質点、下肢をn質点系としてモデル化する。





- |                         |                                |
|-------------------------|--------------------------------|
| $m_i$                   | :mass of particle i            |
| $r_i = [x_i, y_i, z_i]$ | :position vector of particle i |
| $P = [x_p, y_p, z_p]$   | :position vector of P          |
| $G = [g_x, g_y, g_z]$   | :gravitational acceleration    |
| $T = [T_x, T_y, T_z]$   | :total torque acted on P       |

Fig. 3.1 Definition of vectors for walking system

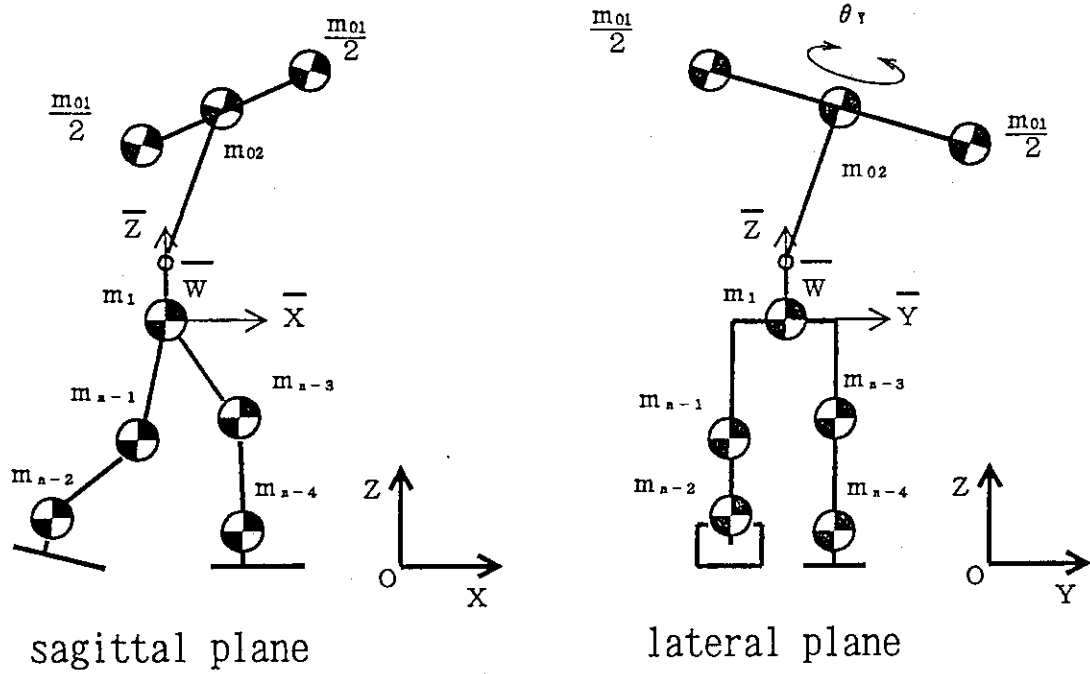


Fig. 3.2 Modeling of biped walking robot having trunk (3-particles)

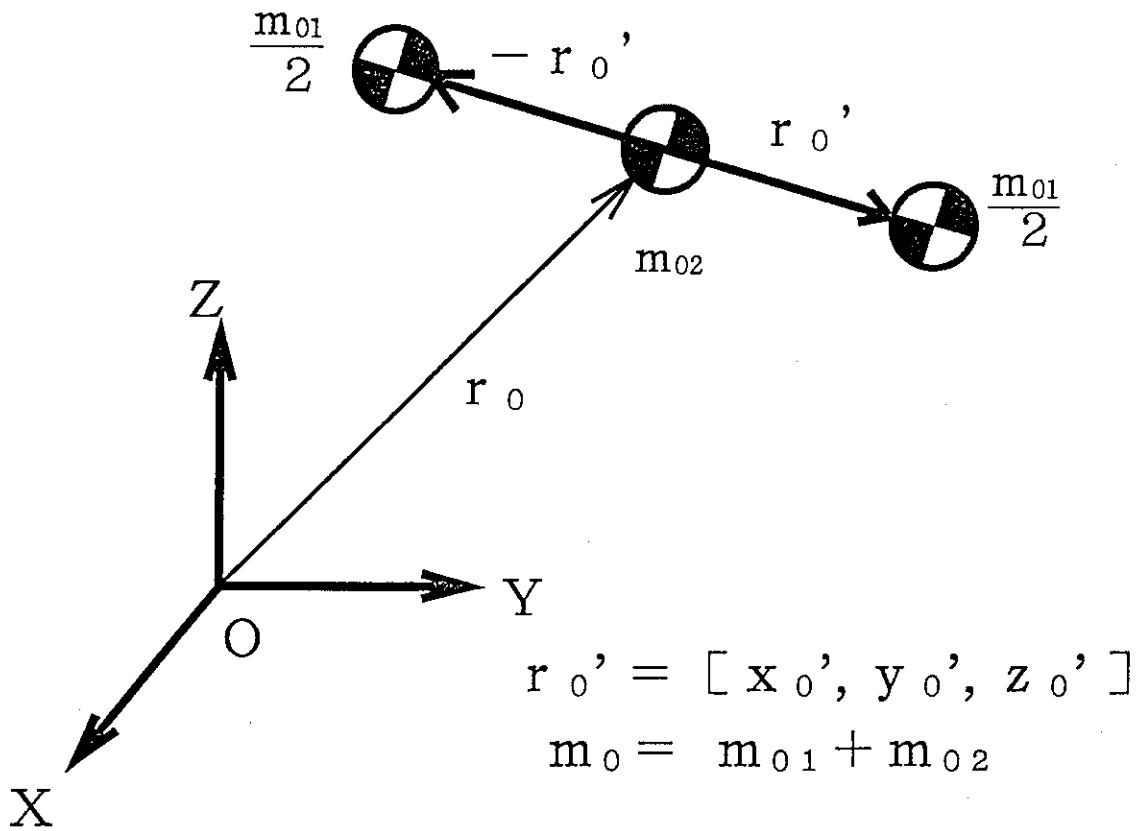


Fig. 3.3 Definition of vector of trunk(3-particles)

### 3. 2 運動方程式の導出

歩行の安定判別にはZMP規範を用いている。ここで補償の対象とするヨー軸モーメントは、ZMPに関するZ軸回りのモーメントとする。

先の座標設定に加え上体のアームについてFig. 3.3に示すベクトル $r_0'$ を設定すると、路面上の任意の点Pに関する運動方程式はダランベールの原理を用いて次のようになる。

(3.1)

$$m_{01} r_0' \times \ddot{r}_0' + \sum_{i=0}^n m_i (r_i - P) \times (\ddot{r}_0' + G) + T = 0$$

ここで $P(x_p, y_p, z_p)$ をZMPとし $P_{zmp}(x_{zmp}, y_{zmp}, z_{zmp})$ と表し、さらにFig. 3.4のように各部の相対運動を考えるために、ロボットの腰部付近に固定された運動座標系 $\bar{W}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ を設定する。絶対座標系Oに対する運動座標系Wの原点を $Q(x_q, y_q, z_q)$ として、Wにおけるピッチ軸、ロール軸、ヨー軸回りの運動方程式を上体質点の運動に関する項を未知変数の項として左辺に、下肢質点が発生するモーメントを $M_y(t)$ ,  $M_x(t)$ ,  $M_z(t)$ と置き既知変数の強制項として右辺にまとめ、上体自身が発生してしまうヨー軸回りのモーメントを $M_{z_0}(t)$ と置くと次の式を得る。

(3.2)

$$m_{01} (z_0' \ddot{x}_0' - x_0' \ddot{z}_0') + m_0 (\bar{z}_0 + z_q) (\ddot{\bar{x}}_0 + \ddot{\bar{x}}_q + g_x) - m_0 (\ddot{\bar{z}}_0 + \ddot{\bar{z}}_q + g_z) (\bar{x}_0 - \bar{x}_{zmp}) = -M_y(t)$$

(3.3)

$$m_{01} (y_0' \ddot{z}_0' - z_0' \ddot{y}_0') - m_0 (\bar{z}_0 + z_q) (\ddot{\bar{y}}_0 + \ddot{\bar{y}}_q + g_y) + m_0 (\ddot{\bar{z}}_0 + \ddot{\bar{z}}_q + g_z) (\bar{y}_0 - \bar{y}_{zmp}) = -M_x(t)$$

(3.4)

$$m_{01} (x_0' \ddot{y}_0' - y_0' \ddot{x}_0') + M_{z_0}(t) = -M_z(t)$$

$$M_{z_0}(t) = -m_0 (\ddot{\bar{x}}_0 + \ddot{\bar{x}}_q + g_x) (\bar{y}_0 - \bar{y}_{zmp}) + m_0 (\ddot{\bar{y}}_0 + \ddot{\bar{y}}_q + g_y) (\bar{x}_0 - \bar{x}_{zmp})$$

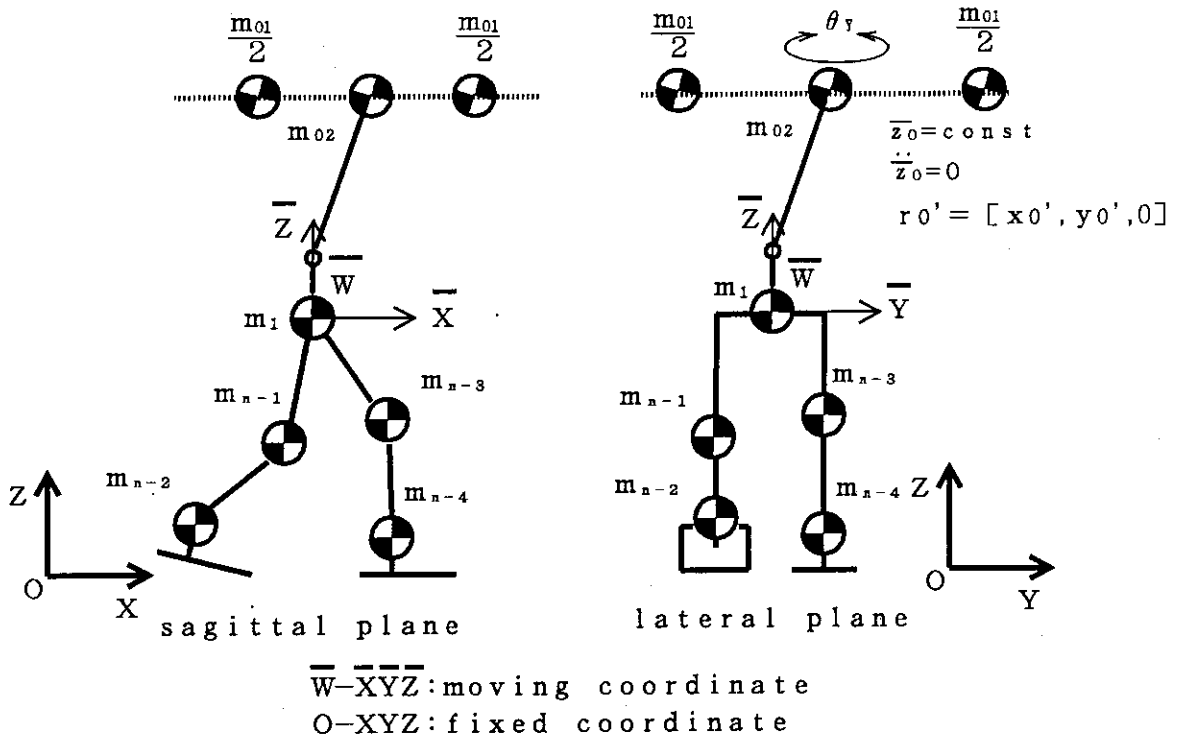


Fig. 3.4 Linearized model of a biped walking robot having trunk(3-particle)

### 3. 3 上体補償軌道の近似解法

上体補償軌道の近似解法は従来とほぼ同じである。本項では、Fig. 3.2に示す上体3質点系モデルを、上体のアームは水平面内を回転し、上体の3質点はZ軸方向に運動しないものとし、運動方程式の線形非干渉化を行い上体補償軌道の近似解を求める手法について述べる。また、2足歩行ロボットの歩行は、水平・平坦路上における定常歩行とする。

式(3.2), (3.3), (3.4)は、Z軸方向の運動を共有し、また下肢と上体は回転型の関節を介して連結している(Fig. 3.2)ということから非線形・干渉系である。そこでロボットは歩行中腰高さ一定、また、上体質点はZ軸方向に運動しないものと仮定し、線形・非干渉化すると次の式を得る。なお、 $\theta_y$ をヨー軸アクチュエータの角度、Rはアームの回転半径とする。

(3.5)

$$m_0(\bar{z}_0 + z_q)(\ddot{\bar{x}}_0 + \ddot{\bar{x}}_q) - m_0 g(\bar{x}_0 - \bar{x}_{zmp}) = -My(t)$$

(3.6)

$$-m_0(\bar{z}_0 + z_q)(\ddot{\bar{y}}_0 + \ddot{\bar{y}}_q) + m_0 g(\bar{y}_0 - \bar{y}_{zmp}) = -Mx(t)$$

(3.7)

$$m_0 R^2 \ddot{\theta}_y = -Mz_0(t) - Mz(t)$$

このとき $My(t)$ ,  $Mx(t)$ ,  $Mz(t)$ は、下肢軌道およびZMP軌道から算出できるので既知関数であり、 $Mz_0(t)$ は、先に上体ピッチ・ロール軸軌道を求めることで既知関数となる。また、定常歩行であることからロボットの下肢の各質点ならびにZMPは運動座標系Wに関して周期的な相対運動をするので、 $My(t)$ ,  $Mx(t)$ ,  $Mz(t)$ は、周期関数である。このため左辺も周期関数である。

そこで、式(3.5), (3.6), (3.7)の両辺をフーリエ級数展開(FFT)し、その係数を比較することで $x_0$ ,  $y_0$ ,  $\theta_y$ のフーリエ係数を求め、これを逆フーリエ級数展開(逆FFT)することで、上体補償軌道の近似解を求めることができる。ところで、ヨー軸軌道のフーリエ係数の中でオフセットの項は不定となる。すなわち、ピッチ、ロー

ル軸の場合における重力項のように初期値を決定する項は存在しない。よって、そのオフセットの項に関しては、定常歩行においてアームの振り幅が一定値（可動角）内に入るように設定する。

### 3. 4 上体補償軌道の厳密解法

2足歩行ロボットの上体補償軌道の厳密解を算出するには、非線形で干渉のある2階微分方程式を解く必要がある。このため本方程式の解を解析的に求めることは困難である。

そこで、Fig. 3.5のフローチャートに示すように先に述べた線形微分方程式（式(3.5), (3.6), (3.7)）を用いて算出した上体補償軌道の近似解を厳密モデルの式(3.2), (3.3)および(3.4)に代入することでZMP誤差 $e_x, e_y$ およびモーメント誤差 $e_{M_z}$ を求め、これらの誤差を式(3.5), (3.6)および(3.7)の右辺に蓄積し、再び計算を行い、この操作を誤差が許容値内に収束するまで繰り返すことにより厳密解を得る手法を考案し、この手法により上体補償軌道を求めた。

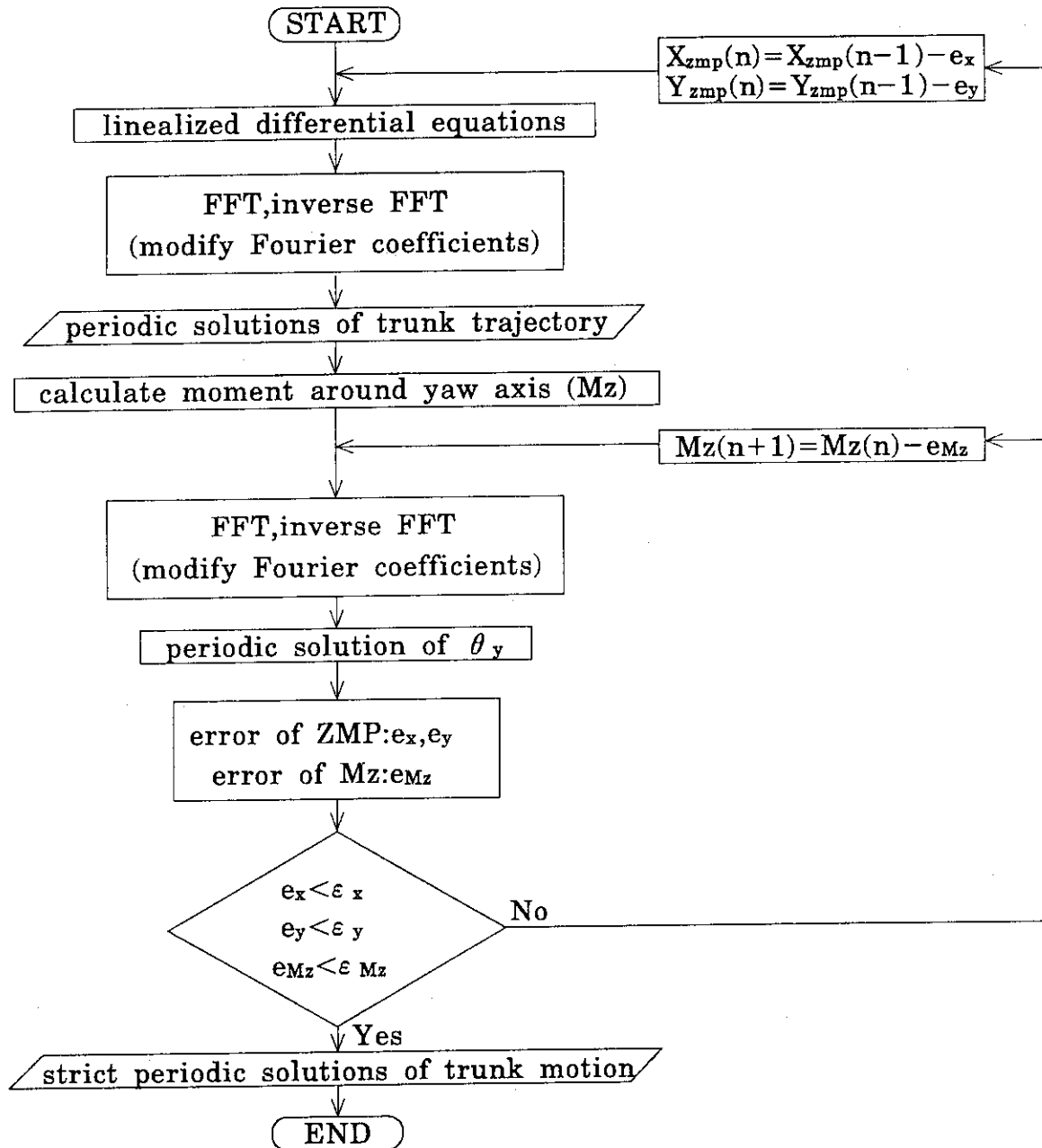


Fig. 3.5 Flowchart of the conventional algorithm

しかし、この手法を用いた場合、先に述べた3つの線形微分方程式（式(3.5), (3.6), (3.7)）のうちヨー軸モーメントに関する方程式のみモーメント誤差を使用しているため収束速度に偏りがみられ、下肢軌道およびZMP軌道の設定によっては、厳密解を算出するまでに非常におおくの計算回数を必要とする場合があることが判明した。

そこで、次の点を改良した。Fig. 3.6には改良後のフローチャートを示す。

- (1) 全ての方程式の繰返し計算にモーメント誤差を使用する
- (2) 蓄積モーメント誤差の極限值を推定しながら繰返し計算を行う



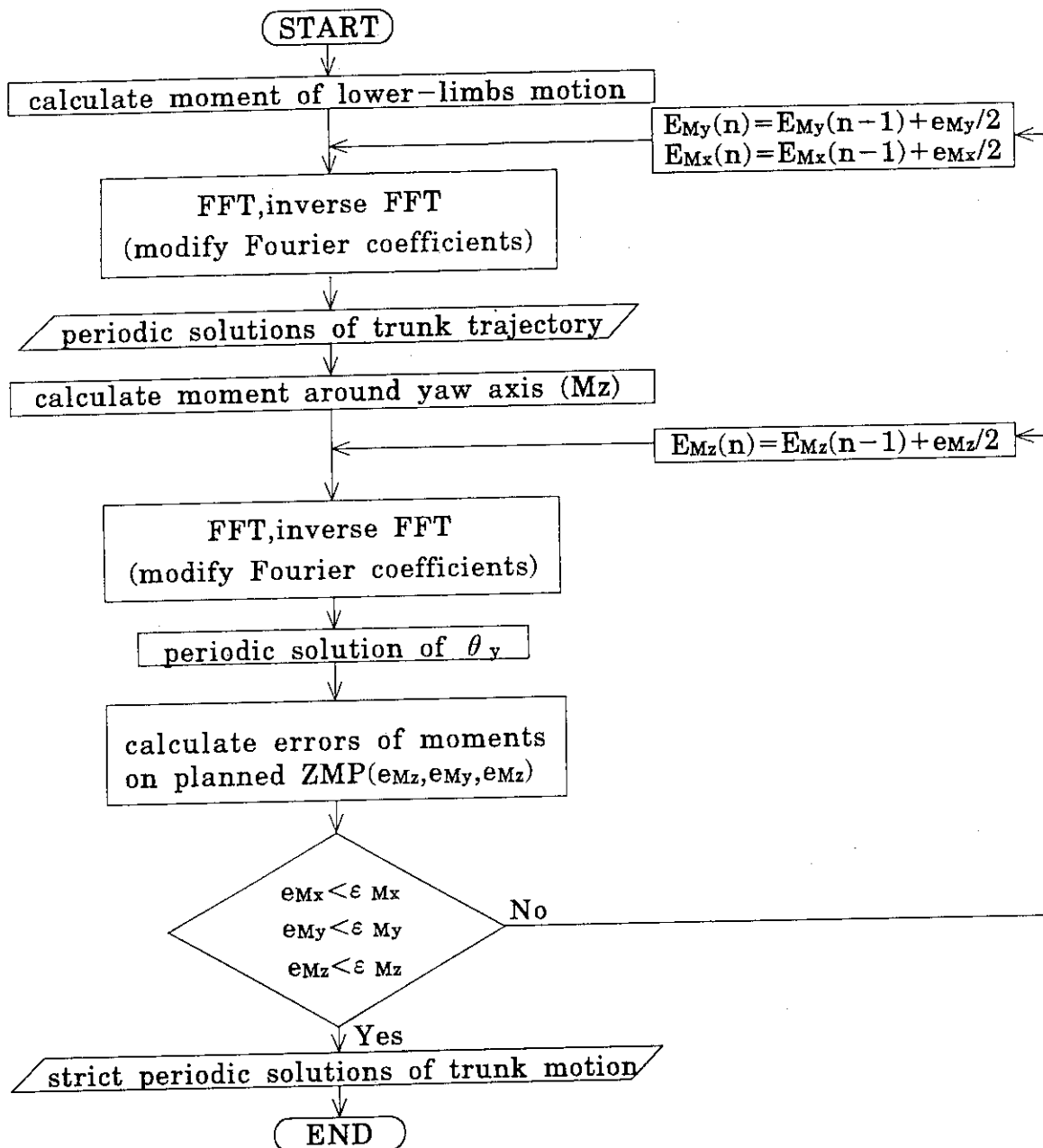


Fig. 3.6 Flowchart of the algorithm proposed

なお、モーメント誤差は  $e_{(n)} = [e_{M_x(n)}, e_{M_y(n)}, e_{M_z(n)}]$  とし、蓄積モーメント誤差  $E_{(n)} = [E_{M_x(n)}, E_{M_y(n)}, E_{M_z(n)}]$  の極限値の推定には、収束の規則性を利用して、式(3.8)を使用している。

(3.8)

$$E_{(n)} = \frac{2E_{(n-1)} + e_{(n-1)}}{2}$$

$$n=3, 4, 5, \dots \quad \text{where } E_{(1)}=0, \quad E_{(2)}=e_{(1)}$$

n 回目の繰返し計算で用いる各線形微分方程式を式(3.9), (3.10), (3.11)に示す。

(3.9)

$$m_0(\bar{z}_0 + z_q)(\ddot{\bar{x}}_0 + \ddot{\bar{x}}_q) - m_0 g(\bar{x}_0 - \bar{x}_{zmp}) = -M_y(t) - E_{M_y(n)}$$

(3.10)

$$-m_0(\bar{z}_0 + z_q)(\ddot{\bar{y}}_0 - \ddot{\bar{y}}_q) + m_0 g(\bar{y}_0 - \bar{y}_{zmp}) = -M_x(t) - E_{M_x(n)}$$

(3.11)

$$m_{01} R^2 \ddot{\theta}_y = -M_{z_0}(t) - M_z(t) - E_{M_z(n)}$$

これらの変更により、下肢軌道およびZMP軌道の設定に対する繰返し計算回数の依存性を少なくするとともに計算回数そのものを減らすことができた。これにより、厳密解を得るまでの時間を大幅に短縮できた。なお、従来繰返し計算毎に上体補償軌道の近似解を求めるに当たり、 $M_y(t), M_x(t)$ を算出しない必要があったが、改良(1)によりその必要がなくなったことも計算時間の短縮に貢献している。これにより1回の繰返し計算に要する時間が従来の1/3程に短縮された。

本アルゴリズムの繰返し計算回数と各誤差の収束性の比較をFig. 3.7に、従来のアルゴリズムとの比較をFig. 3.8に示す。これらの図からも、本アルゴリズムは従来のアルゴリズムの問題点を解決していることがわかる。

以上において、定常歩行における解法について述べてきたが、完全歩行についても、その一連の歩行動作(歩行開始、定常歩行、停止)を1つの歩行周期とし、その停止期間を十分に長くとることで、全く同様のアルゴリズムにより上体補償軌道を求めることができる。

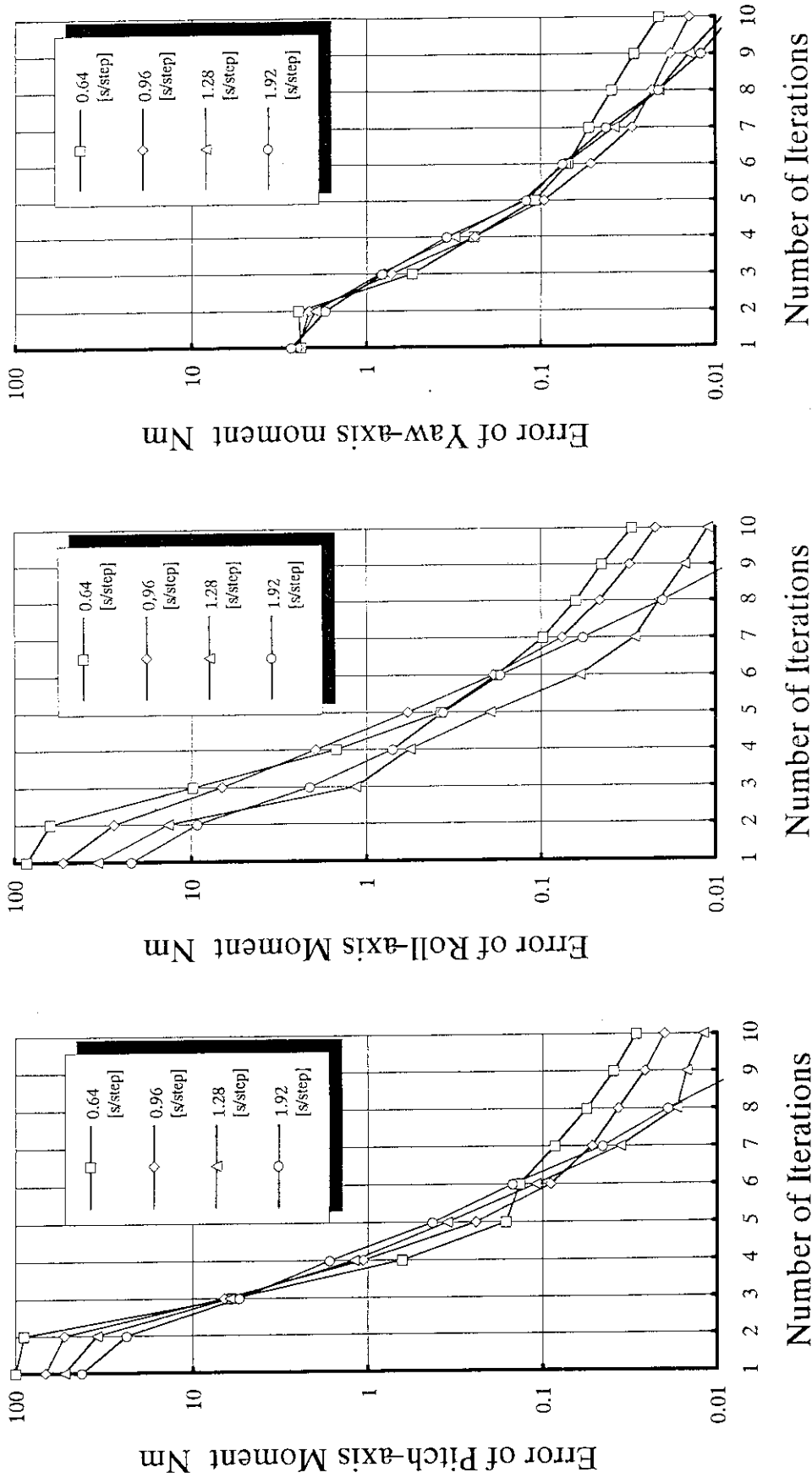
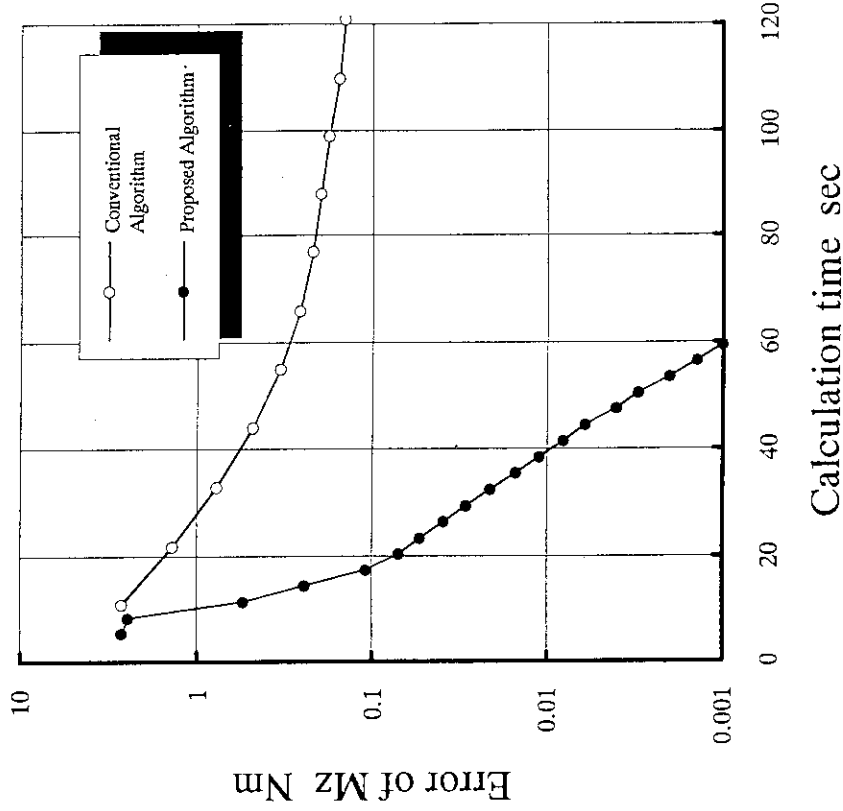
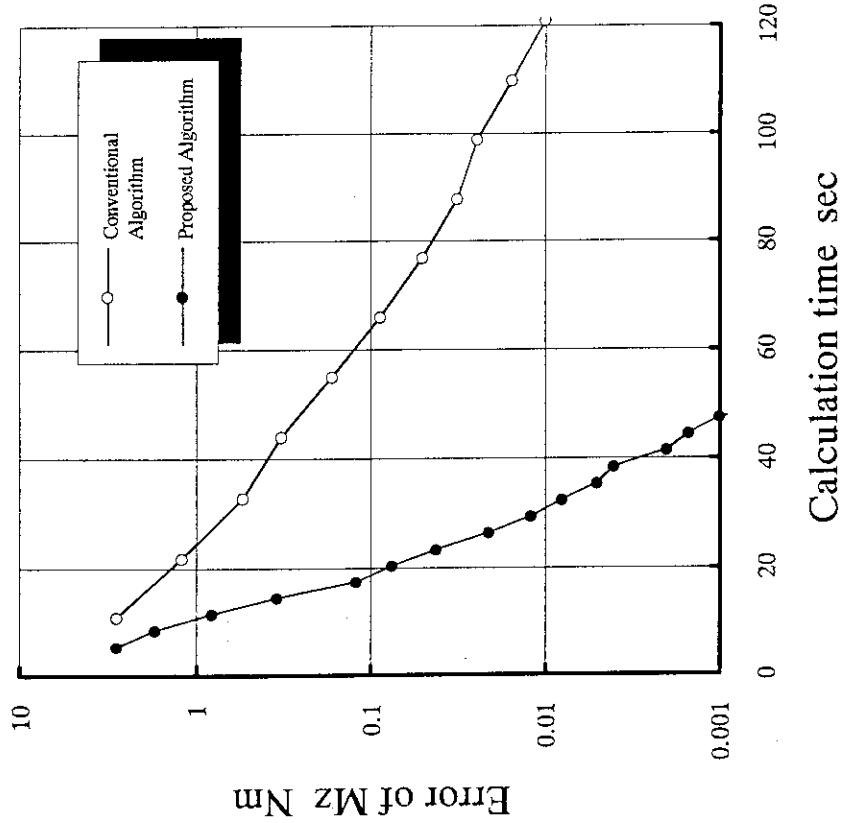


Fig.3.7 Relationship between Error and Number of Iteration



a) Fast Convergence



b) Slow Convergence

Fig.3.8 Comparison of Convergence Speed between the Conventional Algorithm and the Algorithm Proposed

#### 4. 歩行シミュレーション

完全歩行時における歩行シミュレーションを行った結果をスティック線図にしたものをFig. 4.1に示す。またシミュレーションより算出した完全歩行時における上体3軸軌道の位相面図をFig. 4.2に示す。全体的に歩行が高速になるに従って、その運動の軌道が小さくなっているが、これは慣性力を有効に利用して補償が行われているためであると考えられる。また、この図より上体ヨー軸軌道は他の2軸軌道より、より速い角速度を必要としていることがわかる。これは上体ピッチ・ロール軸軌道が、慣性力によるモーメントの他に、重力によるモーメントを多く利用しているのに対し、上体ヨー軸軌道では、アームの回転運動より得られる慣性力による偶力モーメントしか発生できないためである。

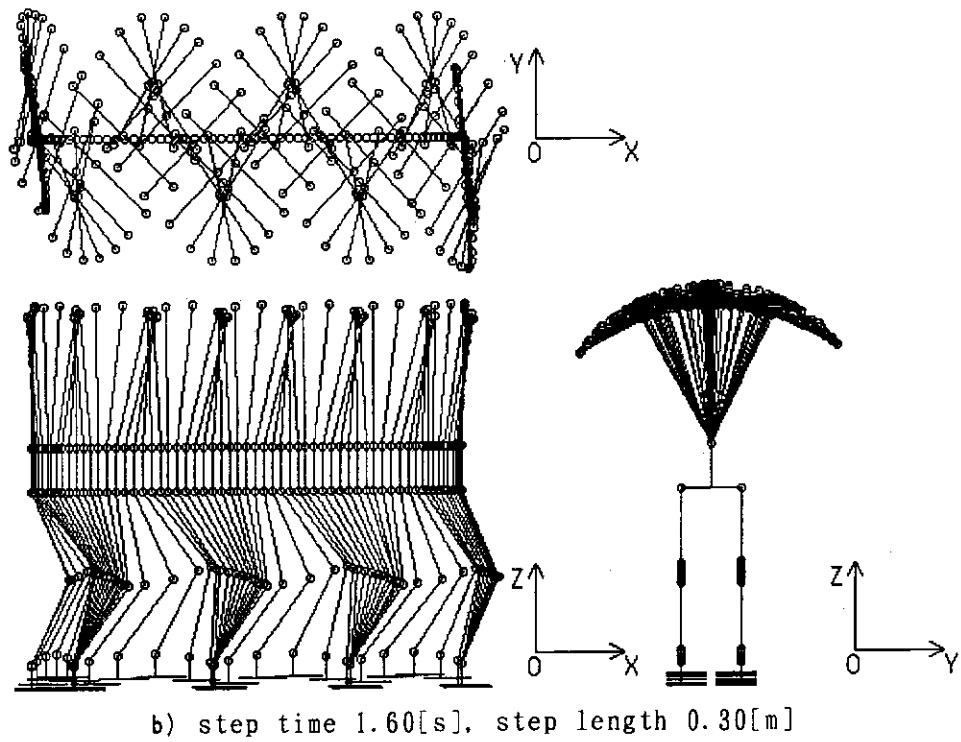
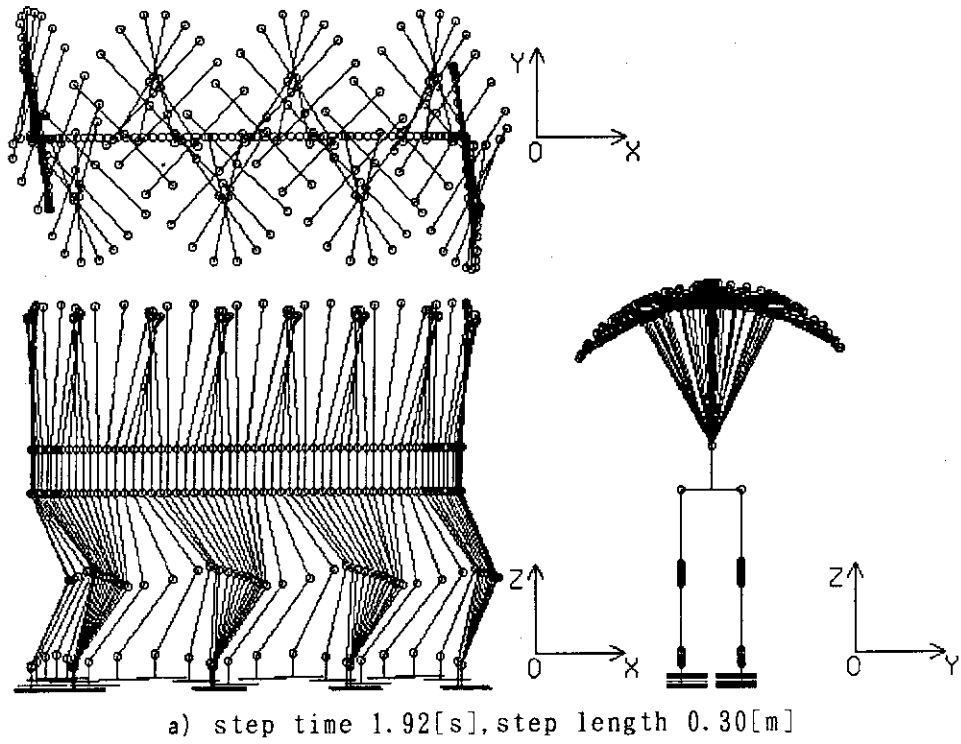
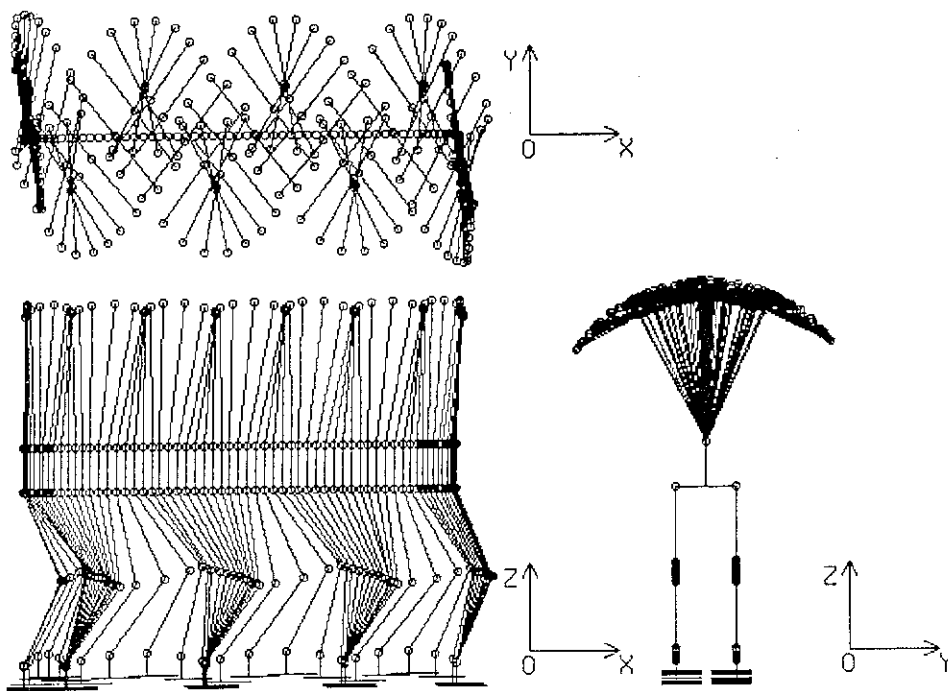
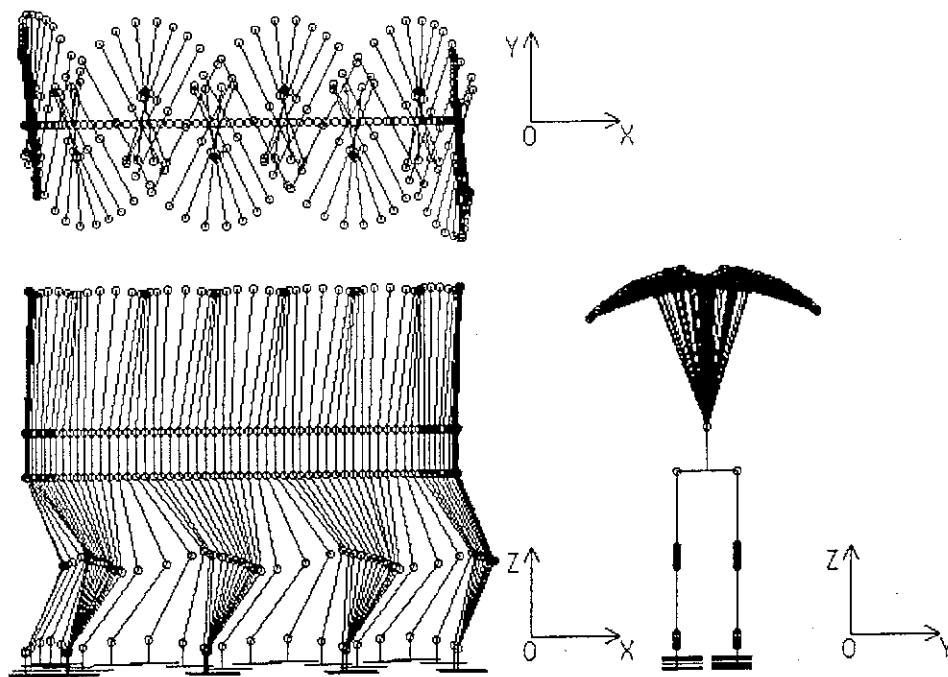


Fig. 4.1 Walking simulation(1)



c) step time 1.28[s], step length 0.30[m]



d) step time 0.96[s], step length 0.30[m]

Fig. 4.1 Walking simulation(2)

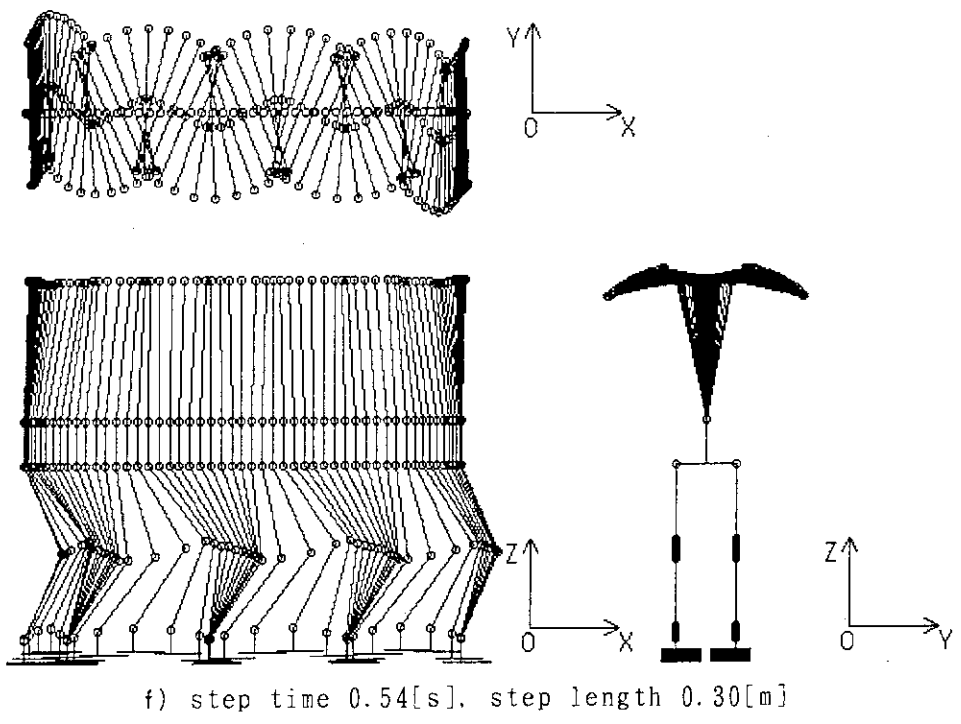
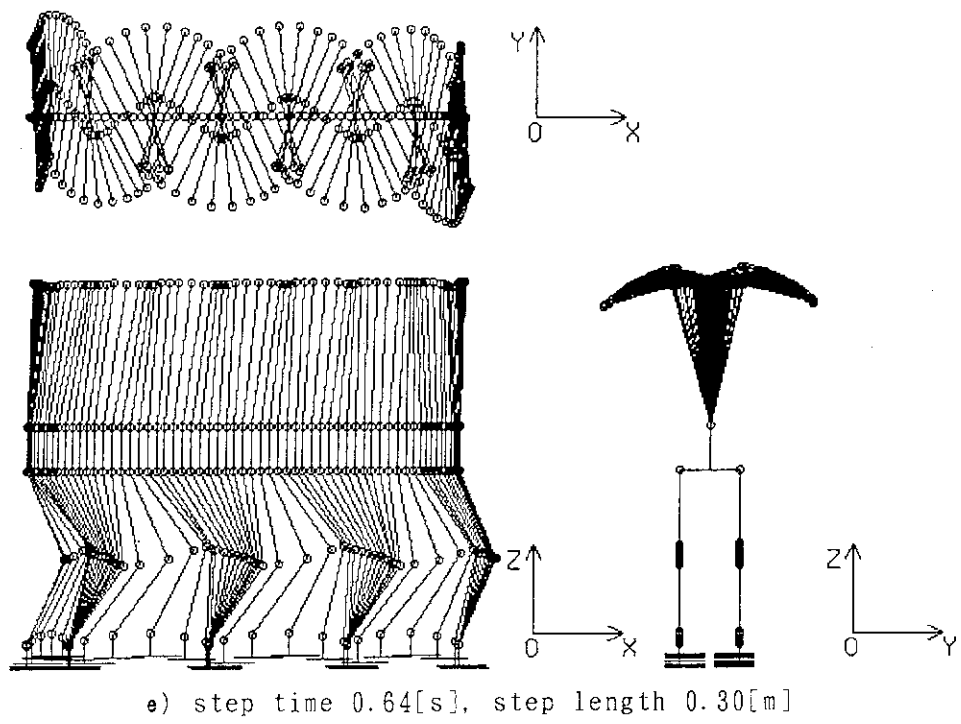
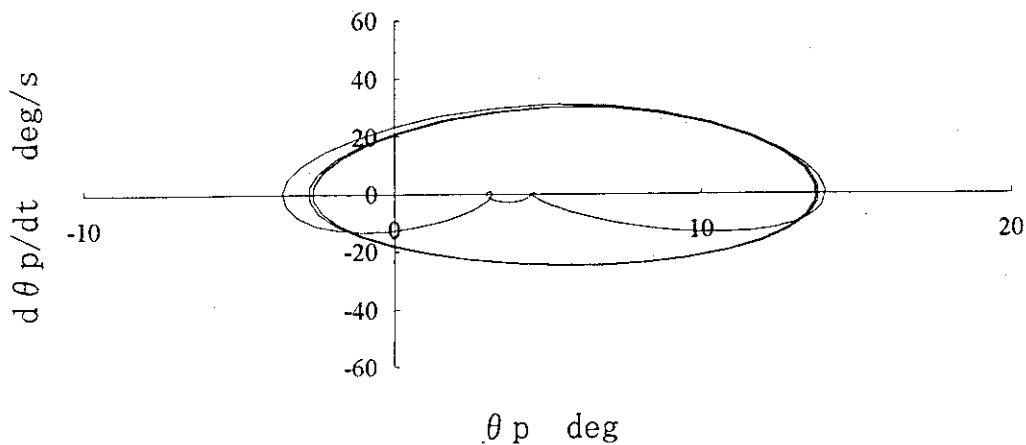
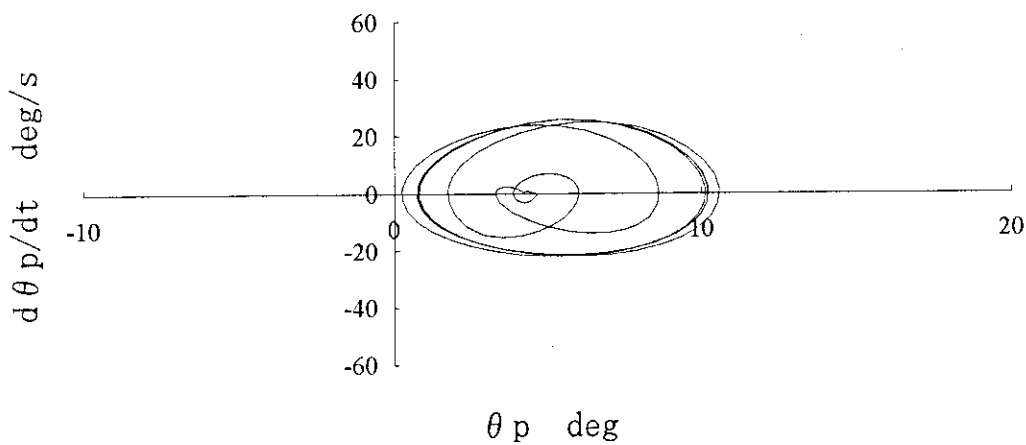


Fig. 4.1 Walking simulation(3)

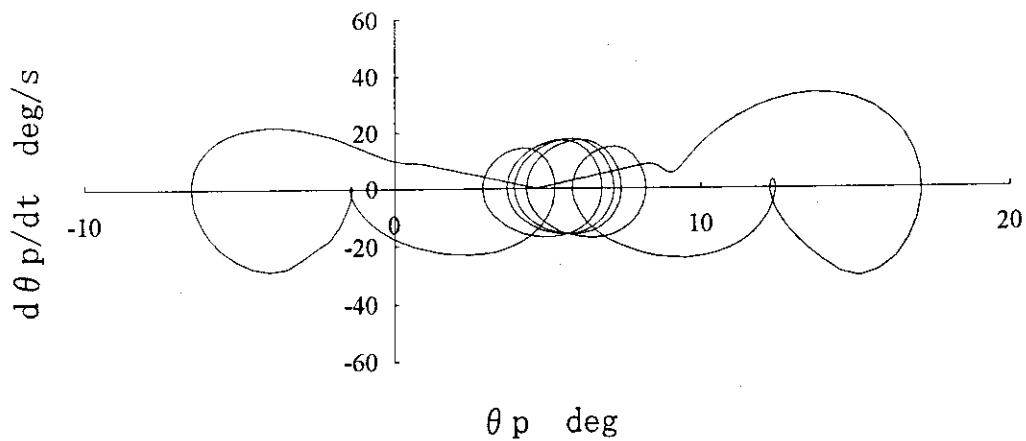




step time: 1.92[s/step], step length: 0.3[m]



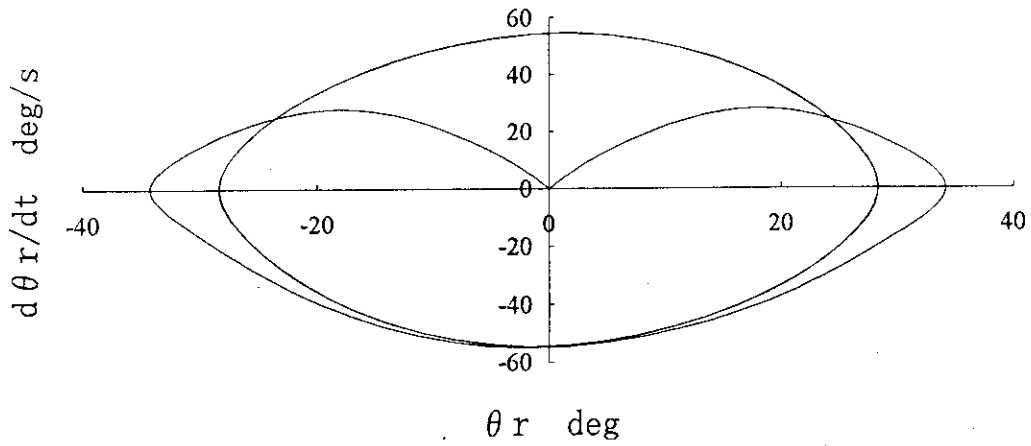
step time: 1.28[s/step], step length: 0.3[m]



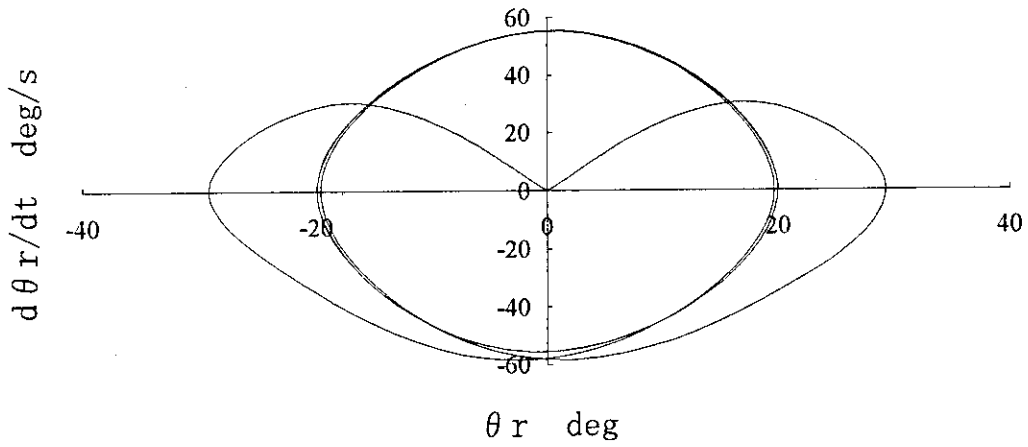
step time: 0.64[s/step], step length: 0.3[m]

(a) Pitch-axis

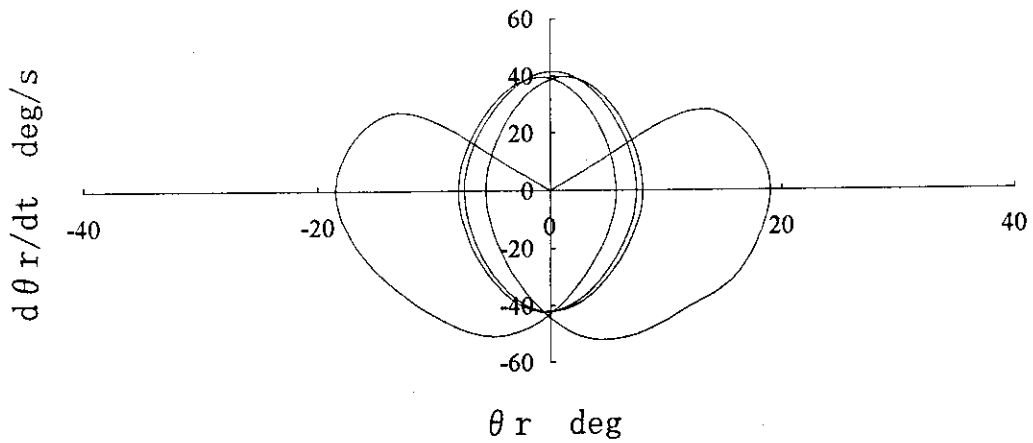
Fig.4.2(a) Phase plane trajectories of compensative trunk motion



step time: 1.92[s/step], step length: 0.3[m]



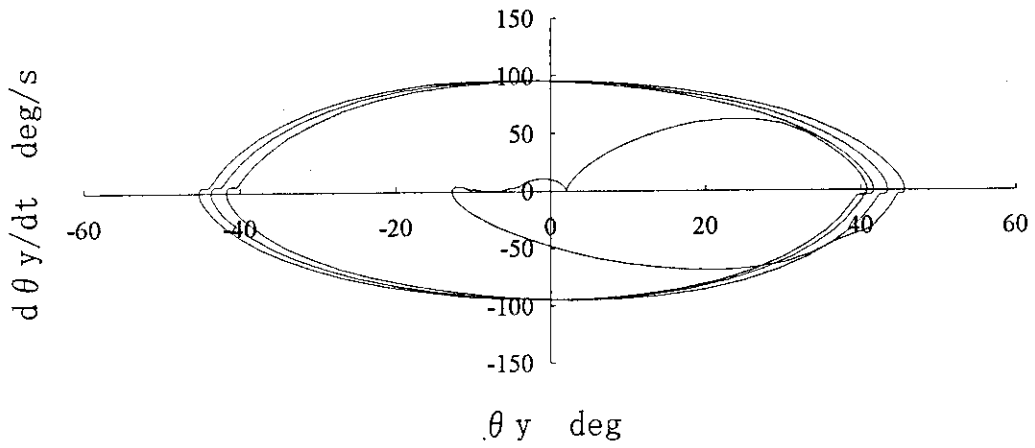
step time: 1.28[s/step], step length: 0.3[m]



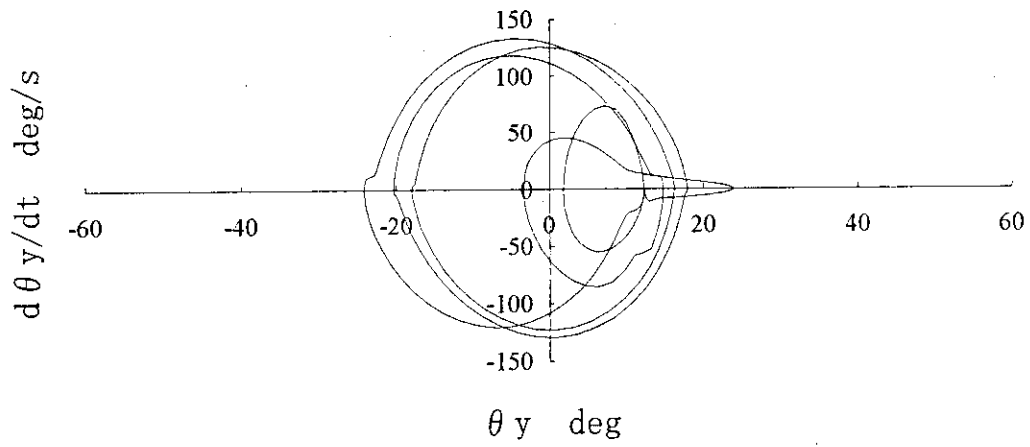
step time: 0.64[s/step], step length: 0.3[m]

(b) Roll-axis

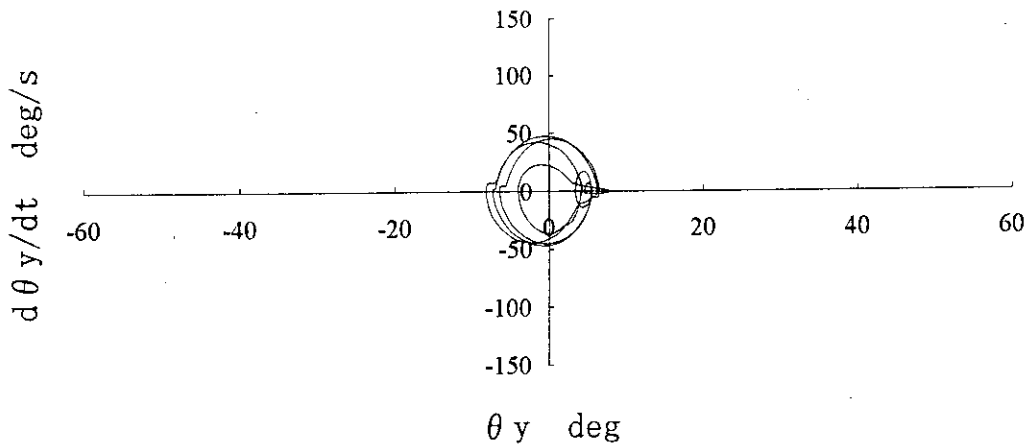
Fig.4.2(b) Phase plane trajectories of compensative trunk motion



step time: 1.92[s/step], step length: 0.3[m]



step time: 1.28[s/step], step length: 0.3[m]



step time: 0.64[s/step], step length: 0.3[m]

(c) Yaw-axis

Fig.4.2(c) Phase plane trajectories of compensative trunk motion

## 5. 歩 行 実 験

### 5. 1 実験目的

3軸モーメントの補償が可能な2足歩行ロボットWL-12RVを用いて、高速動歩行実験を行い、開発した歩行制御方式ならびにシステムの有効性を検討することを本実験の目的とする。

### 5. 2 実験方法

3軸モーメントに対応した上体補償軌道算出アルゴリズムに基づいて作成した歩行パターンを使用し、従来まで実現できなかった高速動歩行を行う。

### 5. 3 実験結果

歩行実験の結果、最高速で $0.3[\text{m/step}]$ ,  $0.54[\text{s/step}]$ の動歩行を実現した。従来における最高歩行速度は $0.3[\text{m/step}]$ ,  $0.84[\text{s/step}]$ であるので、歩行速度を約1.5倍、高速化できたことになる。

本歩行における各R.A.の応答データをFig. 5.1に示す。

# RA0

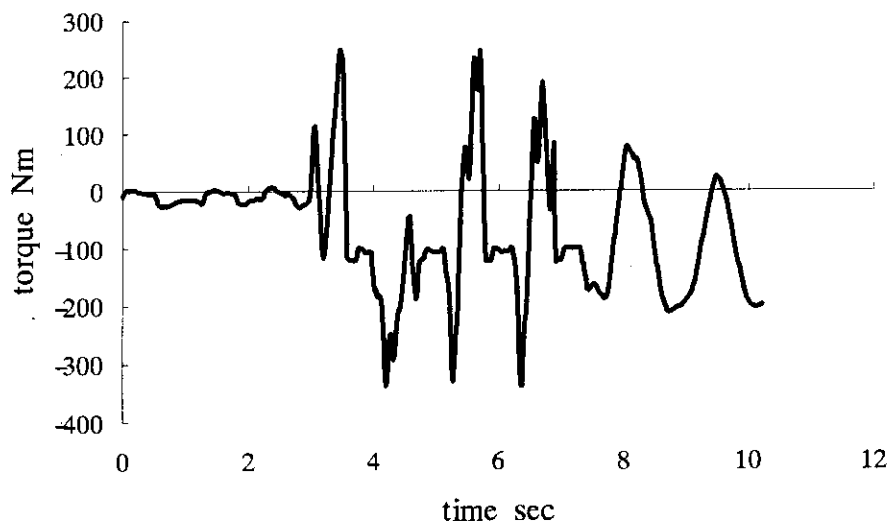
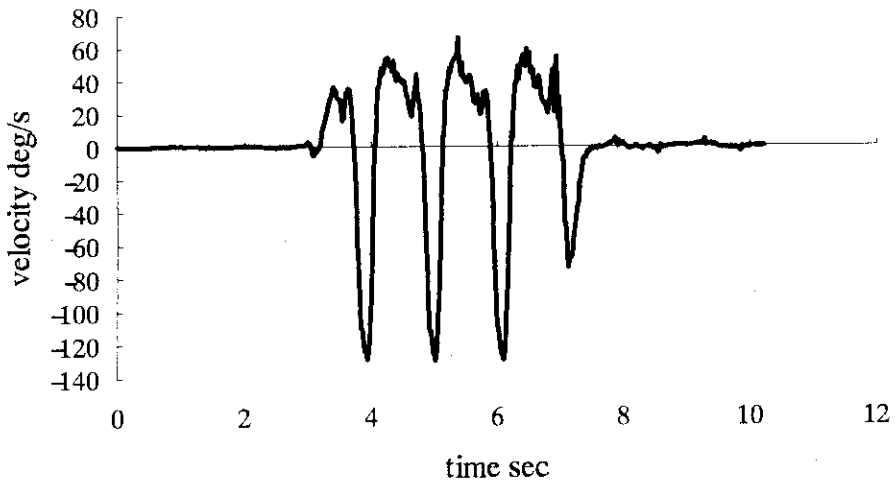
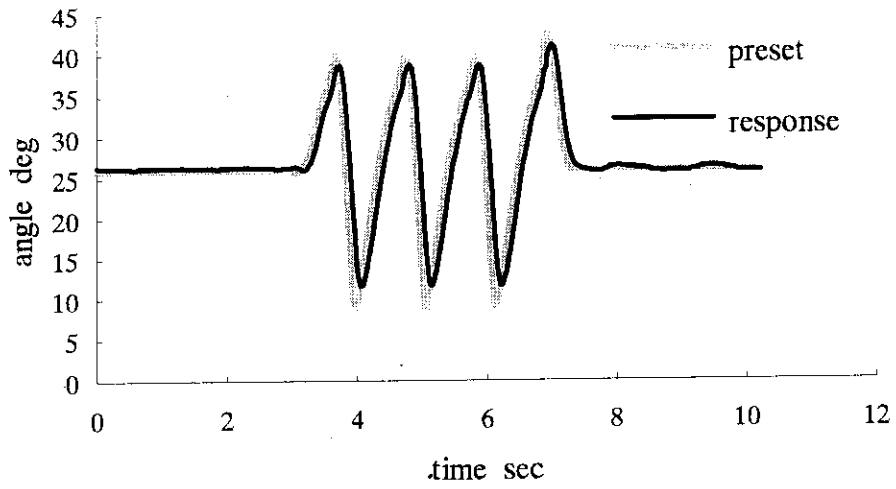


Fig.5.1(a) Response of R.A. during Walking

# RA1

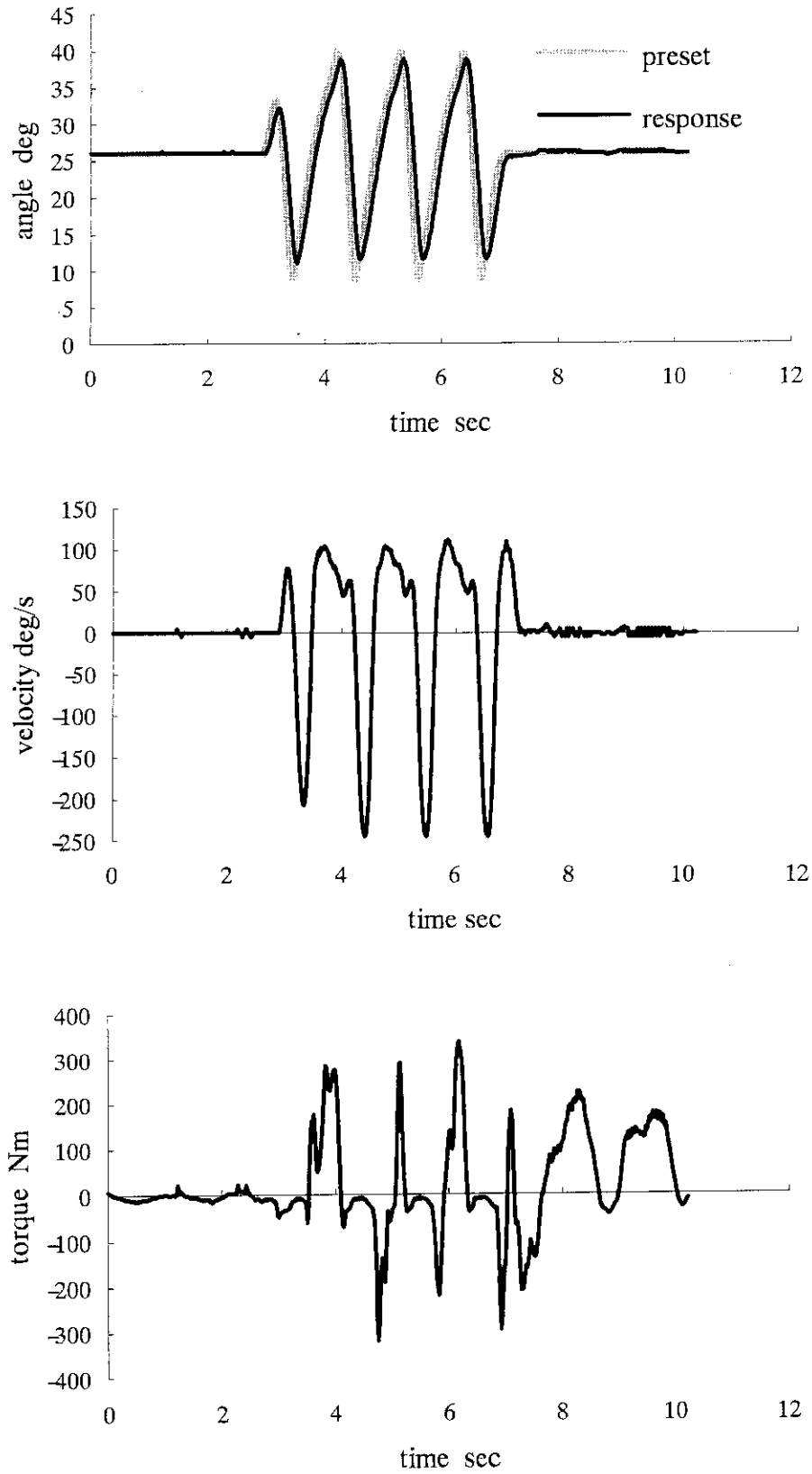


Fig.5.1(b) Response of R.A. during Walking

### RA2

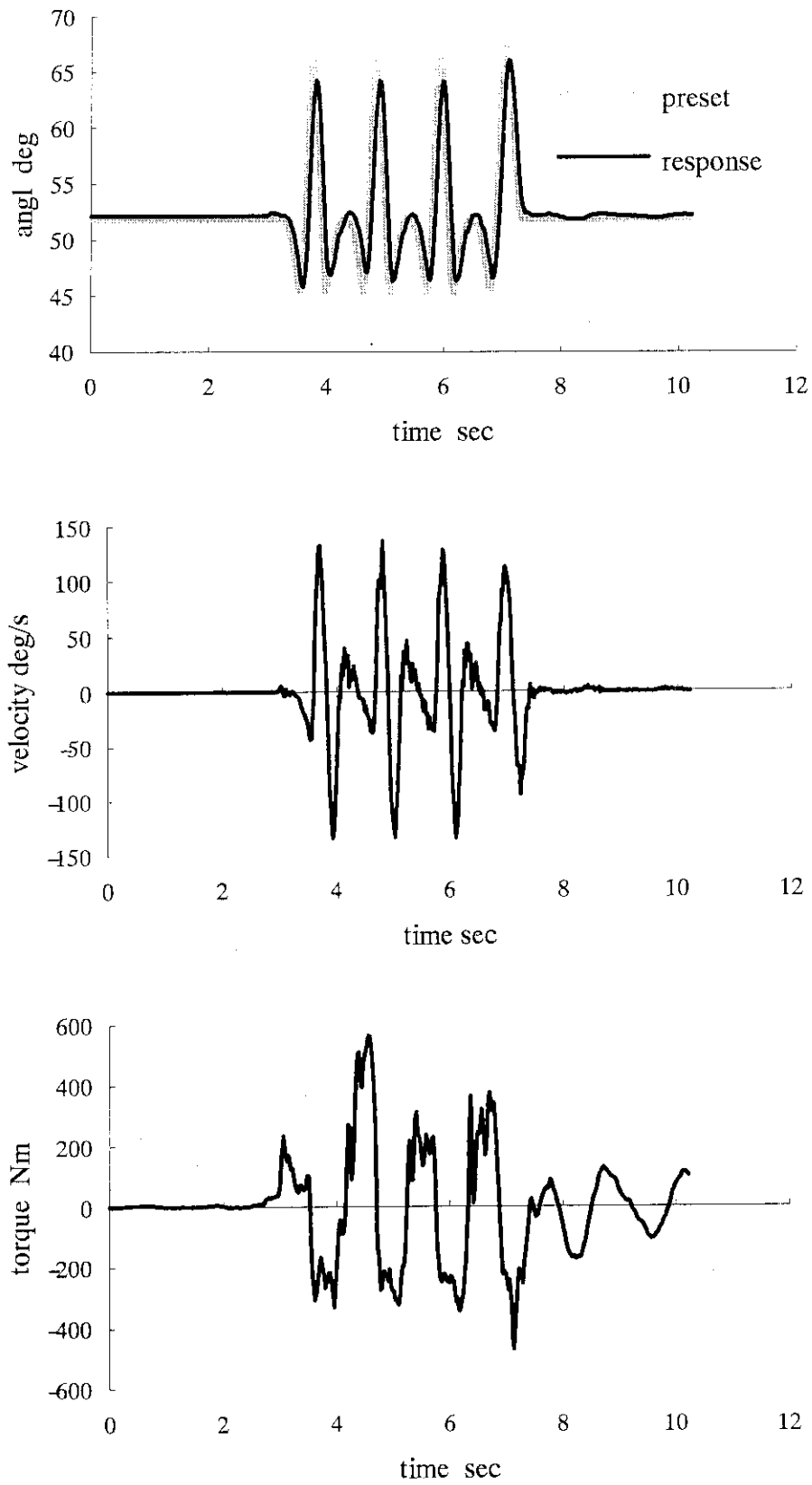


Fig.5.1(c) Response of R.A. during Walking

### RA3

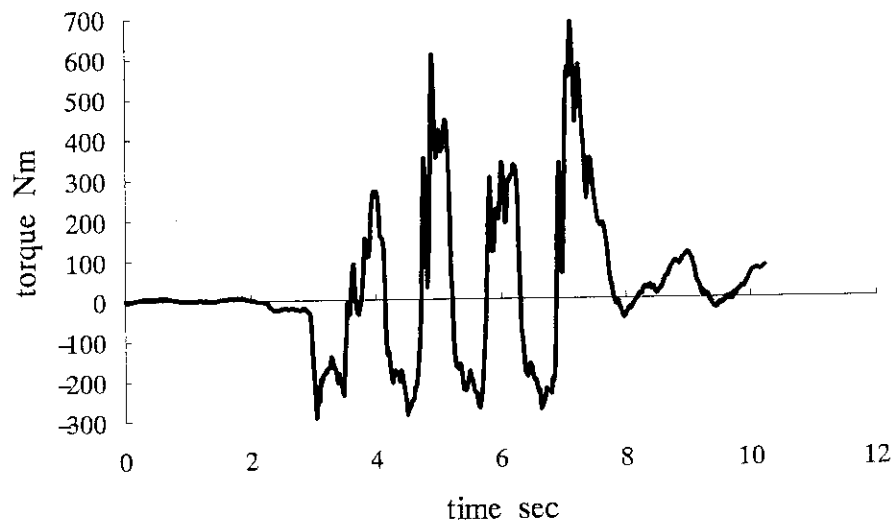
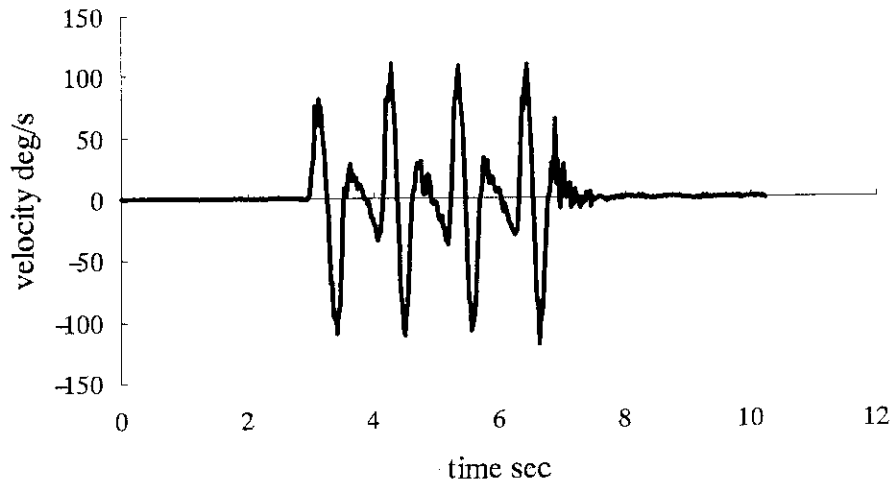
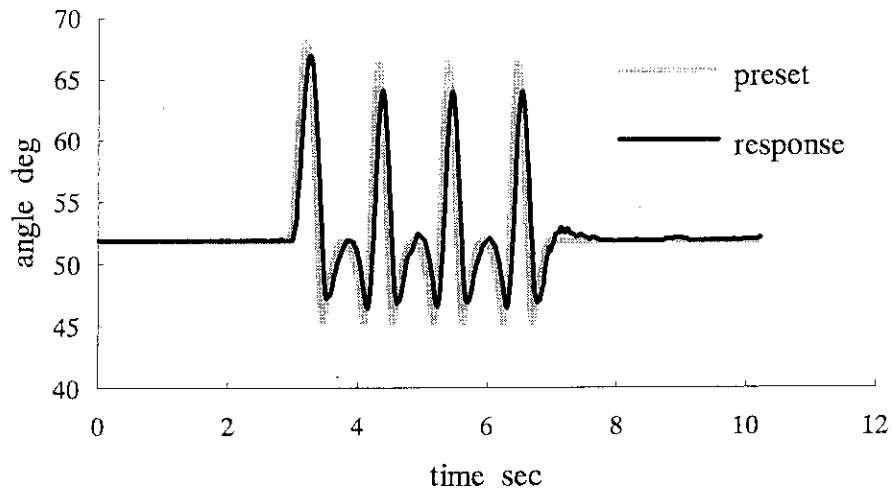


Fig.5.1(d) Response of R.A. during Walking



### RA4

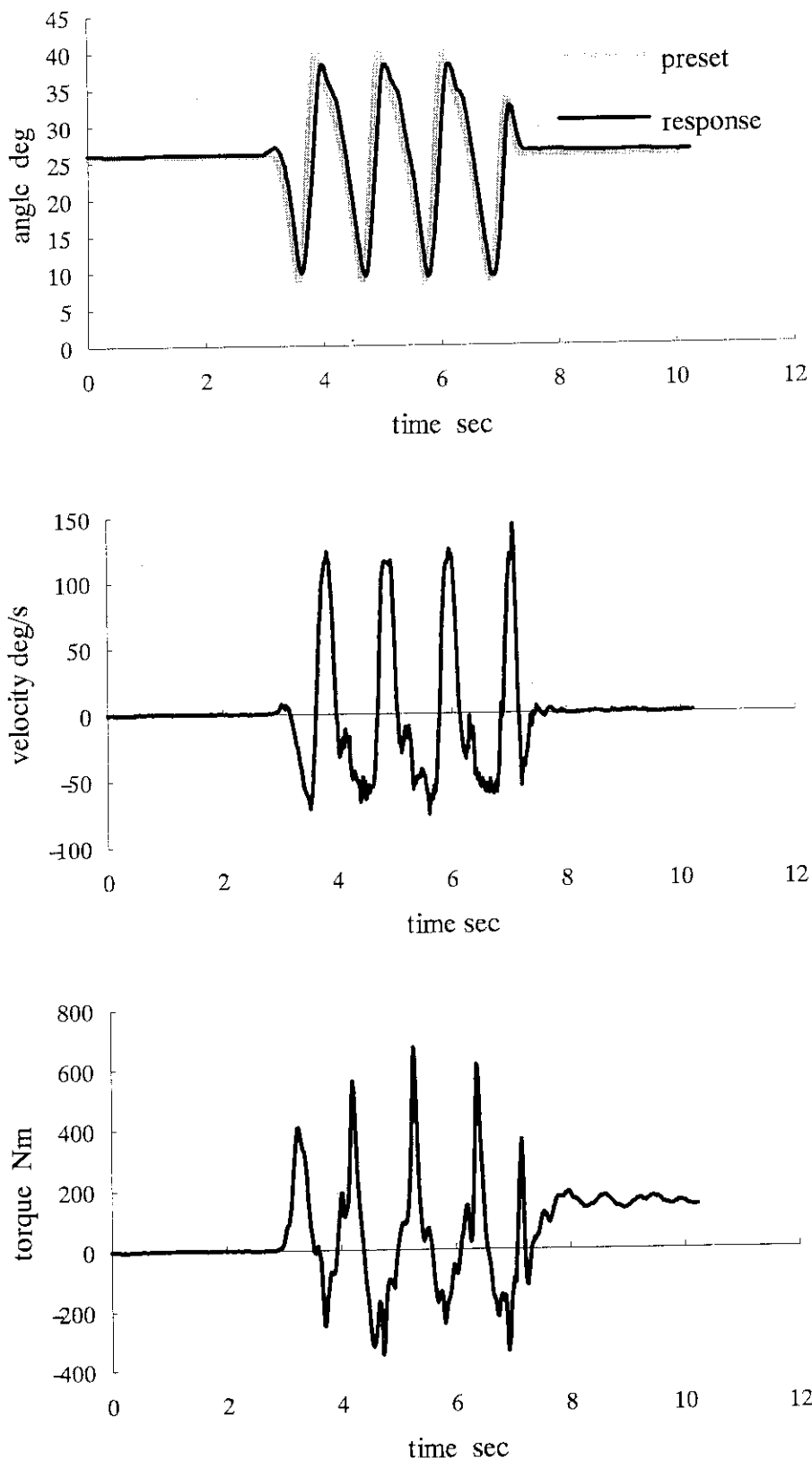


Fig.5.1(e) Response of R.A. during Walking

# RA5

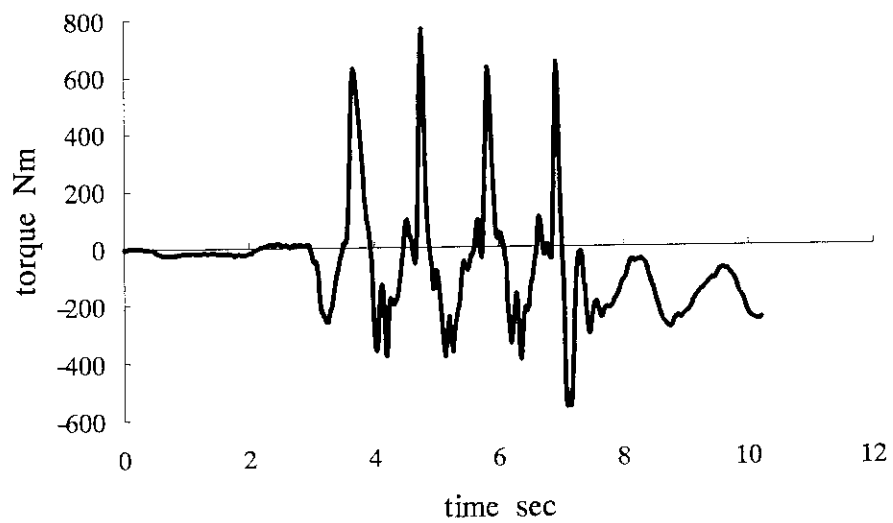
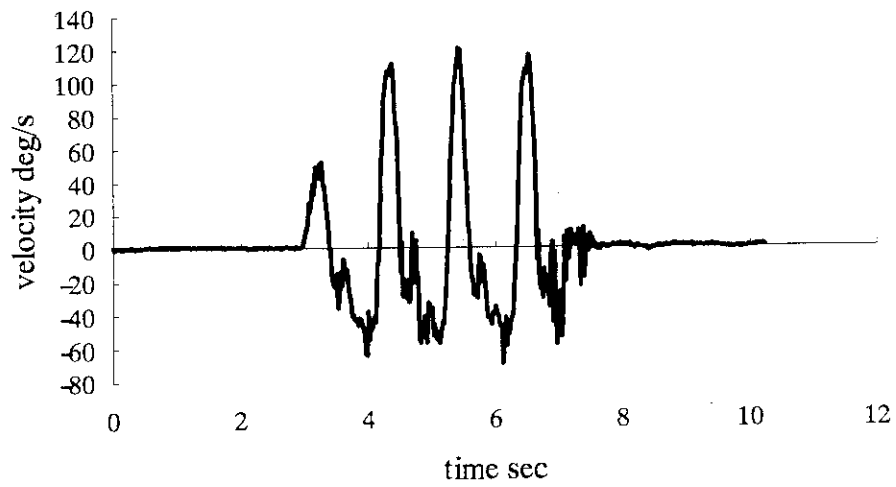
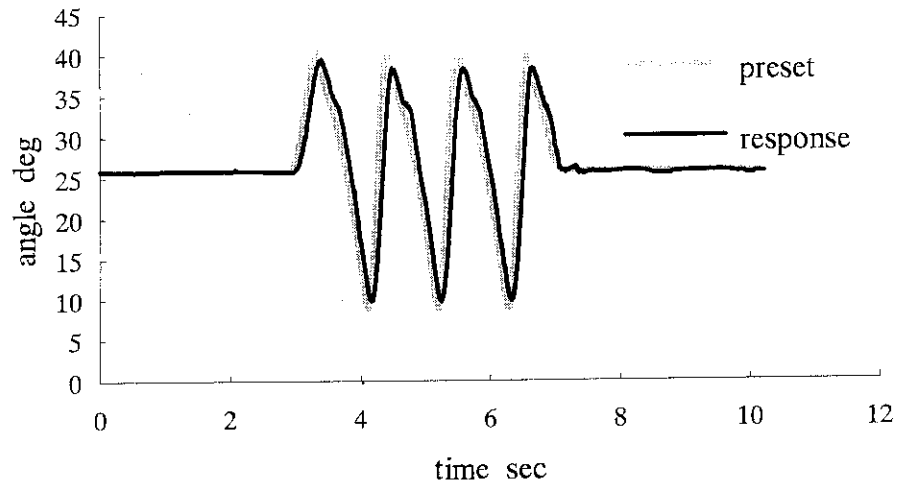


Fig.5.1(f) Response of R.A. during Walking

### RA6

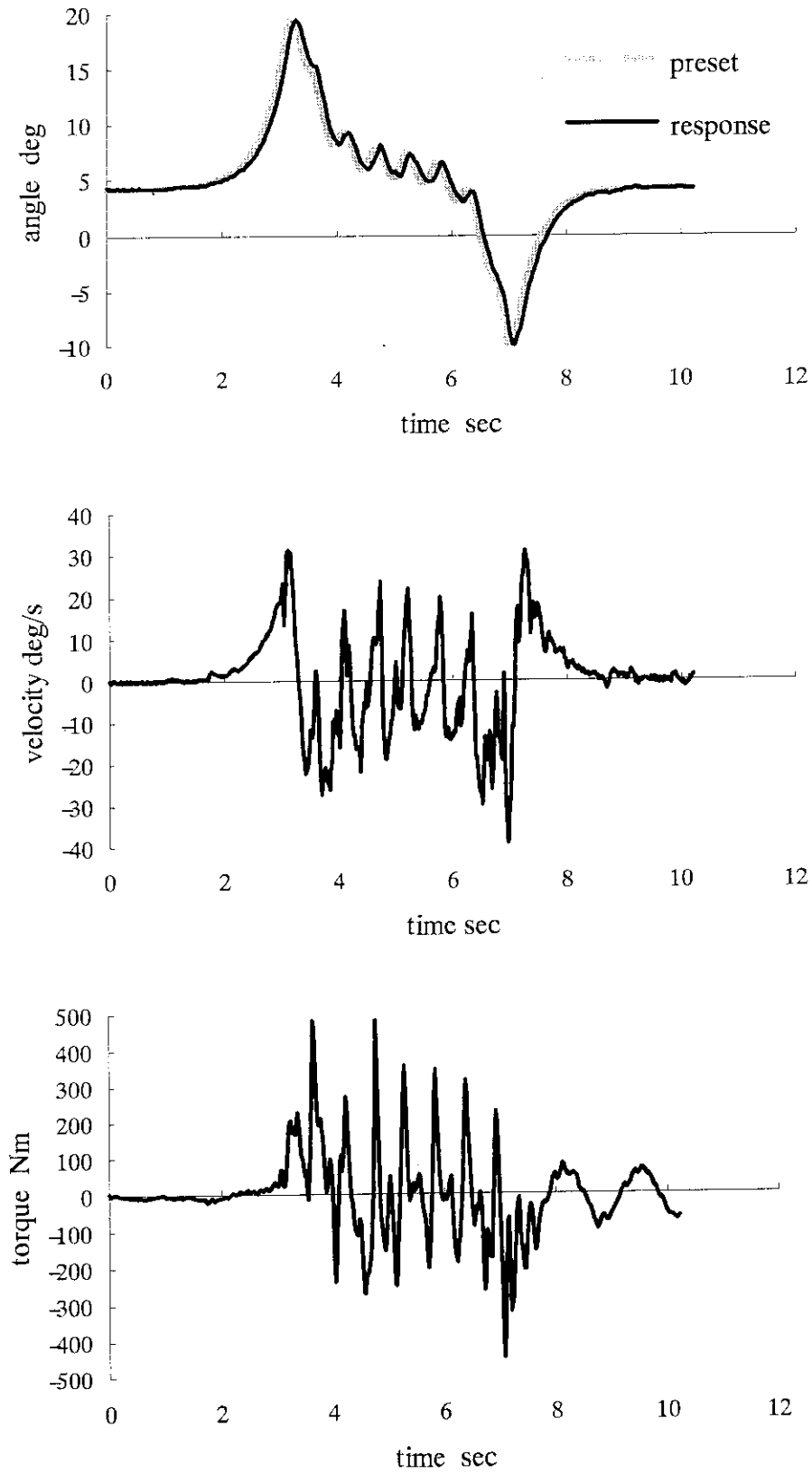


Fig.5.1(g) Response of R.A. during Walking

RA7

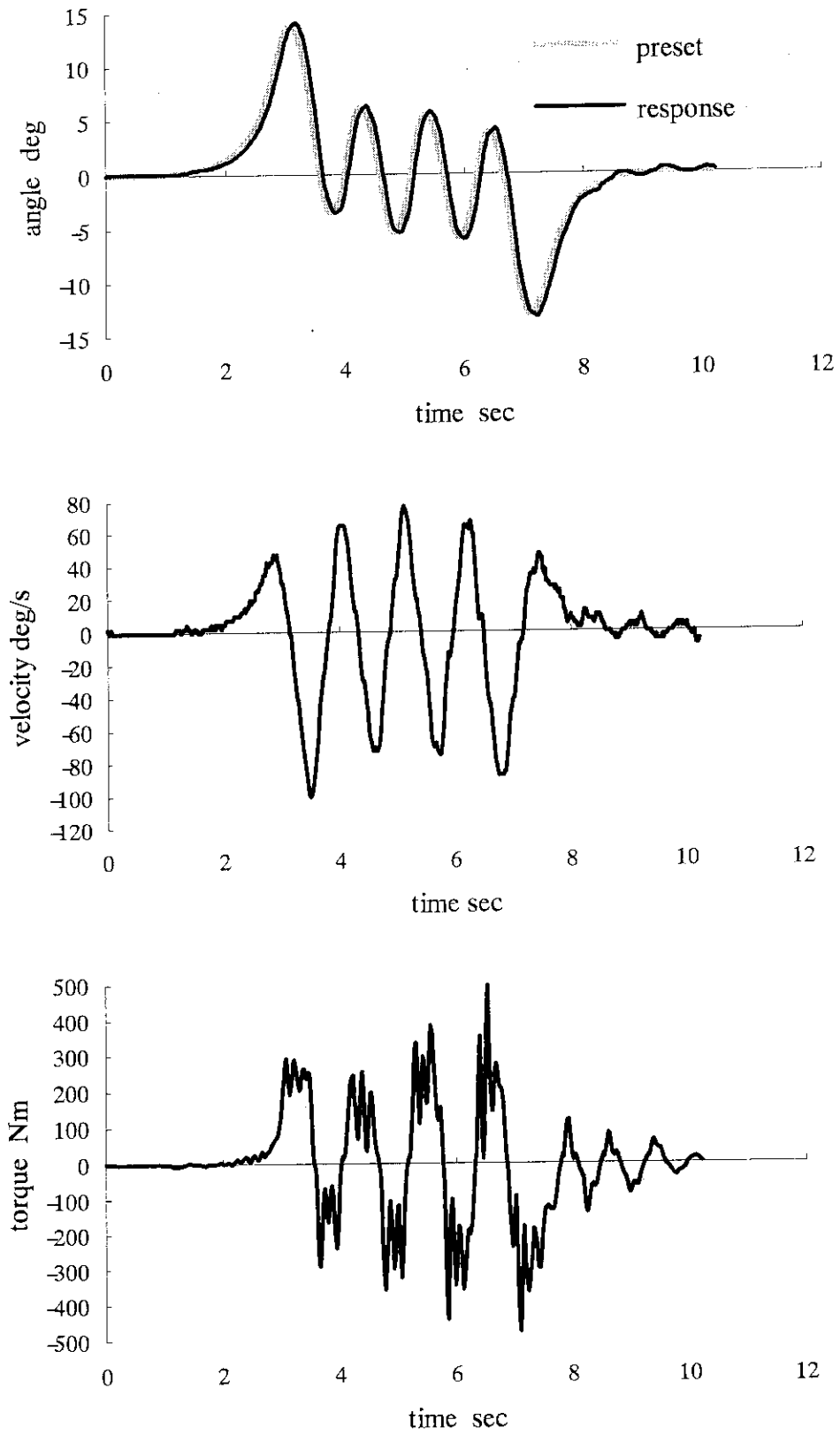


Fig.5.1(h) Response of R.A. during Walking

# RA8

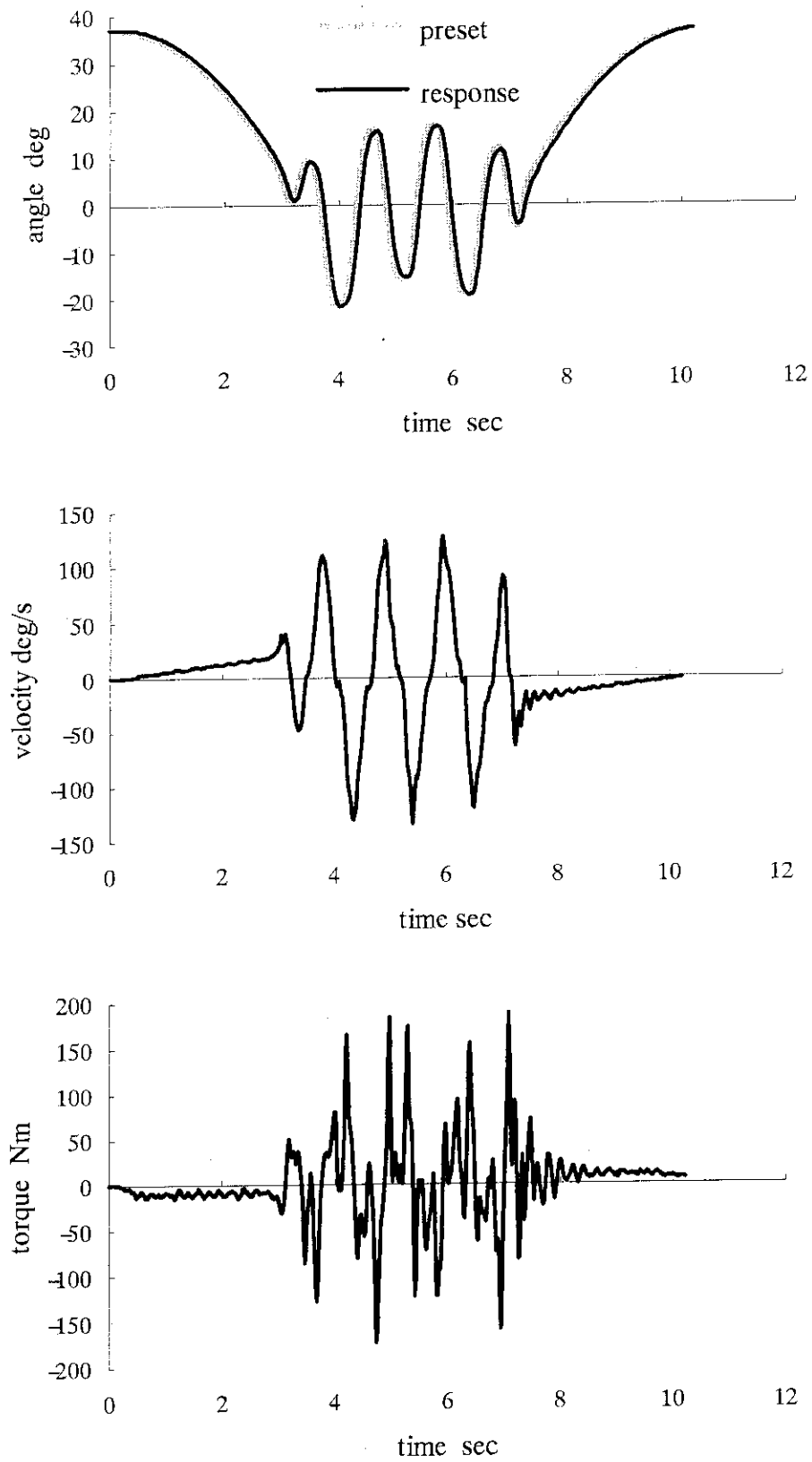


Fig.5.1(i) Response of R.A. during Walking

## 6. おわりに

本報告書は2足歩行ロボット高速化のために開発した3軸モーメントの補償が可能な2足歩行ロボットWL-12RVの調査結果である。

WL-12RVにおいて、0.54[s/step]で0.3[m/step]の高速動歩行を実現した。従来の最高歩行速度(0.84[s/step], 0.3[m/step])に比べ歩行速度を約1.5倍高速化できた。本報告では、機械ハードウェアの概略および3軸モーメントに対応した上体補償軌道算出アルゴリズムについて述べた。また、機械モデルを用いた実験結果について述べた。

## 謝 辞

本報告書作成にあたり多大な御協力を頂きました。早稲田大学理工学部機械工学科加藤研究室及び高西研究室の皆様には深く感謝します。

また、本報告書を書く機会を与えて頂きました情報システムセンター室長秋元正幸氏に深く感謝します。

## 参 考 文 献

- (1) 寸土勸：上体運動により3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットの研究，平成3年度早稲田大学修士論文
- (2) 高西淳夫，寸土勸，笠井茂，加藤一郎：  
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～高速動歩行に実現～，第6回知能移動ロボットシンポジウム，1993年5月
- (3) 山口仁一，高西淳夫，加藤一郎：  
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～高速上体補償軌道算出アルゴリズムの開発～，第10回日本ロボット学会学術講演会，1992年11月
- (4) 山口仁一，高西淳夫，加藤一郎：  
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, pp581-586, 1993

## 6. おわりに

本報告書は2足歩行ロボット高速化のために開発した3軸モーメントの補償が可能な2足歩行ロボットWL-12RVの調査結果である。

WL-12RVにおいて、0.54[s/step]で0.3[m/step]の高速動歩行を実現した。従来の最高歩行速度(0.84[s/step], 0.3[m/step])に比べ歩行速度を約1.5倍高速化できた。本報告では、機械ハードウェアの概略および3軸モーメントに対応した上体補償軌道算出アルゴリズムについて述べた。また、機械モデルを用いた実験結果について述べた。

## 謝 辞

本報告書作成にあたり多大な御協力を頂きました。早稲田大学理工学部機械工学科加藤研究室及び高西研究室の皆様には深く感謝します。

また、本報告書を書く機会を与えて頂きました情報システムセンター室長秋元正幸氏に深く感謝します。

## 参 考 文 献

- (1) 寸土勦：上体運動により3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットの研究，平成3年度早稲田大学修士論文
- (2) 高西淳夫，寸土勦，笠井茂，加藤一郎：  
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～高速動歩行に実現～，第6回知能移動ロボットシンポジウム，1993年5月
- (3) 山口仁一，高西淳夫，加藤一郎：  
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～高速上体補償軌道算出アルゴリズムの開発～，第10回日本ロボット学会学術講演会，1992年11月
- (4) 山口仁一，高西淳夫，加藤一郎：  
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, pp581-586, 1993

## 6. おわりに

本報告書は2足歩行ロボット高速化のために開発した3軸モーメントの補償が可能な2足歩行ロボットWL-12RVの調査結果である。

WL-12RVにおいて、0.54[s/step]で0.3[m/step]の高速動歩行を実現した。従来の最高歩行速度(0.84[s/step], 0.3[m/step])に比べ歩行速度を約1.5倍高速化できた。本報告では、機械ハードウェアの概略および3軸モーメントに対応した上体補償軌道算出アルゴリズムについて述べた。また、機械モデルを用いた実験結果について述べた。

## 謝 辞

本報告書作成にあたり多大な御協力を頂きました。早稲田大学理工学部機械工学科加藤研究室及び高西研究室の皆様には深く感謝します。

また、本報告書を書く機会を与えて頂きました情報システムセンター室長秋元正幸氏に深く感謝します。

## 参 考 文 献

- (1) 寸土勸：上体運動により3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットの研究，平成3年度早稲田大学修士論文
- (2) 高西淳夫，寸土勸，笠井茂，加藤一郎：  
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～高速動歩行に実現～，第6回知能移動ロボットシンポジウム，1993年5月
- (3) 山口仁一，高西淳夫，加藤一郎：  
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～高速上体補償軌道算出アルゴリズムの開発～，第10回日本ロボット学会学術講演会，1992年11月
- (4) 山口仁一，高西淳夫，加藤一郎：  
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, pp581-586, 1993