

JAERI-M
90-093

二足歩行の運動学方程式化
—直進における完全歩行の運動方程式—

1990年6月

高西 淳夫*・加藤 一郎*・久米 悦雄

JAERI-M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。
入手の間合わせは、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、お申しこしください。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。

JAERI-M reports are 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, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日立高速印刷株式会社

二足歩行の運動学方程式化
——直進における完全歩行の運動方程式——

日本原子力研究所東海研究所計算センター
高西 淳夫*・加藤 一郎*・久米 悦雄

(1990年5月29日受理)

日本原子力研究所では、1987年からHASP (Human Acts Simulation Program) と題する研究を進めている。このテーマの下で人間型ロボットの動作シミュレーションに関する研究を行っており、現在は人間動作の一つである二足歩行に取り組んでいる。これまでは、ユーゴスラビアのヴコブラトビッチ (Prof. M. Vukobratović) の人体モデルを用いて、平地や階段における直進の定常歩行のシミュレーションを行ってきた。しかし、歩容にはこのように単純なものばかりではなく、例えば停止・発進、方向転換等の様な複雑なものもある。

人間型ロボットの動作シミュレーションを行うためには、人間動作を機械力学的に見た場合に成立する運動方程式及びその拘束条件が必要である。本報告は、人間動作の一つである二足歩行において成立する運動方程式化に関し、ロボットが停止や発進をする場合に成立する運動方程式及びその拘束条件に関する調査報告である。

Dynamics of Biped Locomotion Robot
-Equations of Straight Walking Motion-

Atsuo TAKANISHI^{*}, Ichiro KATO^{*} and Etsuo KUME

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

(Received May 29, 1990)

The Human Acts Simulation Program, HASP in short, started in 1987 at JAERI. In the HASP, the motion of a human shaped robot is being simulated numerically.

First, focusing on one of the most fundamental human motions, biped locomotion has been simulated. The model of human biped locomotion in this study is based on the model of Prof. Vukobratović, Yugoslavia. The steady walking has been simulated on flat floor and go up and down the stairs. However the gait is not only for these simple motions but also for complicated ones such as starting, stopping and turning motions.

In order to simulate the motions of a human shaped robot, it is necessary to set up the equations of motions and their restrictions from the point of view of mechanical analysis of human motions. This paper shows equations of motion and their restrictions when the biped locomotion robot starts and stops walking.

Keywords : Robot, Robot Dynamics, Biped Locomotion, Zero Moment Point (ZMP), Gait, Dynamic Walking, Steady Walking

* Waseda University

目 次

1. はじめに	1
2. 関連論文とその抄訳	2
3. 二足歩行の運動学方程式および拘束条件	5
3.1 歩行系の動力学	5
3.2 上体補償軌道生成アルゴリズム	8
3.3 歩行パターン作成プログラム	12
4. 歩行実験	24
4.1 実験目的	24
4.2 実験方法	24
4.3 実験結果	24
4.4 考察	24
5. おわりに	50
謝 辞	50
参考文献	51

Contents

1. Introduction	1
2. Abstracts of relation bibliography	2
3. Robotics equation for biped locomotion	5
3.1 Robot dynamics	5
3.2 Control of dynamic biped locomotion compensating with a trunk ...	8
3.3 Program for creating a walking pattern	12
4. Experiment	24
4.1 Aim of experiment	24
4.2 Experimentation	24
4.3 Experimental results	24
4.4 Consideration	24
5. Concluding remarks	50
Acknowledgements.....	50
References	51

1. はじめに

日本原子力研究所では、1987年よりHASP (Human Acts Simulation Program)と名付けた人工知能とロボティクスに関する研究を行っている^{1)~3)} HASPの概念は、自然文で書かれた命令を計算機の中で作り出されたソフト的知能ロボットに与え、ロボットの運動によってプラント保守作業を遂行させ、その過程を実時間で映像化しようとするものである。ロボティクスに関する分野では、現在のプラントが多くの場合人間の存在を前提に作られていることを考慮して、作業ロボットは人間型が望ましいと考えている。移動機構に関しても現在では車輪やクローラ型が主流であるが、これらよりも脚のほうが遥かに地形の変化や障害物回避に対する適応性が高いことは明らかである。そのため、本研究は人間型二足歩行ロボットを研究の対象としている。

本報告は、この人間型ロボットの二足歩行時において成立する運動方程式に関する調査結果である。今回の調査は、二足歩行での停止や発進を行う場合における運動方程式化に関し、動力学的に見たロボットの動作についての関連文献、運動方程式及び拘束条件についてのものである。

2. 関連論文とその抄訳

近年の二足歩行ロボットに関する論文のうち、特に二足歩行の運動学方程式に関係あるものを選んだ、以下にその抄訳を示す。

- (1) 高西，他：上体補償型 2 足歩行制御方式，第 26 回計測自動制御学会学術講演会，1987⁴⁾

〔抄訳〕著者らは，昭和 59 年度に WL-10RD を用いて 1 歩 1.5 [秒] の平行型直進歩行を実現している。昭和 60 年度には，環境適応能力実現の第一ステップとして，同モデルを用いて斜面及び階段上での動歩行を達成している。しかし，不整地や外力のある環境で安定な歩行を維持するためには，WL-10RD のような下肢機構部のみの歩行ロボットでは補償機能が不十分であると考えられる。そこで，歩容安定化のための補償器として上体機構部を有する 2 足歩行ロボットを考え，上体機構部の運動により歩行の安定化を図る新たな歩行制御方式を考案している。この制御方式の骨子は，任意の下肢機構部の軌道，任意の外力（外力モーメント）パターン，および任意の ZMP（Zero Moment Point）軌道から，上体の補償軌道をあらかじめ計算し，そ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。

- (2) 高西，他：上体補償機構を有する 2 足歩行ロボット WL-12 の開発，第 5 回日本ロボット学会学術講演会，1987⁵⁾

〔抄訳〕著者らは，これまで，下肢機構部のみの 2 足歩行ロボット WL-10RD を用いて，昭和 59 年度に 1 歩 1.3 [秒] の平行型直進歩行を実現し，さらに昭和 60 年度に斜面および階段の上り下りの動歩行を達成している。しかし，不整地や外乱のある環境で安定な歩行を維持するためには，下肢機構部のみの歩行ロボットでは補償機能が十分でない。そこで，上体機構部を有する 2 足歩行ロボット WL-12 (Waseda Leg-12) を新たに設計製作し，上体機構部の運動で歩行の安定化を図る新たな歩行制御方式をこれに適用することで，上体補償型動歩行を実現することを目的としている。歩行実験の結果，WL-12 が外力の加わらない水平，平坦路において歩幅 30 [cm] で 1 歩 1.3 [秒] の動歩行を実現している。

- (3) 武市，伊藤：低次元化モデルによる三次元二足動歩行の考察，第 5 回日本ロボット学会学術講演会，1987⁶⁾

〔抄訳〕二足歩行実現はその構造からの非線形性，多変数，脚が固定されていない等の理由から容易ではない。これまで，この困難さを避けるため線形化，低次元化等，各種の近似がおこなわれており，シミュレーション，実機実験によりその有効性が確かめられてきた。著者らの研究を含め，多くは進行方向を含む平面内に運動を限定し考察をおこなっていた。また，いくつかは，三次元歩行をめざしてはいるが脚交換期の進行方向と横方向の運動の干渉を無視している。運動方程式および脚交換の撃力方程式の複雑さを考えれば，これも当然である。

しかし，各種干渉等，二足歩行の特徴といえる点を無視しては自然な歩行が実現

できるとは考えにくい。これらの干渉を考察すると、運動方程式は線形化できず非線形方程式を取り扱わねばならない。そのため解析的検討は困難でシミュレーションにより対象の運動を調べねばならない。

本報告は、上記の考え方により三次元歩行ロボットの歩行を実現するために、低次元化をおこなったロボットの運動をシミュレーションにより調べ、安定な歩行をうるための一つの方策を試みたものである。

- (4) 若原，他：2足歩行パターン作成支援システム『WALK MASTER-4』の開発，第5回日本ロボット学会学術講演会，1987⁷⁾

〔抄訳〕近年、電気・機械・建築のCADシステムは普及の段階に入り、最近ではパーソナルコンピュータ上で走るものも多数発表されている。ロボットについても機構設計や軌道計画を目的とした設計支援システムが、現在続々と実用化されつつある。しかしこれらはいずれも、マニピュレータを対象としたもので移動用のものはまだあまりなく、今後ロボットの自立化を進める上でも、移動ロボットのための計算機支援システムの出現が望まれる。

著者らは、移動ロボットとして2足歩行ロボットを対象にし、その歩行パターン作成機能を有する計算機支援システム「WALK MASTER」シリーズをパーソナルコンピュータ上に構築、開発している。本シリーズにおいて、昭和60年度までに単脚支持相における歩行パターンおよび立脚切替相における歩行パラメータの作成を対話的に行う

「WALK MASTER-3」を開発し、既に報告している。本報告は昭和61年度に単脚支持相における歩行パターン作成に関するオペレータの経験的知識をルールとしてプログラミングできる機能を付加し、後戻り探索手法により歩行パターンの自動生成可能な「WALK MASTER-4」の開発について述べている。

- (5) 五十嵐，野飼：二足歩行運動における両脚支持状態の力学解析と制御，第5回日本ロボット学会学術講演会，1987⁸⁾

〔抄訳〕二足歩行運動では、遊脚を振り出して歩を進める「単脚支持相」と両脚を接地した状態で重心を、進行方向に送り出す「両脚支持相」の二つの相が存在する。両脚支持相は閉ループリンク機構になっており、単脚支持相における開ループリンク機構に二つの拘束条件が付加された拘束条件付力学系と考えられる。従来、このような力学系の運動解析にはラグランジェの不定乗数が用いられて来たが、本報告では、ダランベールの原理を用いてこの状態の力学的特徴が直観的に理解できるような手法を考え、その方法を用いた制御法について述べている。

- (6) 米田：HC地形のための2足歩行ロボットの開発，第5回日本ロボット学会学術講演会，1987⁹⁾

〔抄訳〕人間が歩行するために作られた屋内の通路は廊下や階段のように路面は水平で、その間に段差のある地形がほとんどである。このように高さの異なるいくつかの水平面によって構成される地形をHC (Horizontally Composed) 地形と定義している。本研究ではHC地形を歩行するための2足歩行ロボットの開発を行ない、実際に機械モデルによってHC地形での歩行を実現している。

- (7) 梶田，谷：動的2足歩行ロボットのFrontal Plane内運動の制御，第5回日本ロボット学会学術講演会，1987¹⁰⁾

〔抄訳〕動的2足歩行ロボットに自動的に軌道を生成させる方法について昭和61年度に報告している。しかしその運動はsagittal plane内にかぎられており，実際に実験を行うには，ロボットの運動に2次元的な拘束を加える必要がある。一方，3次元的な動歩行においては，frontal Plane内の運動を適切に設定することによって歩行運動をsagittal planeの近傍に維持することが可能である。この時のロボットの前後方向のダイナミックスが，2次元平面内に拘束された場合とほぼ一致することは，有本，宮崎によって示されている。従って前回報告した手法を3次元動歩行に適用するためには，まず frontal Plane内の制御方法を確立する必要がある。本報告では，frontal Plane内の運動の制御の概念を示し，これをシミュレーションによって確認している。

- (8) 佐野，古荘，他：2足歩行ロボットBLR-G1の開発と制御，第5回日本ロボット学会学術講演会，1987¹¹⁾

〔抄訳〕2足歩行の研究において，3次元動的歩行は一つの目標である。3次元的に歩行を安定化させるには，姿勢検出センサの拡充と微妙な動きをさせるために力制御の導入が必要であると考えられる。本報告では，3次元歩行を二つの平面内の運動に分離して制御する一つの方式を提案し，さらに現代制御理論の適用を試み，ロバストネスの改善を計った成果を報告している。

3. 二足歩行の運動学方程式および拘束条件

3.1 歩行系の動力学

歩行に対する安定判別にはZMP (Zero Moment Point) 規範を用いることにする。ただしZMPは床面上においてロボットの各部材の重力によるモーメント, 慣性力によるモーメント, および外力モーメントの総和が0となる点とする。もし重力, 慣性力, および外力の合力が下向きで, かつ2つの足底接地面が形成する多角形の安定領域内にZMPが存在していれば, ロボットは転倒することなく安定に歩行することが可能となる。そこでまずZMPを求めるために, 外力も考慮に入れた場合の歩行系に対する動力的アプローチを行う。

最初に運動系に次のような前提条件と座標設定を行う。(Fig. 3.1 参照)

- (1) 歩行は質点の集合よりなる。
- (2) 床面 π は平面で十分に硬く, またどんな力が作用しても動くことがない。
- (3) XおよびY軸を含む平面が床面と一致し, 床面に垂直な軸をZ軸とする直交座標系W(右手系を)設定する。またXおよびY軸を含む平面が水平面と一致する直交座標系Oを設定する。
- (4) 歩行系の床面との接地状況は点接地の集合とする。
- (5) 床面での並進(XおよびY軸方向)に対する摩擦力は十分に大きい。
- (6) 歩行系が一点接地の場合, 床面での回転(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。

今, 水平面上に設けた座標系Oと座標系Wの座標変換行列Aを用いて床面 π に任意の傾きを与え, 座標系Wの上で歩行系の運動を考えていく。

$$A = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \cos\alpha & \sin\theta \sin\alpha \\ \sin\theta & \cos\theta \cos\alpha & -\sin\alpha \cos\theta \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

床面上の任意の点Pに関する(全)角運動量を \mathbf{L} とすると,

$$\mathbf{L} = \sum_i (\mathbf{r}_i - \mathbf{P}) \times m_i \frac{d}{dt} (\mathbf{r}_i - \mathbf{P}) \quad (3.2)$$

と表せる。また点Pについての運動方程式は, ダランベールの原理を用いて, 式(3.3)のようになる。(Fig. 3.1 参照)

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} + \sum_i (\mathbf{r}_i - \mathbf{P}) \times m_i \mathbf{G} + \mathbf{T} - \sum_j \mathbf{M}_j - \sum_k (\mathbf{S}_k - \mathbf{P}) \times \mathbf{F}_k = \mathbf{0} \quad (3.3)$$

- $\mathbf{P} = [x_p, y_p, 0]$: 床面 π 上の任意の点 P の位置ベクトル
 $\mathbf{G} = [g_x, g_y, g_z]$: 重力加速度
 m_i : i 番目の質点の質量
 $\mathbf{r}_i = [x_i, y_i, z_i]$: i 番目の質点の位置ベクトル
 $\mathbf{T} = [T_x, T_y, T_z]$: 点 P におけるトルク
 $\mathbf{M}_j = [M_{xj}, M_{yj}, M_{zj}]$: j 番目の外トルク
 $\mathbf{F}_k = [F_{xk}, F_{yk}, F_{zk}]$: k 番目の外力
 $\mathbf{S}_k = [S_{xk}, S_{yk}, S_{zk}]$: k 番目の外力を受ける点の位置ベクトル
 $\mathbf{0}$: ゼロベクトル

ただし重力加速度 \mathbf{G} は、座標変換行列 A を用いて、

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g \sin\theta \sin\alpha \\ -g \sin\alpha \cos\theta \\ g \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

g : 座標系 O の上の重力加速度

になる。

さらに式 (3.2) を式 (3.3) に代入する。

$$\sum_i m_i (\mathbf{r}_i - \mathbf{P}) \times \left\{ \left(\frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} + \mathbf{G} \right) - \frac{d^2 \mathbf{P}}{dt^2} \right\} + \mathbf{T} - \sum_j \mathbf{M}_j - \sum_k (\mathbf{S}_k - \mathbf{P}) \times \mathbf{F}_k = \mathbf{0} \quad (3.5)$$

前提条件(2)より床面は運動しないので、

$$\frac{d^2 \mathbf{P}}{dt^2} = \mathbf{0} \quad (3.6)$$

を考慮に入れて、式 (3.5) を変形後、成分別にする。

$$\begin{aligned} T_x = & \sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) y_p - \left\{ \sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) y_i - \sum_i m_i (\ddot{y}_i + g_y) z_i \right\} \\ & + \sum_j M_{xj} + \sum_k \{ (S_{yk} - y_p) F_{zk} - S_{zk} F_{yk} \} \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} T_y = & - \sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) x_p - \left\{ \sum_i m_i (\ddot{x}_i + g_x) z_i - \sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) x_i \right\} \\ & + \sum_j M_{yj} + \sum_k \{ S_{zk} F_{xk} - (S_{xk} - x_p) F_{zk} \} \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} T_z = & \sum_i m_i (\ddot{y}_i + g_y) x_p - \sum_i m_i (\ddot{x}_i + g_x) y_p - \left\{ \sum_i m_i (\ddot{y}_i + g_y) x_i - \sum_i m_i (\ddot{x}_i + g_x) y_i \right\} \\ & + \sum_j M_{zj} + \sum_k \{ (S_{xk} - x_p) F_{yk} - (S_{yk} - y_p) F_{xk} \} \end{aligned} \quad (3.9)$$

式(3.7), (3.8)で点Pにおけるトルクが0のとき, 点PがZMPとなる。したがって $T_x = T_y = 0$ とし, $\mathbf{P} = (x_P, y_P, 0)$ を $\mathbf{P}_{ZMP} = (x_{zmp}, y_{zmp}, 0)$ とすると,

$$x_{zmp} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) x_i - \sum_i m_i (\ddot{x}_i + g_x) z_i + \sum_j M_{y_j} + \sum_k (S_{zk} F_{zk} - S_{xk} F_{zk})}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) - \sum_k F_{zk}} \quad (3.10)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) y_i - \sum_i m_i (\ddot{y}_i + g_y) z_i - \sum_j M_{x_j} - \sum_k (S_{yk} F_{zk} - S_{zk} F_{yk})}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) - \sum_k F_{zk}} \quad (3.11)$$

のように, ZMPを求めることができる。

また床面を水平面とした場合は,

$$x_{zmp} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g) x_i - \sum_i m_i \ddot{x}_i z_i + \sum_j M_{y_j} + \sum_k (S_{zk} F_{zk} - S_{xk} F_{zk})}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g) - \sum_k F_{zk}} \quad (3.12)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g) y_i - \sum_i m_i \ddot{y}_i z_i - \sum_j M_{x_j} - \sum_k (S_{yk} F_{zk} - S_{zk} F_{yk})}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g) - \sum_k F_{zk}} \quad (3.13)$$

さらに, 外力モーメントのないときは,

$$x_{zmp} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g) x_i - \sum_i m_i \ddot{x}_i z_i}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g)} \quad (3.14)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g) y_i - \sum_i m_i \ddot{y}_i z_i}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g)} \quad (3.15)$$

となる。

次に床面に作用する力を求める。まず, 点Pに関する運動量を \mathbf{N} とすると,

$$\mathbf{N} = \sum_i m_i \frac{d}{dt} (\mathbf{r}_i - \mathbf{P}) \quad (3.16)$$

点Pにおける力を \mathbf{E} とすると,

$$\frac{d\mathbf{N}}{dt} + \sum_i m_i \mathbf{G} + \mathbf{E} - \sum_k \mathbf{F}_k = \mathbf{0} \quad (3.17)$$

式 (3.6), (3.16), (3.17) より,

$$\sum_i m_i \left(\frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} + \mathbf{G} \right) + \mathbf{E} - \sum_k \mathbf{F}_k = \mathbf{0} \quad (3.18)$$

変形後, 成分別にする。

$$E_x = - \sum_i m_i (\ddot{x}_i + g_x) + \sum_k F_{xk} \quad (3.19)$$

$$E_y = - \sum_i m_i (\ddot{y}_i + g_y) + \sum_k F_{yk} \quad (3.20)$$

$$E_z = - \sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) + \sum_k F_{zk} \quad (3.21)$$

したがって歩行系が床面と接しているためには,

$$E_z < 0 \quad (3.22)$$

である必要がある。

推進力に関しては, 前提条件(5)より任意の推進力を得ることができる。

また安定性に関しては, 前提条件(4)より歩行系を支持する接地点が3点以上であり, かつ接地点が形成する多角形の安定領域内にZMPが存在すれば, 前提条件(6)より歩行系はZ軸回りに回転することなく, かつ接地点は浮くことなく安定に歩行できる。

3.2 上体の補償軌道生成アルゴリズム

従来の手法では, 先に歩行パターンを多項式を用いて作成し, その後歩行パターンからZMPの軌道を求めていた。しかしこれでは, ZMPの軌道が安定領域内に入るように, 試行錯誤に設定歩行パターンを修正しなくてはならないという難点があった。(Fig. 3.2(a)参照)

そこで新たに, 任意の下肢の歩行パターンとZMPの軌道を, 上体の運動により補償する軌道生成アルゴリズムを考案する。(Fig. 3.2(b)参照)

これにより, 歩行パターン作成時の試行錯誤が不要になり, 作成時間が格段に短縮するばかりでなく, 任意の下肢の運動を実現でき, 環境適応能力も飛躍的に増大することになる。また, 下肢の運動とは独立してZMPの軌道を設定できるようになったので, より厳密に安定歩行が可能となる。

さらに本アルゴリズムは, 下肢に移動機能を担当させているが, 二足歩行系以外の多足歩行系やクローラなど全ての移動機能に適用できる。

以下に本アルゴリズム解析手順を説明する。

3.2.1 絶対座標系から運動座標系への変換

Fig. 3.3 のように二足歩行ロボット WL-12 を質点系としてモデル化する。このモデルについての ZMP は式 (3.10), (3.11) より,

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^5 m_i (\ddot{z}_i + g_z) x_i - \sum_{i=0}^5 m_i (\ddot{x}_i + g_x) z_i + \sum_j M_{y_j} + \sum_k (S_{zk} F_{xk} - S_{xk} F_{zk})}{\sum_{i=0}^5 m_i (\ddot{z}_i + g_z) - \sum_k F_{zk}} \quad (3.23)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^5 m_i (\ddot{z}_i + g_z) y_i - \sum_{i=0}^5 m_i (\ddot{y}_i + g_y) z_i - \sum_j M_{x_j} - \sum_k (S_{yk} F_{zk} - S_{zk} F_{yk})}{\sum_{i=0}^5 m_i (\ddot{z}_i + g_z) - \sum_k F_{zk}} \quad (3.24)$$

となる。次に上式の各変数が周期的になるようにロボットに運動座標系をとり、その系の上の変数にする。今、運動座標系 $\bar{W} (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ を設け、同様にその座標系上の変数に $\bar{\quad}$ をつける。運動座標系 \bar{W} と絶対座標系 O との距離を $\mathbf{Q} (x_q, y_q, z_q)$ とすると,

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{zmp} &= \bar{\mathbf{P}}_{zmp} + \mathbf{Q} \\ \mathbf{r}_i &= \bar{\mathbf{r}}_i + \mathbf{Q} \\ \mathbf{S}_k &= \bar{\mathbf{S}}_k + \mathbf{Q} \end{aligned} \quad (3.25)$$

の関係が成り立つので、上式を式 (3.23), (3.24) に代入する。

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^5 m_i (\ddot{\bar{z}}_i + \ddot{\bar{z}}_q + g_z) \bar{x}_i - \sum_{i=0}^5 m_i (\ddot{\bar{x}}_i + \ddot{\bar{x}}_q + g_x) (\bar{z}_i + z_q) + \sum_j M_{y_j} + \sum_k \{ (\bar{S}_{zk} + z_q) F_{xk} - \bar{S}_{xk} F_{zk} \}}{\sum_{i=0}^5 m_i (\ddot{\bar{z}}_i + \ddot{\bar{z}}_q + g_z) - \sum_k F_{zk}} \quad (3.26)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^5 m_i (\ddot{\bar{z}}_i + \ddot{\bar{z}}_q + g_z) \bar{y}_i - \sum_{i=0}^5 m_i (\ddot{\bar{y}}_i + \ddot{\bar{y}}_q + g_y) (\bar{z}_i + z_q) - \sum_j M_{x_j} - \sum_k \{ \bar{S}_{yk} F_{zk} - (S_{zk} - z_q) F_{yk} \}}{\sum_{i=0}^5 m_i (\ddot{\bar{z}}_i + \ddot{\bar{z}}_q + g_z) - \sum_k F_{zk}} \quad (3.27)$$

外力モーメントがなく、水平歩行の場合は,

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^5 m_i (\ddot{\bar{z}}_i + \ddot{\bar{z}}_q + g) \bar{x}_i - \sum_{i=0}^5 m_i (\ddot{\bar{x}}_i + \ddot{\bar{x}}_q) (\bar{z}_i + z_q)}{\sum_{i=0}^5 m_i (\ddot{\bar{z}}_i + \ddot{\bar{z}}_q + g)} \quad (3.28)$$

$$\ddot{\bar{y}}_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^5 m_i (\ddot{\bar{z}}_i + \ddot{z}_q + g) y_i - \sum_{i=0}^5 m_i (\ddot{\bar{y}}_i + \ddot{y}_q) (\bar{z}_i + z_q)}{\sum_{i=0}^5 m_i (\bar{z}_i + z_q)} \quad (3.29)$$

となる。

3.2.2 上体部歩行パターンの線形解法

外力のない水平定常歩行の解析が、補償軌道生成アルゴリズムの中心部分になるので、はじめにこの場合について述べる。

式 (3.28), (3.29) で、水平定常歩行なので、

$$\ddot{\mathbf{Q}} = 0 \quad (3.30)$$

とする。さらに上体部の項を左辺に、その他の項を右辺におくように変形する。右辺はまとめてそれぞれ $\Phi(t)$, $\Psi(t)$ とおく。

$$\begin{aligned} & \ddot{\bar{z}}_0 \bar{x}_{zmp} - (\ddot{\bar{z}}_0 + g) \bar{x}_0 + (\bar{z}_0 + z_q) \ddot{\bar{x}}_0 \\ & = \left[-\sum_{i=1}^5 m_i (\ddot{\bar{z}}_i + g) \bar{x}_{zmp} + \sum_{i=1}^5 m_i (\ddot{\bar{z}}_i + g) \bar{x}_i - \sum_{i=1}^5 m_i (\bar{z}_i + z_q) \ddot{\bar{x}}_i - m_0 g \bar{x}_{zmp} \right] / m_0 \\ & \equiv \Phi(t) \end{aligned} \quad (3.31)$$

$$\begin{aligned} & \ddot{\bar{z}}_0 \bar{y}_{zmp} - (\ddot{\bar{z}}_0 + g) \bar{y}_0 + (\bar{z}_0 + z_q) \ddot{\bar{y}}_0 \\ & = \left[-\sum_{i=1}^5 m_i (\ddot{\bar{z}}_i + g) \bar{y}_{zmp} + \sum_{i=1}^5 m_i (\ddot{\bar{z}}_i + g) \bar{y}_i - \sum_{i=1}^5 m_i (\bar{z}_i + z_q) \ddot{\bar{y}}_i - m_0 g \bar{y}_{zmp} \right] / m_0 \\ & \equiv \Psi(t) \end{aligned} \quad (3.32)$$

上2式で、

$$z_q = \text{Const.} \quad (3.33)$$

とする。しかしまだ式 (3.31), (3.32) は、上体部の変数項について非線形であり、お互い干渉がある。そこで上体部負荷は Z 軸方向には運動しないとして、線形化と同時に非干渉化する。すなわち、

$$\begin{aligned} \bar{z}_0 &= \text{Const} \\ \ddot{\bar{z}}_0 &= 0 \end{aligned} \quad (3.34)$$

とすると式 (3.31), (3.32) は、

$$(\bar{z}_0 + z_q) \ddot{\bar{x}}_0 - g \bar{x}_0 = \Phi(t) \quad (3.35)$$

$$(\bar{z}_0 + z_q) \ddot{\bar{y}}_0 - g \bar{y}_0 = \Psi(t) \quad (3.36)$$

となる。 $\Phi(t)$, $\Psi(t)$ の中の項は全てあらかじめ設定歩行パターンとして与えるものなので既知である。また定常歩行なので各項は全て周期関数となるので、 $\Phi(t)$, $\Psi(t)$ も既知の周期関数となる。これは $\Phi(t)$ ($\Psi(t)$) がフーリエ級数展開できることを意味している。そこで $\Phi(t)$ をフーリエ級数展開すると、

$$\Phi(t) = \frac{a_0}{2} + \frac{1}{2} \sum_{k=-N}^N (a_k - j b_k) e^{j 2 \pi k f_0 t} \quad (3.37)$$

f_0 : 基本周波数

一方、左辺の \bar{x}_0 も周期関数解となるので、フーリエ級数展開し、さらに2回微分する。

$$\bar{x}_0(t) = \frac{A_0}{2} + \frac{1}{2} \sum_{k=-N}^N (A_k - j B_k) e^{j 2 \pi k f_0 t} \quad (3.38)$$

$$\ddot{\bar{x}}_0(t) = \sum_{k=-N}^N \frac{(2 \pi k f_0)^2}{2} (-A_k + j B_k) e^{j 2 \pi k f_0 t} \quad (3.39)$$

式(3.37), (3.38), (3.39)を式(3.35)に代入する。

$$\begin{aligned} & -\frac{A_0}{2} g + \sum_{k=-N}^N \left(-\frac{g}{2} - \frac{(\bar{z}_0 + z_q)(2 \pi k f_0)^2}{2} \right) (A_k - j B_k) e^{j 2 \pi k f_0 t} \\ & = \frac{a_0}{2} + \frac{1}{2} \sum_{k=-N}^N (a_k - j b_k) e^{j 2 \pi k f_0 t} \end{aligned} \quad (3.40)$$

すると両辺を係数比較することによって、

$$\begin{aligned} k = 0 \text{ のとき, } \quad A_0 &= -\frac{a_0}{g} \\ k \neq 0 \text{ のとき, } \quad A_k &= \frac{a_k}{-g - (\bar{z}_0 + z_q)(2 \pi k f_0)^2} \\ B_k &= \frac{b_k}{-g - (\bar{z}_0 + z_q)(2 \pi k f_0)^2} \end{aligned} \quad (3.41)$$

のように A_k および B_k が求まる。したがってこれらを逆フーリエ展開すれば、上体部のパターン $\bar{x}_0(t)$ を導くことができる。また同様の手法を用いて、 $\Psi(t)$ から $y(t)$ を求めることができる。

3.2.3 上体部歩行パターン非線形解法

上体部負荷 m_0 が、Z軸方向に運動する場合は、式(3.31)，(3.32)より、

$$\ddot{\bar{z}}_0 \bar{x}_{zmp} - (\ddot{\bar{z}}_0 + g) \bar{x}_0 + \ddot{\bar{x}}_0 (\bar{z}_0 + z_q) = \Phi(t) \quad (3.42)$$

$$\ddot{\bar{z}}_0 \bar{y}_{zmp} - (\ddot{\bar{z}}_0 + g) \bar{y}_0 + \ddot{\bar{y}}_0 (\bar{z}_0 + z_q) = \Psi(t) \quad (3.43)$$

$$\begin{aligned} \bar{z}_0 &= \bar{z}_0(t, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) \\ \ddot{\bar{z}}_0 &= \ddot{\bar{z}}_0(t, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) \end{aligned} \quad (3.44)$$

のように非線形干渉2階微分方程式となる。そこでまず、式(3.35)，(3.36)の線形非干渉2階微分方程式を用い、上体部の周期解を求める。この周期解を式(3.28)，(3.29)に代入してZMPを求め、これと最初に設定したZMPとの偏差を求める。この偏差がある程度の許容値より大きい場合、設定ZMPとこの偏差との和をZMPとして式(3.35)，(3.36)に代入し、もう一度上体部の周期解を求める。以上の過程をくり返し計算し、ZMPの偏差が許容値内になった時の上体部周期解が、歩行パターンとなる。(Fig.3.4参照)

また、以上の手法は、

$$\mathbf{Q} \approx \mathbf{0} \quad (3.45)$$

の場合にも適用可能である。

3.2.4 完全歩行への拡張

実際のロボットの歩行は、直立静止状態から歩き始め、定常歩行に入り、再び直立状態にもどる完全歩行を行わなければならない。そこで本年度考案した手法をもとに考えてみると、歩き始め、定常歩行、停止をひとつの周期とみなせば、上体の完全歩行パターンを求めることができる。

3.2.5 既知の外力を受けた場合

外力もそれが既知であれば式(3.26)，(3.27)を用い、同様の手法により上体部の歩行パターンを求めることができる。ただし、完全歩行内で外力も周期関数である必要がある。

また、具体的には、荷物を持ちながらの歩行やドアの開閉をしながらの歩行で、外力パターンがわかっているものに、適用できる手法である。

3.3 歩行パターン作成プログラム

歩行パターン作成にあたっては、Fig.3.5に示すフローチャートの手順を基に進める。

まず最初に、足底接地状態を検討し、足首部位置パターンを作成する。また腰部位置パターンも同時に作成する。

この2つのパターンが決まれば、幾何学的に膝部位置パターンが求まるので、これにより下

肢の幾何学的関係を満足すれば、下肢部歩行パターンができる。

次に、下肢部歩行パターンから足底接地面が形成するZMP安定領域が求められ、ZMPパターンを作成する。

このようにして下肢部歩行パターンとZMPパターンの作成後、上体補償軌道生成アルゴリズムより、上体部歩行パターンを算出する。

最後に角度パターンを求め、アクチュエータの角度、角速度が、その最大可動角、最大角速度以内であれば、設定歩行パターンが完成する。

3.3.1 歩行パターンの作成方法

設定歩行パターンが完成するまでの過程で必要な、下肢部歩行パターン、ZMPパターンおよび上体部歩行パターンの作成方法を以下に述べる。

(1) 下肢部歩行パターン

下肢部歩行パターンは、片脚のパターンとそれを1/2周期ずらしたパターンを合わせたものと考えることができるので、片脚の運動に注目して、下肢部歩行パターンを作成する。

路面を歩行している下肢の定常歩行をFig.3.6に示す。これを見ると下肢の歩行はHCf, TCf, HDh, TDhの時間的变化によっていろいろな歩容をとることがわかる。そこでこれらの点をもとに1歩行周期をA相からD相まで4分割し、それぞれについて歩行パターンを作成することにした。

実際のパターン作成にあたっては、上体補償軌道生成アルゴリズムを考慮し、下肢の運動を直交かつ運動座標系で考える。(Fig.3.7参照)

最初に腰部の運動について考える。上体のないロボットの場合は、3次元倒立振り子モデルを用いて位相面解析を行い、パラメータを考察することで、平行型立脚切換を実現していた。しかし、この軌道だと、切換中Z軸方向に速度反転があり衝撃力を起こしていた。そこでここでは、腰部を等速直線運動させ、運動座標系を腰部に一致させることにした。足首部パターンは主として多項式を用い、床面となめらかに接触するように作成する。膝部位置パターンは腰部と足首部から幾何学的に求めることができる。(Table3.1参照)

また、パターン作成時に必要なパラメータは、

- (a) 1歩行周期の全相数
- (b) 歩幅
- (c) B相の全相数に対する割合
- (d) C相の全相数に対する割合
- (e) D相の全相数に対する割合
- (f) TDh時の足底面の傾き θ
- (g) HCf時の足底面の傾き θ
- (h) 歩行中の腰の高さ
- (i) 歩行速度

とした。その他のパラメータは全て定値とした。

これらを決めることにより、片脚のパターンを求め、下肢歩行パターンを作成する。

また、歩き始めと歩き終りの過渡歩行パターンは、絶対座標系で主に6次関数を用いて作成する。その際、腰部運動座標系も6次関数を用いて歩行速度を与える。

(2) ZMPパターン

ZMPパターンは、こちらが任意に決定できるようになった。そこでより細密なパターンを作成できるように作成者がマニュアルでパターンの基本点列を与え、それを直線補間してZMPパターンを作成することにした。Fig. 3.8にその様子を示す。

(3) 上体部歩行パターン

下肢部歩行パターンおよびZMPパターンから、上体補償軌道生成アルゴリズムを用いて、上体部歩行パターンを算出する。その際、パラメータとして1相間の時間と、上体部の基準長さを決定する。

また、フーリエ展開のサンプル点は4歩の完全歩行で512点とした。

3.3.2 歩行パターン作成例

Fig. 3.9に歩行速度一定で歩幅の異なる歩行パターンを、Fig. 3.10に歩幅一定で歩行速度の異なる歩行パターンを示す。両図とも4歩の完全歩行のパターンである。

Fig. 3.9では、歩幅が大きくなるにつれて上体のピッチの振れが大きくなっていることがわかる。またFig. 3.10では、歩行速度が速くなるにつれて、ダイナミックスの効果が現れ、上体の前頭面および矢状面の振れが小さくなっていることが確認できる。

またFig. 3.11にZMPと重心の軌跡を示す。重心の軌跡がZMPの軌跡の内側を通っていることがわかる。これにより歩幅30 (cm)、1歩2.6 (秒)の歩行が動歩行であると言える。

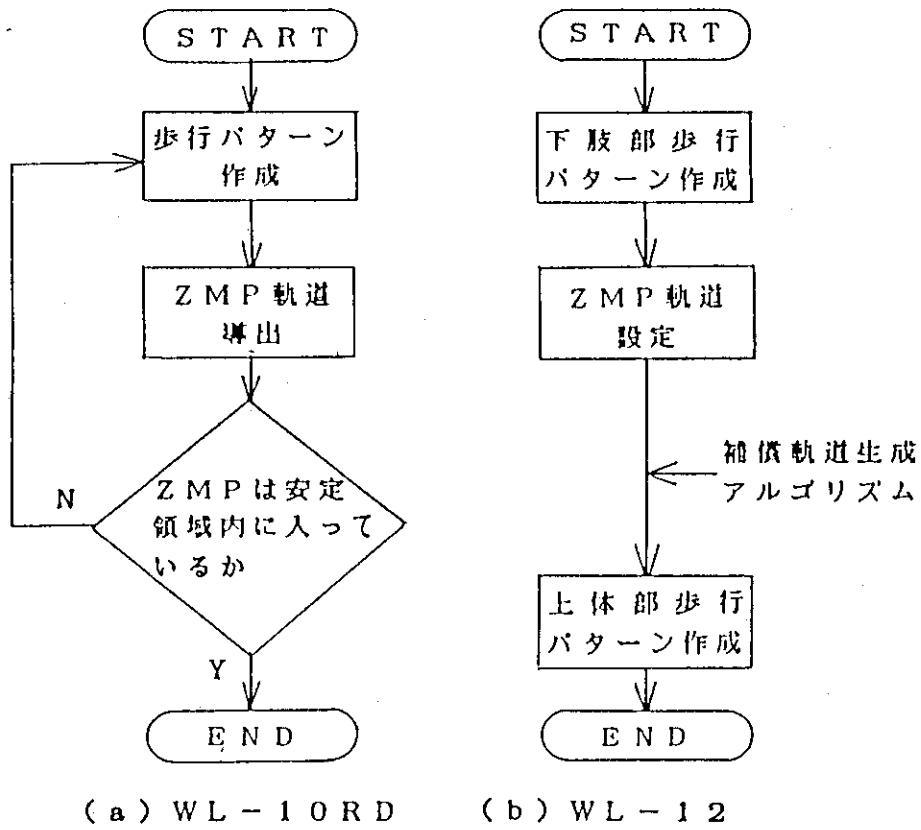


Fig. 3.2 Flow chart of creating a walking pattern

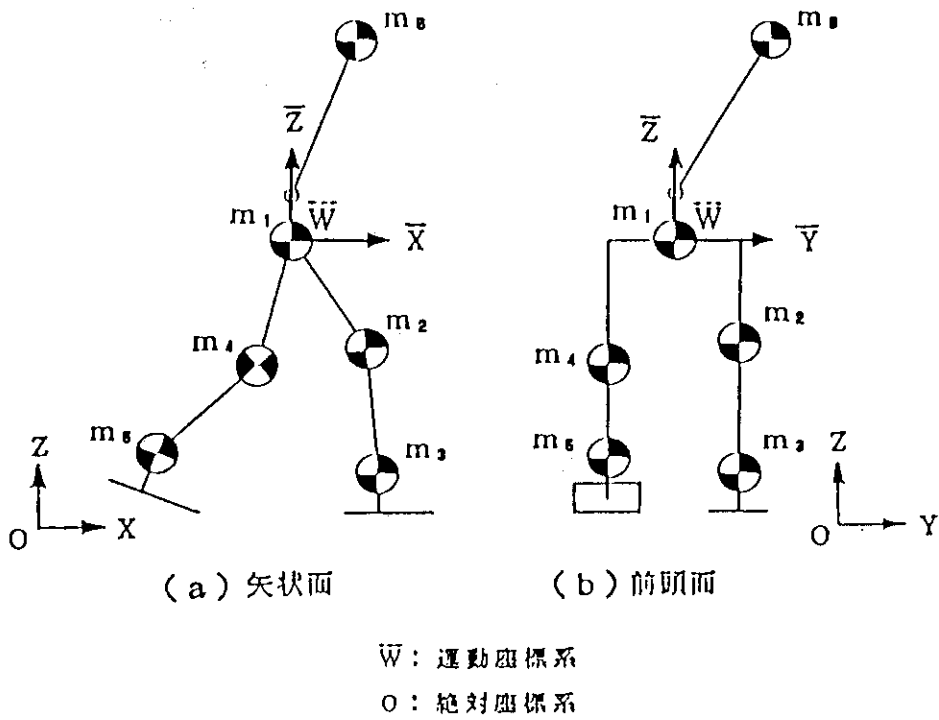


Fig. 3.3 The model of biped walking robot (WL-12)

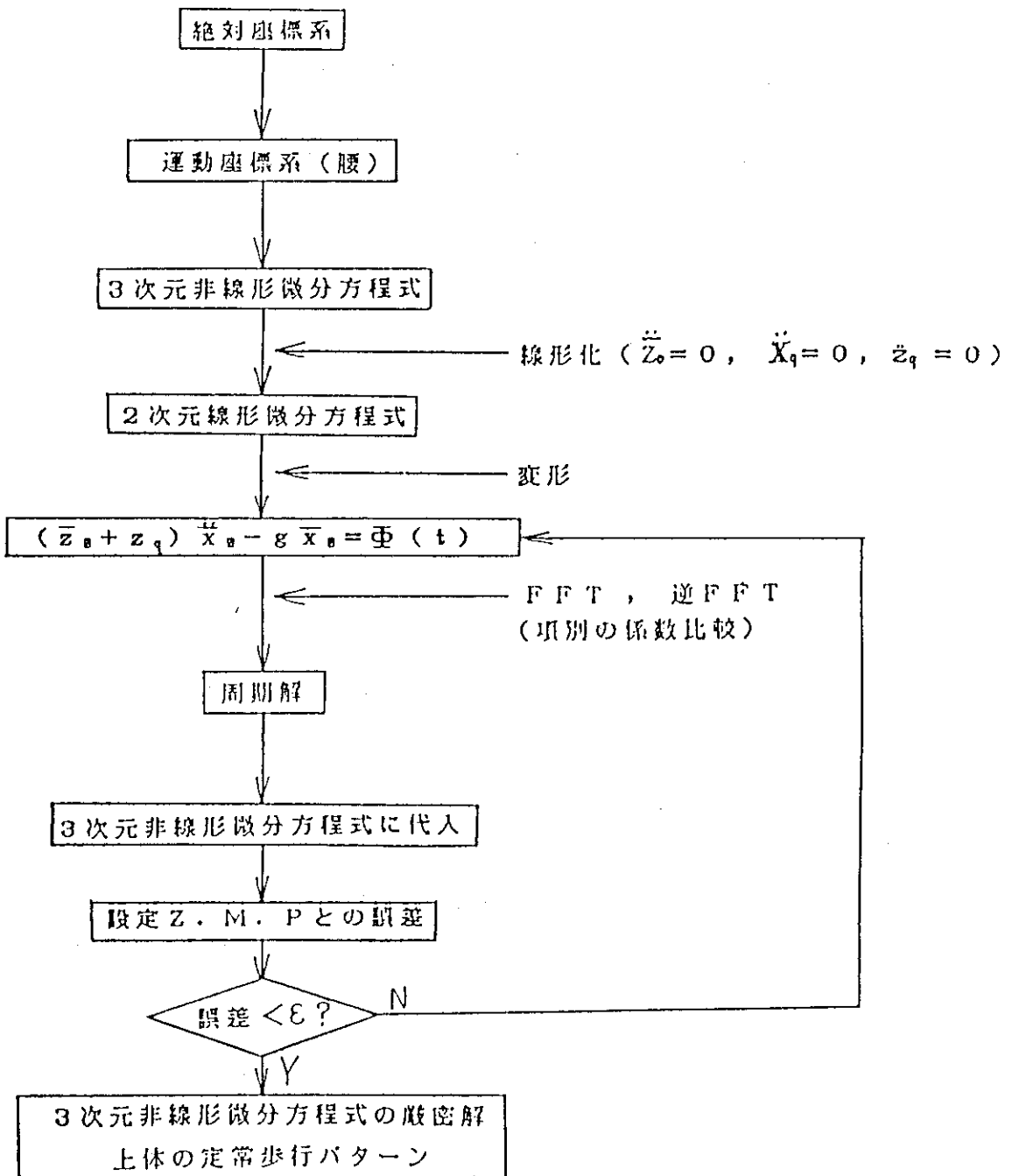


Fig. 3.4 Control of dynamic biped locomotion compensating with a trunk

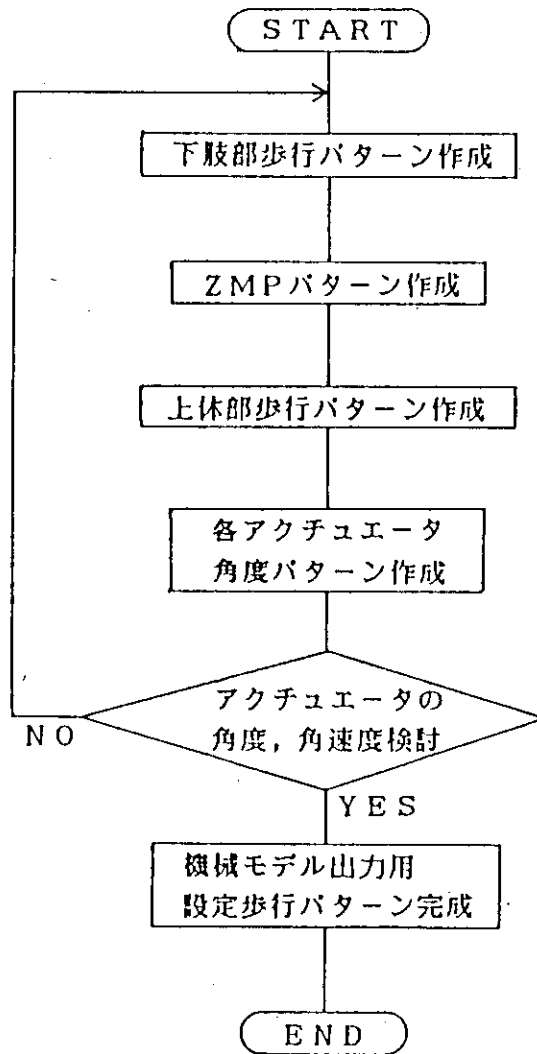
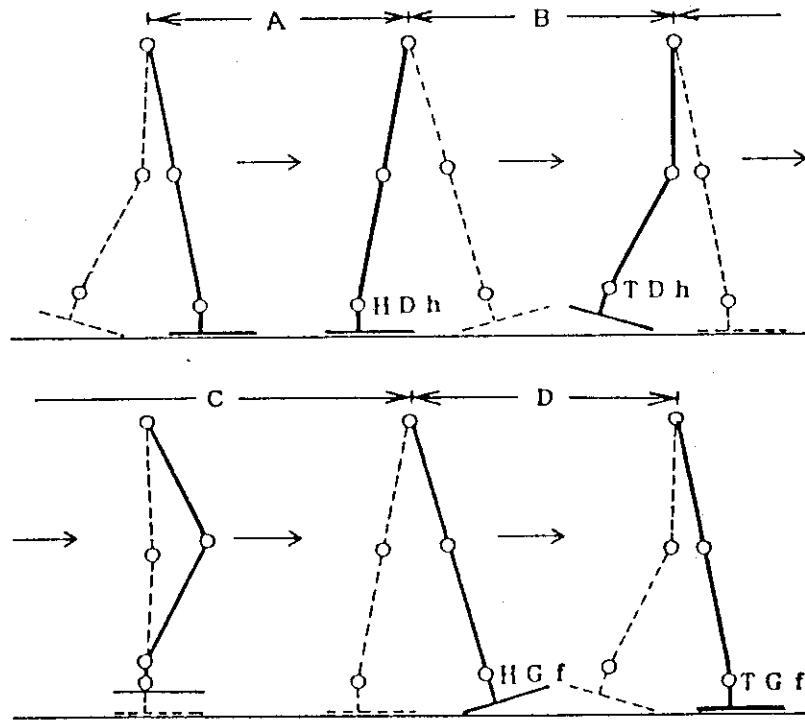


Fig. 3.5 Flow chart of creating a walking pattern



HDh: 後脚かかと離れる HGf: 前脚かかと接地
 TDh: 後脚つまさき離れる TGf: 前脚つまさき接地

Fig. 3.6 Phase in one walking cycle

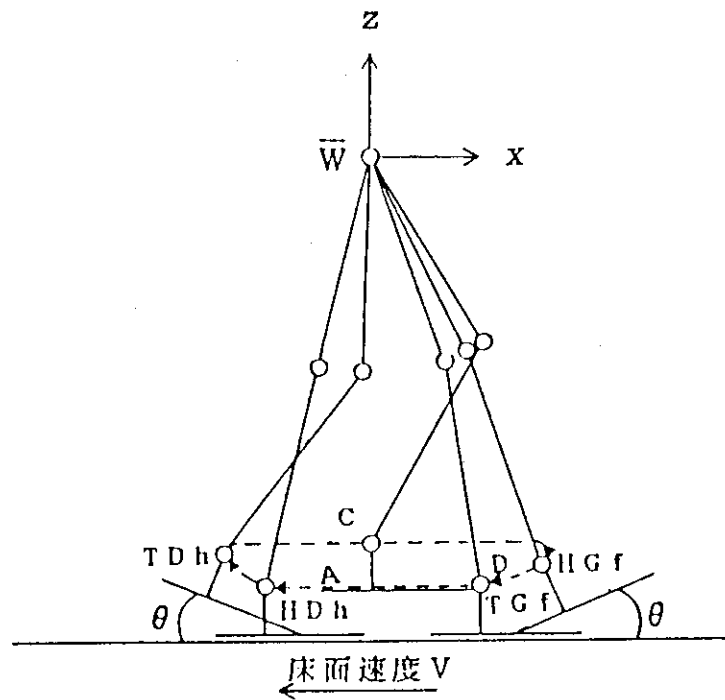
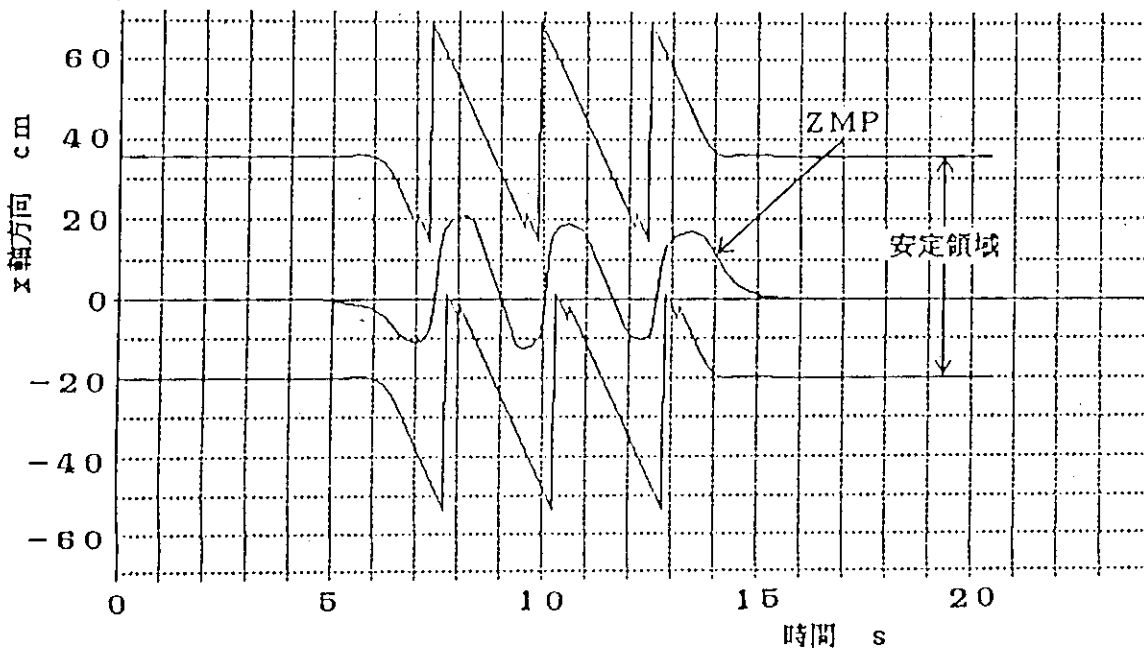
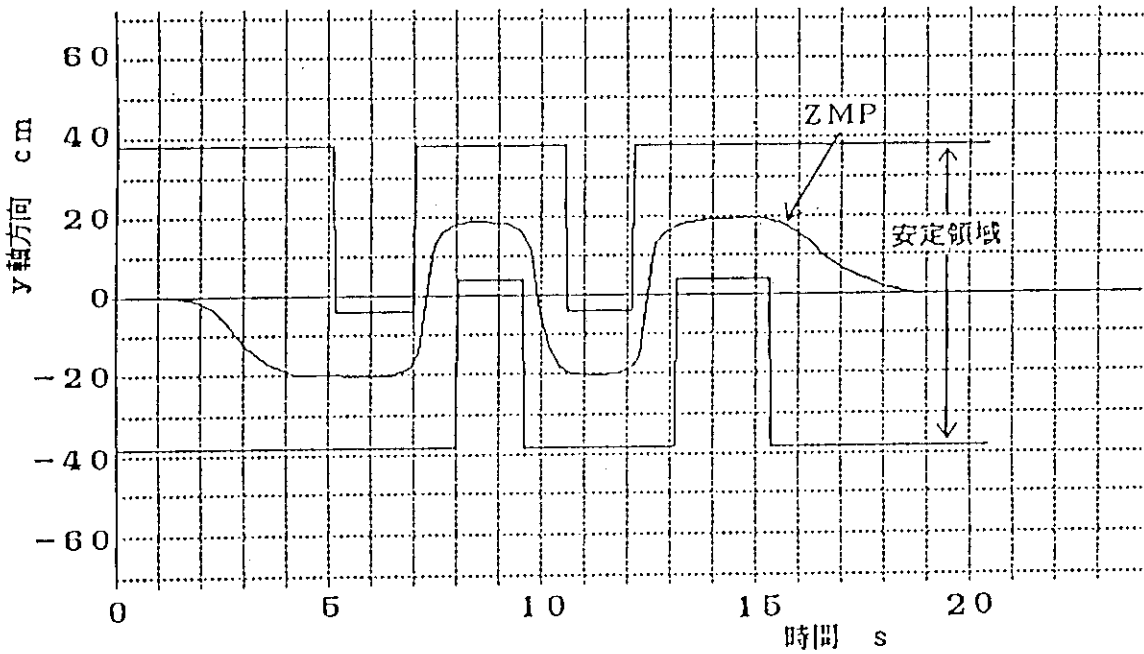


Fig. 3.7 Lower-limbs motion on the moving coordinate \bar{W}

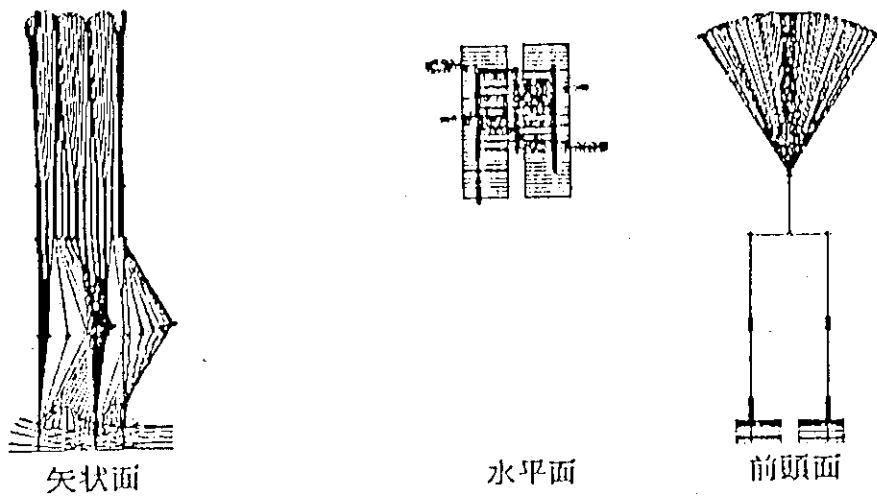


(a) x軸方向領域内のZMP

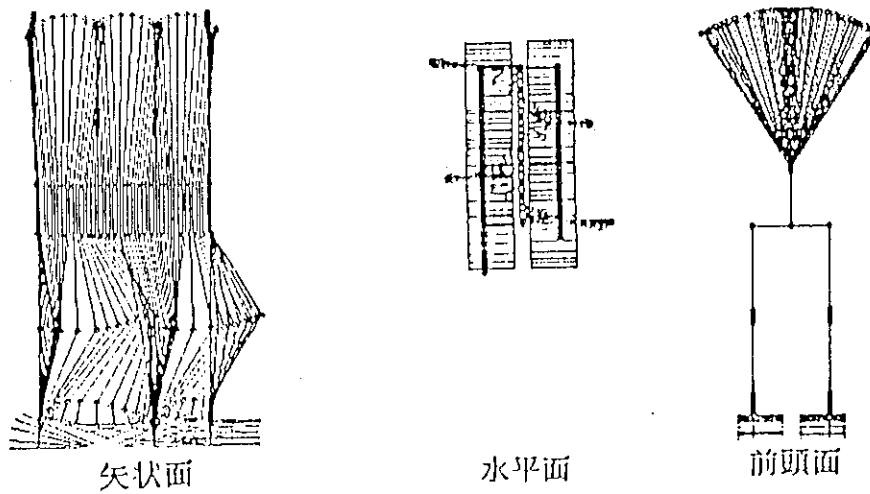


(b) y軸方向領域内のZMP

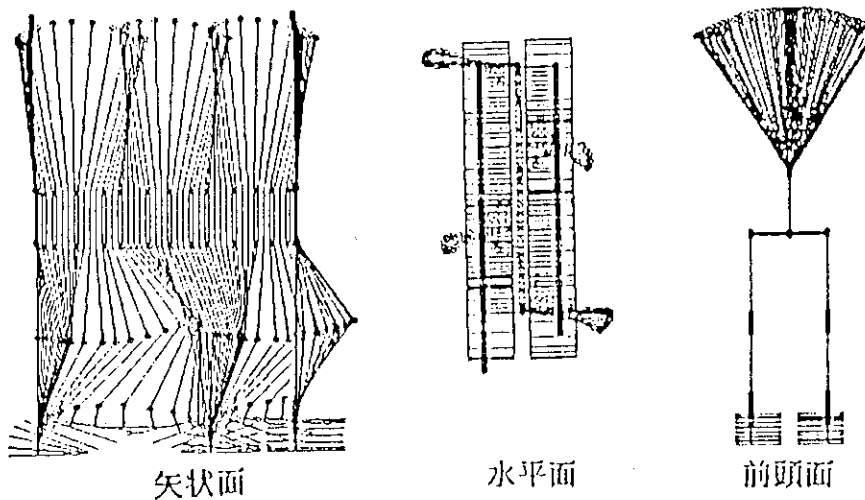
Fig. 3.8 Trajectory of ZMP



(a) 步幅10 cm 1步1.9秒

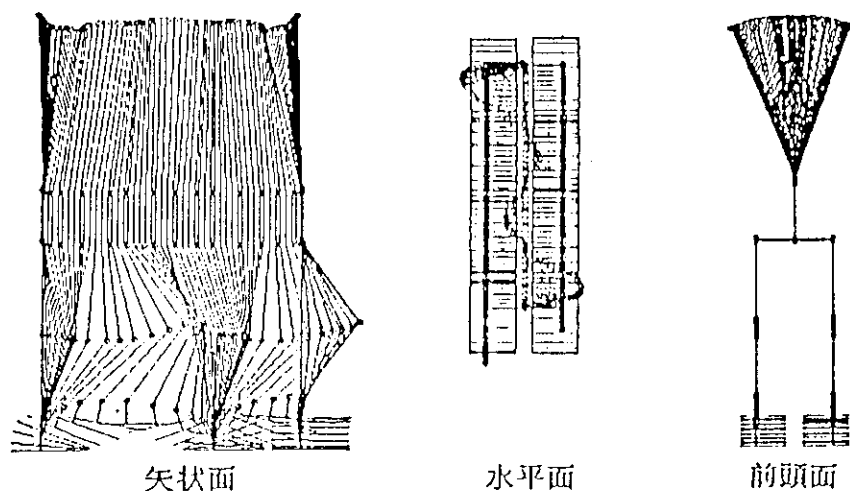


(b) 步幅20 cm 1步1.9秒

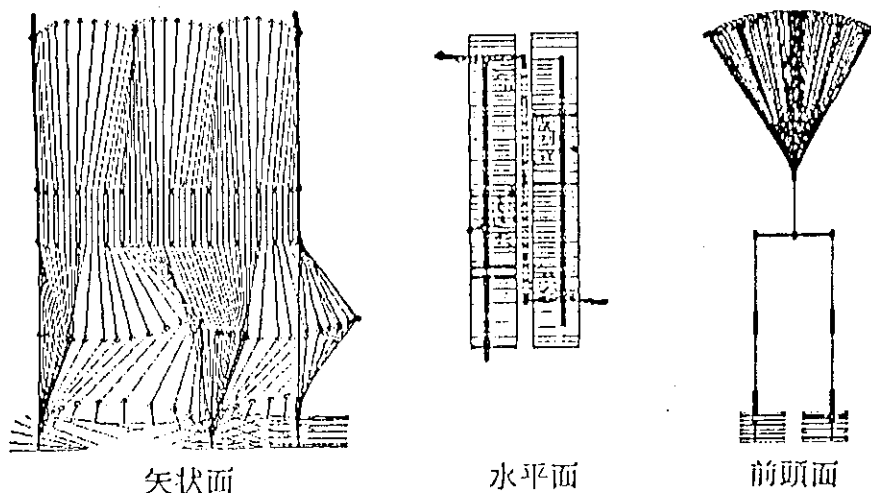


(c) 步幅30 cm 1步1.9秒

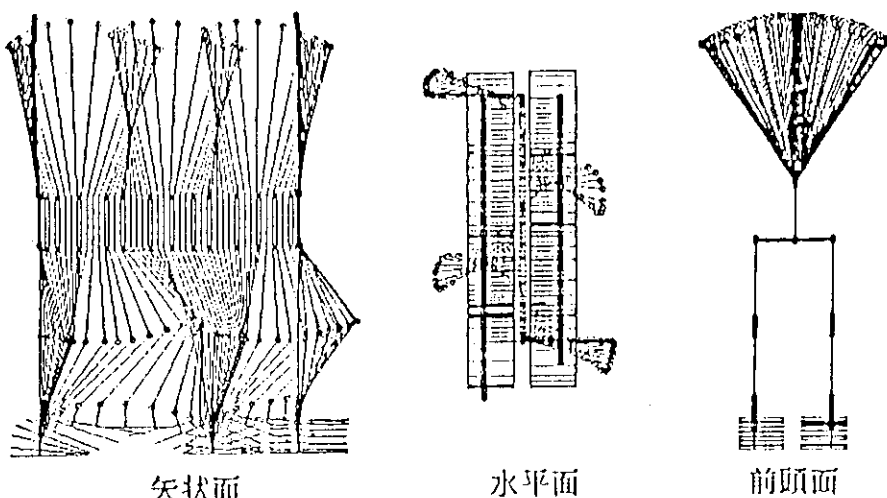
Fig. 3.9 Simulation of biped locomotion (uniform velocity)



(a) 步幅30cm 1步0.65秒



(b) 步幅30cm 1步1.3秒



(c) 步幅30cm 1步2.6秒

Fig. 3.10 Simulation of biped locomotion (uniform step length)

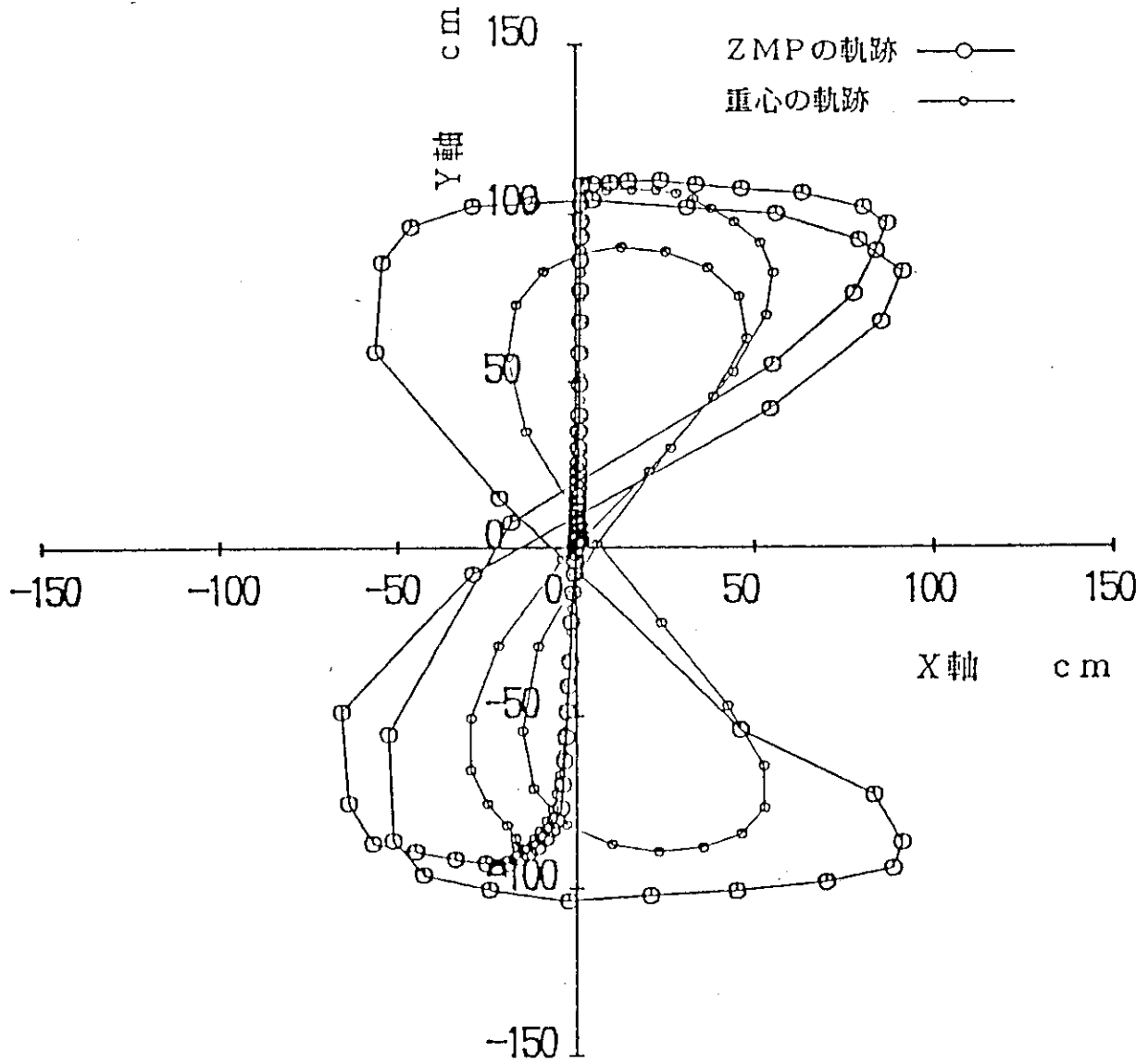


Fig. 3.11 Trajectories of ZMP and center of gravity

4. 歩 行 実 験

4.1 実験目的

新たに開発した上体機構部を有する2足歩行ロボットWL-12を用いて、上体補償型動歩行を目指し、補償軌道生成アルゴリズムの有効性を確認する。また同時に機械モデルの基本性能を検証する。

4.2 実験方法

最初に、歩幅を10 [cm]、20 [cm]、30 [cm]と変えた場合の下肢の歩行パターンをそれぞれ作成する。次にZMPの軌道をマニュアルで安定領域内に入るように設定する。下肢の歩行パターンとZMP軌道から、補償軌道生成アルゴリズムを用いて、歩行速度の異なる場合の上体部の歩行パターンを算出する。下肢の歩行パターンと上体部の歩行パターンを合わせて、設定歩行パターンとする。以下Fig. 4.1に示すフローチャートに従って歩行実験を行う。最後にデータ収集を行い歩行解析する。

4.3 実験結果

歩行実験を行った結果、歩幅20 [cm]までで1歩1.9 [秒]、歩幅30 [cm]で1歩2.6 [秒]の上体補償型動歩行を実現した。

歩幅30 [cm]で1歩2.6 [秒]のときの応答データをFig. 4.2からFig. 4.10までに示す。

また歩幅と歩行速度を変えた場合の上体の軌道と位相面をFig. 4.11からFig. 4.14までに示す。歩幅30 [cm]の歩行の設定ZMPは全てFig. 3.8のものを使用した。

4.4 考察

(1) 歩容に関する問題

Fig. 4.2からFig. 4.5を見ると股部、膝部、足首部においてH.C直後とT.D直前に鋭い角度変化がある。これは歩行パターン作成の際、始めに直交座標系で、股と足首およびその姿勢をなめらかに作り、その後角度パターンに直したために表われたものと考えられる。改良点としては、腰や足底板を利用することにより、鋭い角度変化を小さくすることができると考える。

次にFig. 4.6を見ると同様にH.C直後とT.D直前に大きな速度変化が存在する。これは遊脚期に足底板を床から10 [cm]も上げているためである。したがって膝部をできるだけ曲げないような歩容を考えていく必要がある。さらに遊脚期を長くすることも速度変化をやわらげる一因となるだろう。

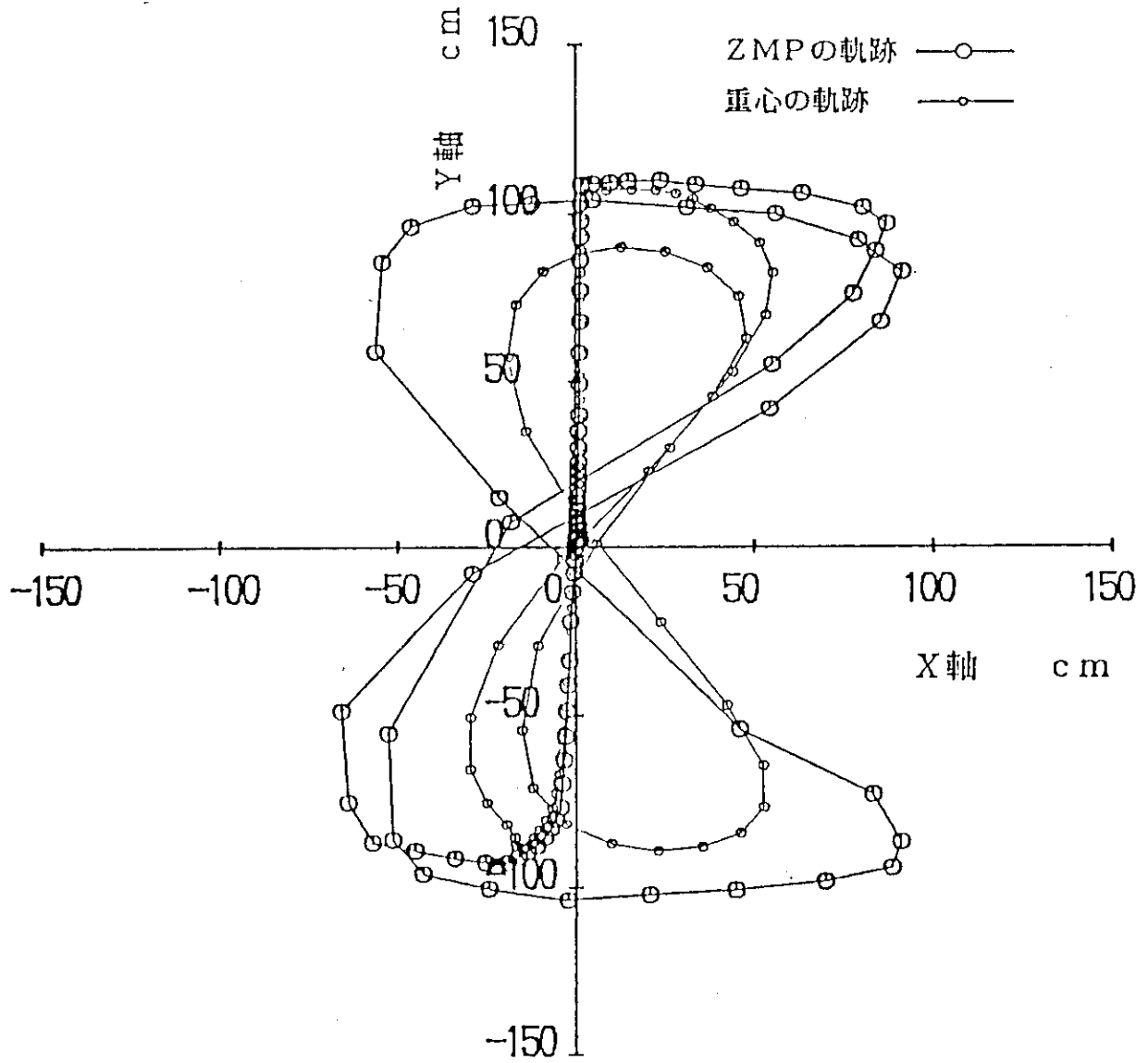


Fig. 3.11 Trajectories of ZMP and center of gravity

4. 歩 行 実 験

4.1 実験目的

新たに開発した上体機構部を有する2足歩行ロボットWL-12を用いて、上体補償型動歩行を目指し、補償軌道生成アルゴリズムの有効性を確認する。また同時に機械モデルの基本性能を検証する。

4.2 実験方法

最初に、歩幅を10 [cm]、20 [cm]、30 [cm]と変えた場合の下肢の歩行パターンをそれぞれ作成する。次にZMPの軌道をマニュアルで安定領域内に入るように設定する。下肢の歩行パターンとZMP軌道から、補償軌道生成アルゴリズムを用いて、歩行速度の異なる場合の上体部の歩行パターンを算出する。下肢の歩行パターンと上体部の歩行パターンを合わせて、設定歩行パターンとする。以下Fig.4.1に示すフローチャートに従って歩行実験を行う。最後にデータ収集を行い歩行解析する。

4.3 実験結果

歩行実験を行った結果、歩幅20 [cm]までで1歩1.9 [秒]、歩幅30 [cm]で1歩2.6 [秒]の上体補償型動歩行を実現した。

歩幅30 [cm]で1歩2.6 [秒]のときの応答データをFig.4.2からFig.4.10までに示す。

また歩幅と歩行速度を変えた場合の上体の軌道と位相面をFig.4.11からFig.4.14までに示す。歩幅30 [cm]の歩行の設定ZMPは全てFig.3.8のものを使用した。

4.4 考察

(1) 歩容に関する問題

Fig.4.2からFig.4.5を見ると股部、膝部、足首部においてH.C直後とT.D直前に鋭い角度変化がある。これは歩行パターン作成の際、始めに直交座標系で、股と足首およびその姿勢をなめらかに作り、その後角度パターンに直したために表われたものと考えられる。改良点としては、腰や足底板を利用することにより、鋭い角度変化を小さくすることができる。と考える。

次にFig.4.6を見ると同様にH.C直後とT.D直前に大きな速度変化が存在する。これは遊脚期に足底板を床から10 [cm]も上げているためである。したがって膝部をできるだけ曲げないような歩容を考えていく必要がある。さらに遊脚期を長くすることも速度変化をやわらげる一因となるだろう。

また Fig. 4.7 を見ると立脚中期に大きなトルク変動があるが、これも膝を伸ばすことによって小さくすることが可能であると考ええる。

(2) 制御系に関する問題

本研究は設定歩行パターンによるプログラム制御を行っているが、高速な歩行をさせていくと立脚切換中に足底面がずれるということが起った。これは、ロボットが閉リンク状態になったときに生じる過負荷や足底面が床面に接地するときに生じる衝撃力が主な原因である。そこでより高速歩行させるためには、従来より実績のあるトルク-位置制御系を歩容制御に採用すべきであると考ええる。

(3) Z軸回りのひねりに関する問題

3章1節では、歩行路の接地状況について前提条件(5)より、

(5) 床面での並進 (XおよびY軸方向) に対する摩擦力は十分に大きい

という仮定を設けているが、実際には歩行速度を上げていくとZ軸回りのモーメントが大きくなり、歩行に悪影響を及ぼすことがある。このモーメントは、遊脚や上体を振る際に起る慣性力が主な原因と思われる。

この現象を押えるためには相反するモーメントを与えればよいが、それによって他の運動系に悪影響が出ないように偶力モーメントを与えるのが適当と考える。

そこで動学的に考察してみる。今、上体部負荷 m_0 を2分して偶力を発生させるように運動させる。(Fig. 4.15参照)

式(3.3)より、

$$\begin{aligned} & \frac{m_0}{2} (r_0 + r_0' - P) \times \left\{ \frac{d^2(r_0 + r_0')}{dt^2} + G - \frac{d^2 P}{dt^2} \right\} \\ & + \frac{m_0}{2} (r_0 - r_0' - P) \times \left\{ \frac{d^2(r_0 - r_0')}{dt^2} + G - \frac{d^2 P}{dt^2} \right\} \\ & + \sum_{i=1}^5 m_i (r_i - P) \times \left\{ \frac{d^2 r_i}{dt^2} + G - \frac{d^2 P}{dt^2} \right\} \\ & + T - \sum_j M_j - \sum_k (S_k - P) \times F_k = 0 \\ \Leftrightarrow & m_0 r_0' \times \ddot{r}_0' + \sum_{i=0}^5 m_i (r_i - P) \times \left\{ \frac{d^2 r_i}{dt^2} + G_T - \frac{d^2 P}{dt^2} \right\} \\ & + T - \sum_j M_j - \sum_k (S_k - P) \times F_k = 0 \end{aligned}$$

で偶力を作り出すことができる。

上体の補償生成アルゴリズムを用いるときは m_i を2分しない上体で考え、後に式(3.9)から偶力モーメントを求めればよい。

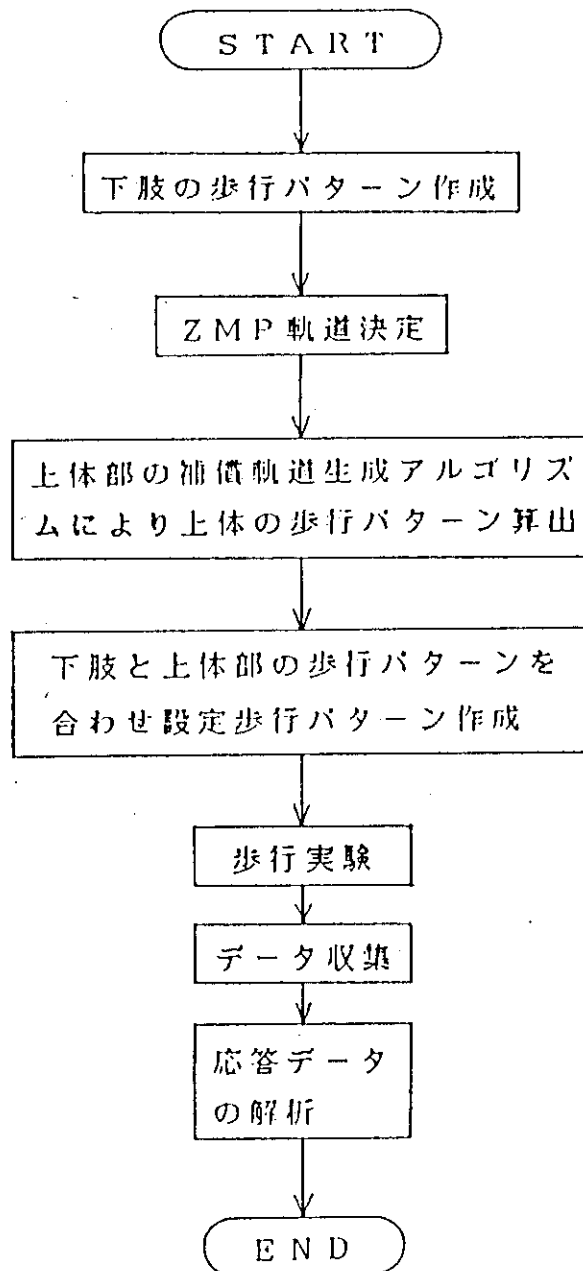
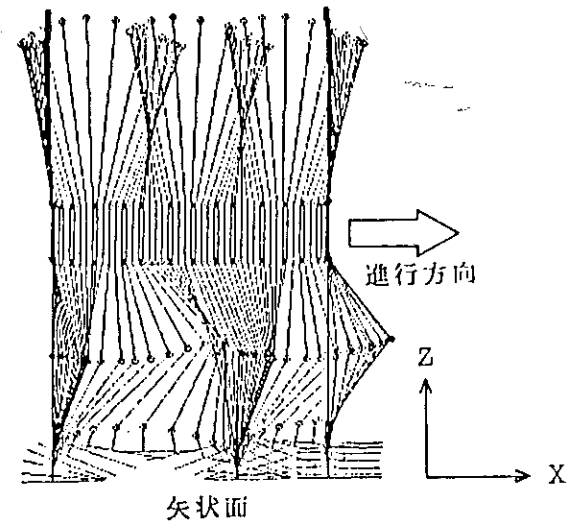
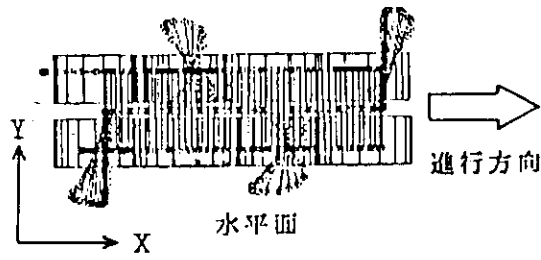
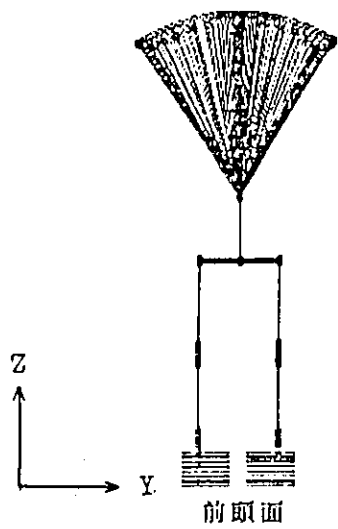
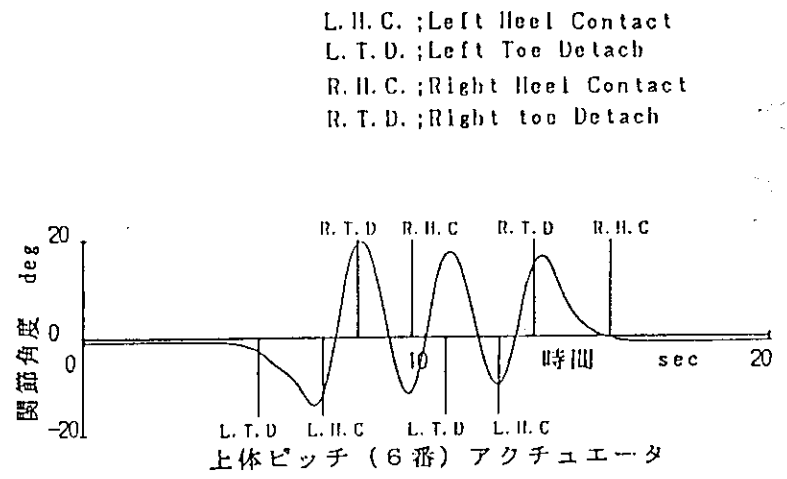
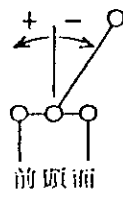
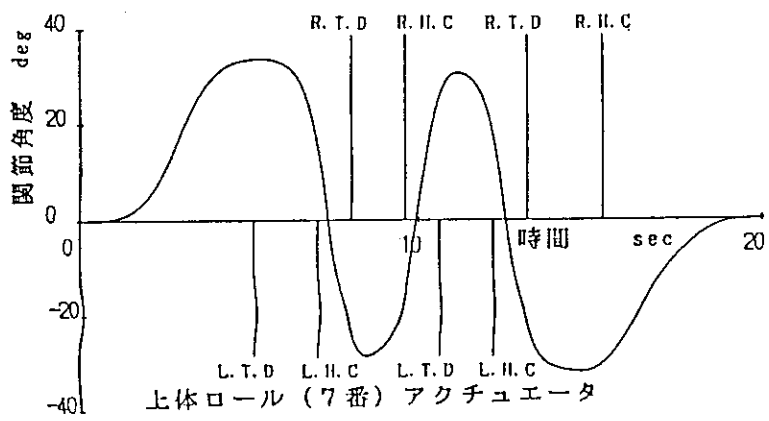


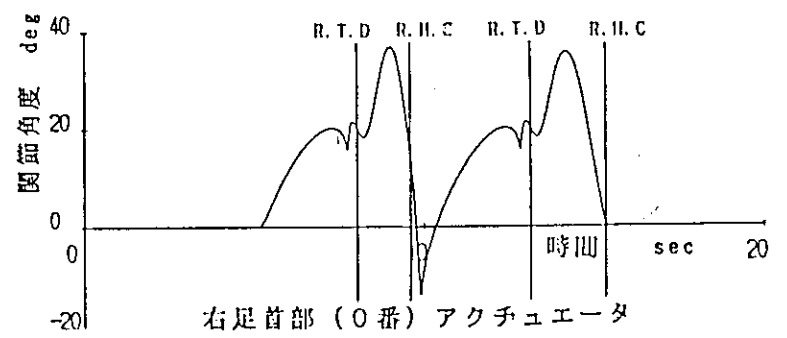
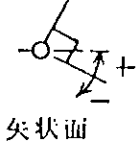
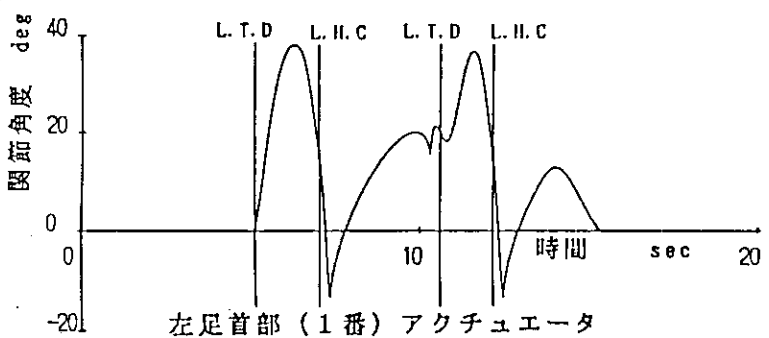
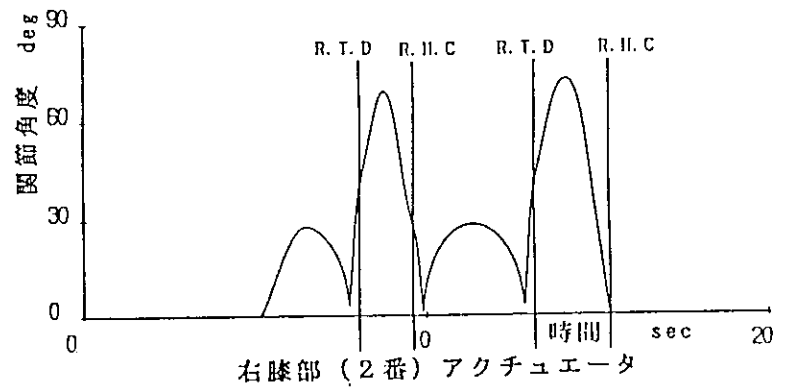
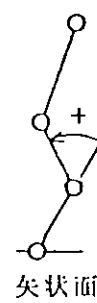
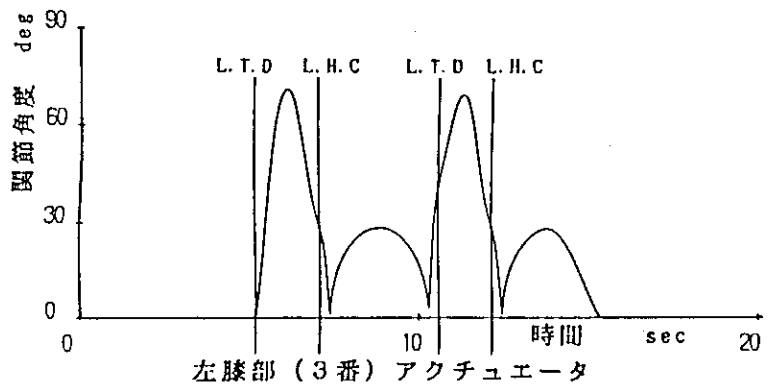
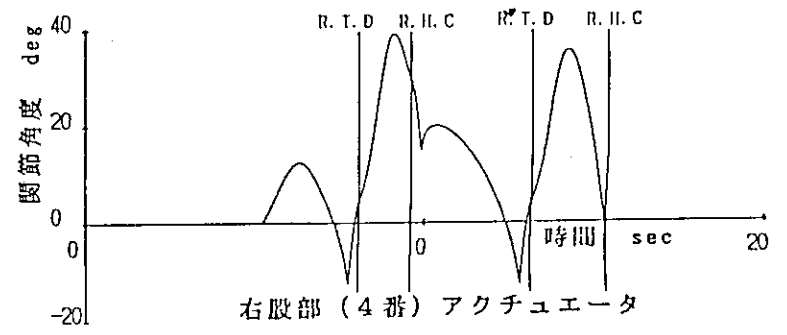
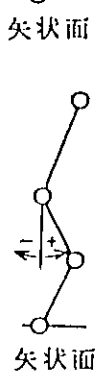
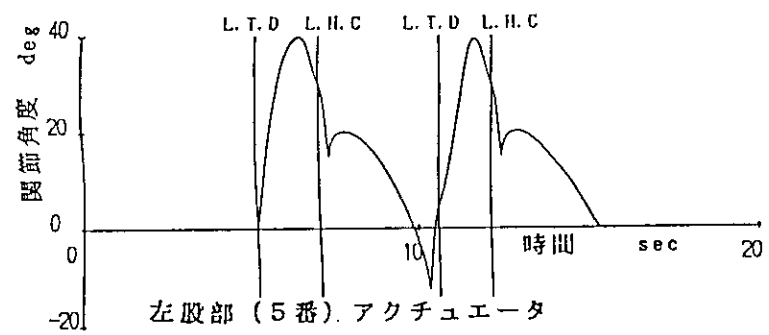
Fig. 4.1 Flow chart of experiment on biped locomotion



歩行パターン3次元グラフィック

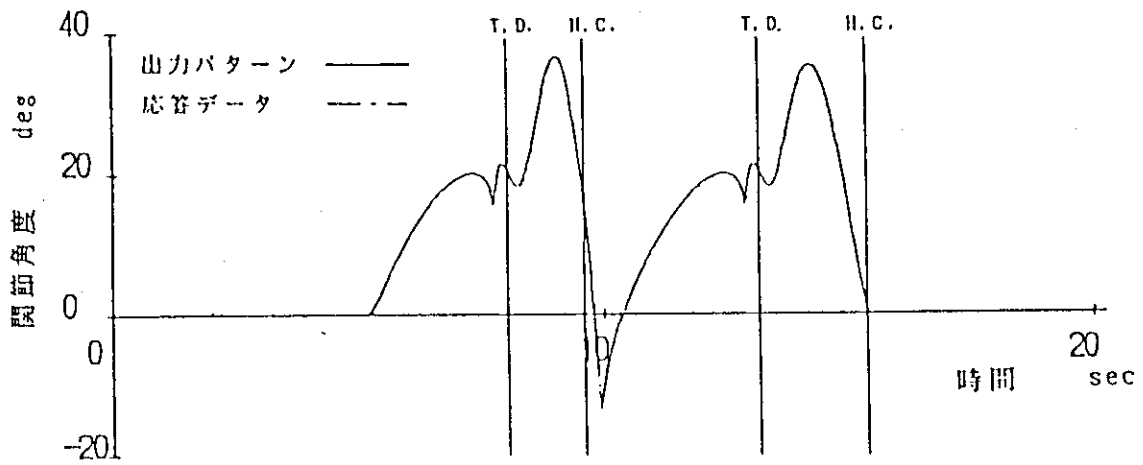


L.H.C.; Left Heel Contact
L.T.D.; Left Toe Detach
R.H.C.; Right Heel Contact
R.T.D.; Right toe Detach

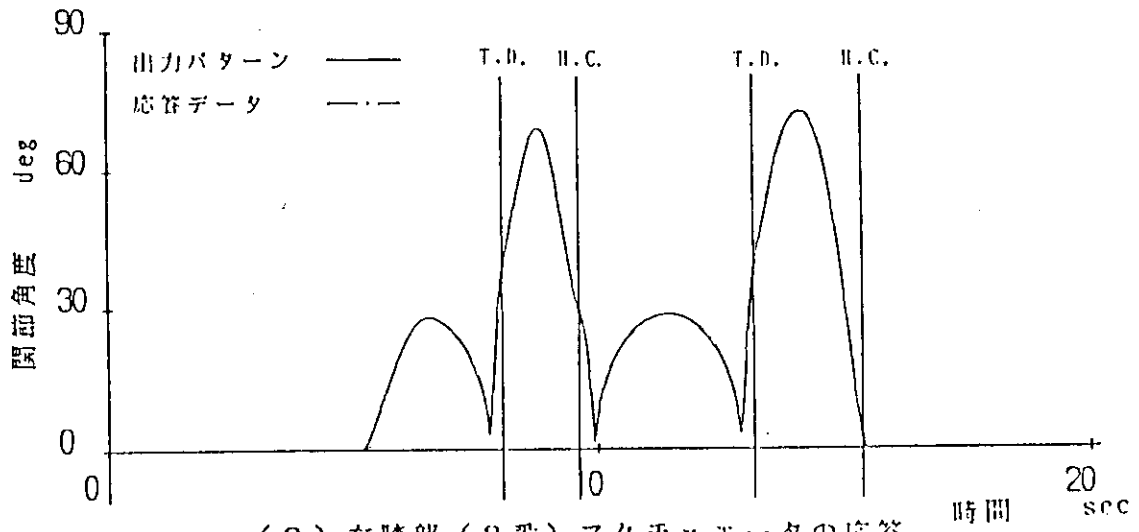


JAERI-M 90-093

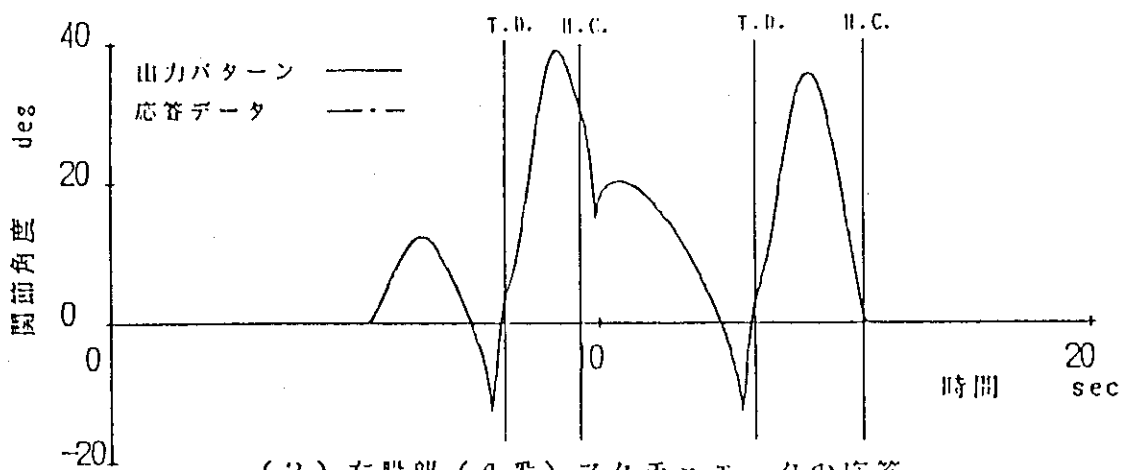
Fig. 4.2 Walking pattern (0.3 m/step, 2.6 s/step)



(1) 右足首部 (0番) アクチュエータの応答



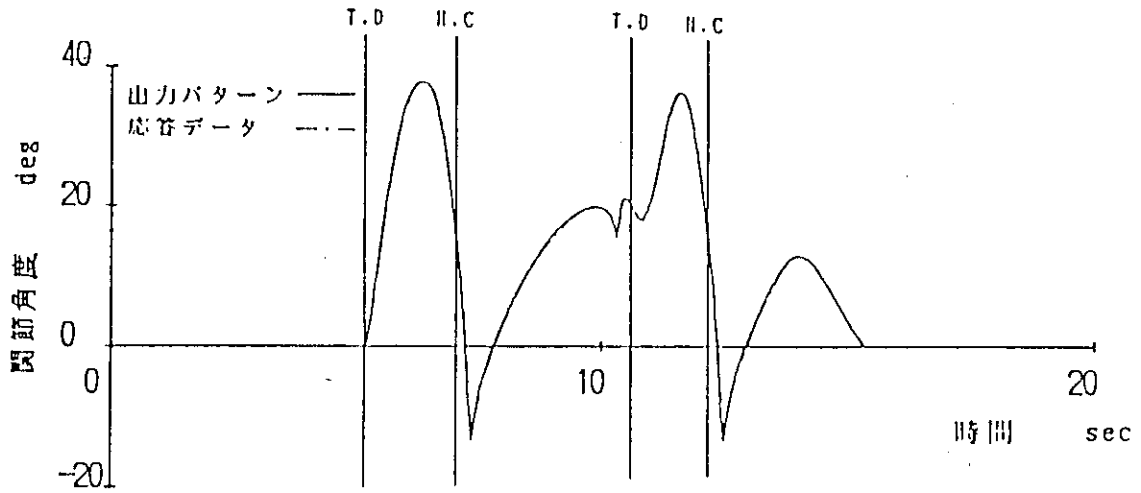
(2) 右膝部 (2番) アクチュエータの応答



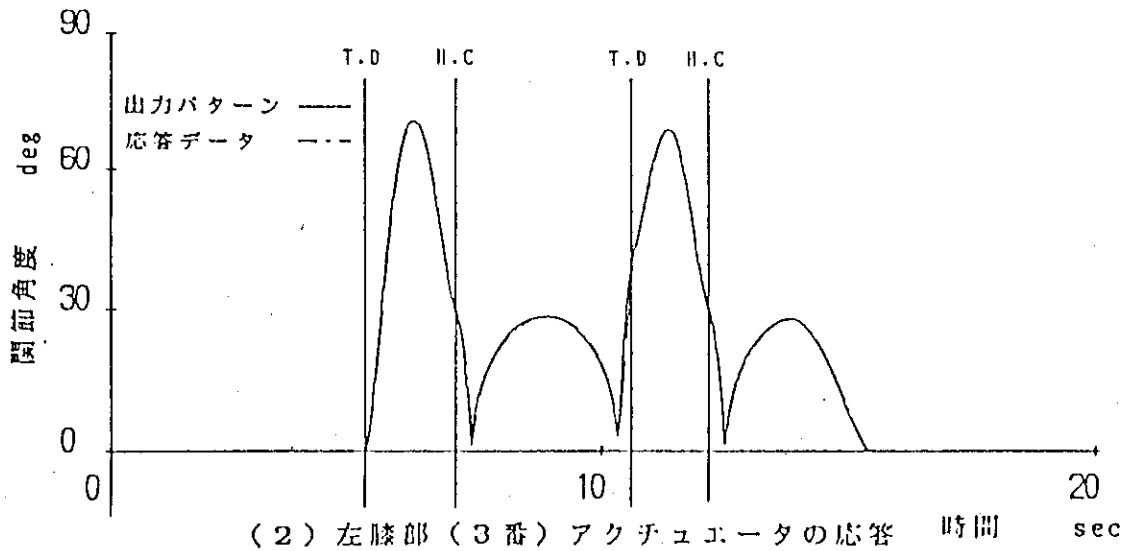
(3) 右股部 (4番) アクチュエータの応答

{T.D.: Toe Detach, H.C.: Heel Contact}

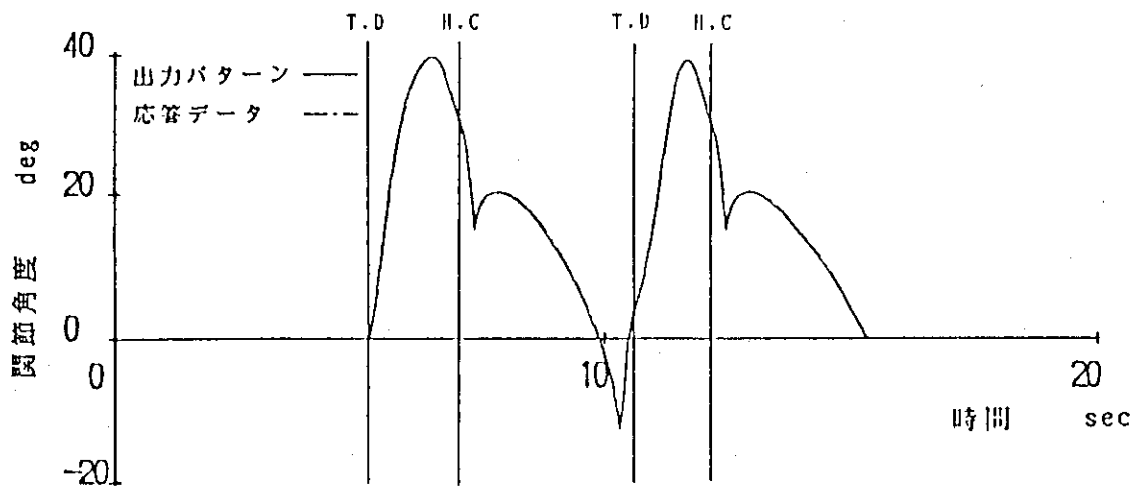
Fig. 4.3 Response of actuators for right leg (position)



(1) 左足首 (1番) アクチュエータの応答



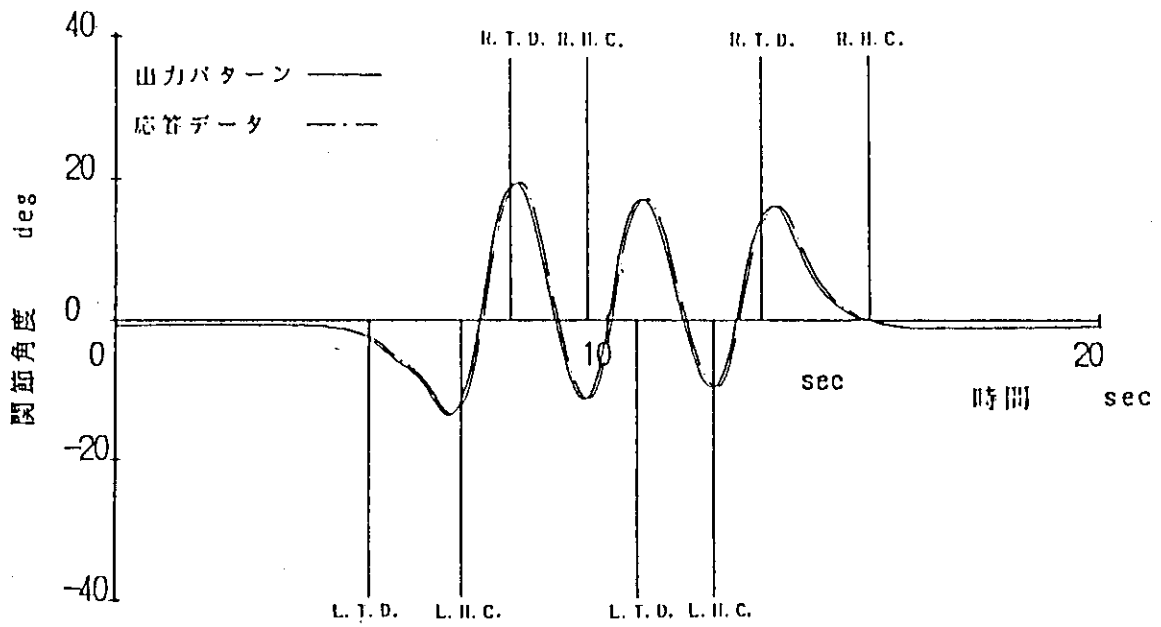
(2) 左膝部 (3番) アクチュエータの応答



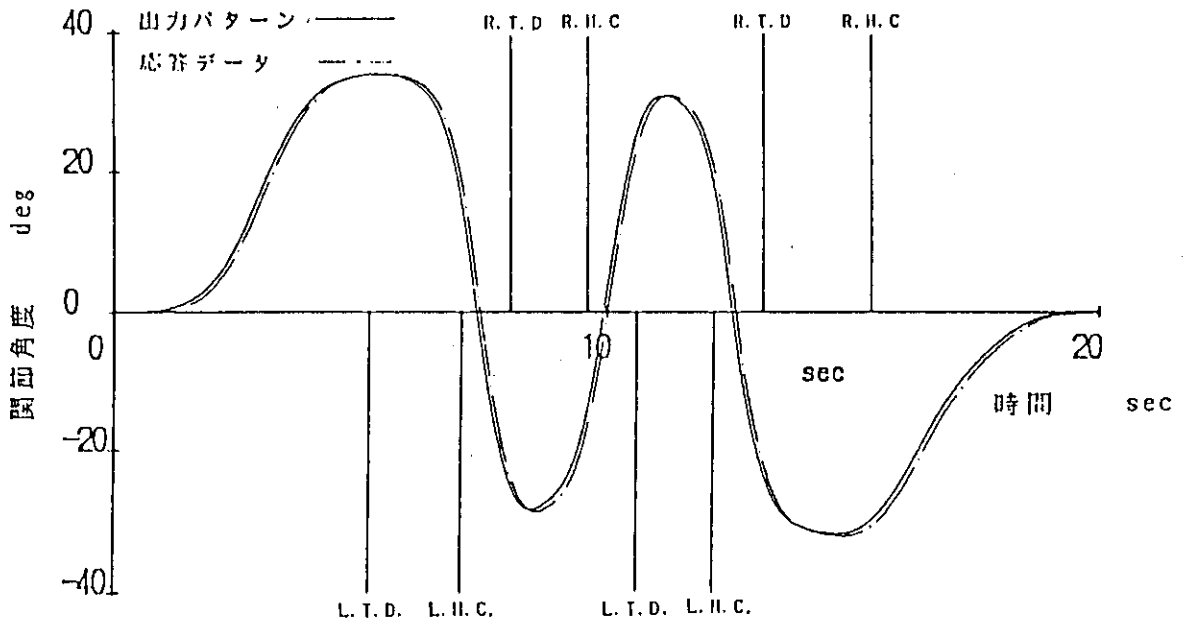
(3) 左股部 (5番) アクチュエータの応答

{T.D.; Toe Detach, H.C.; Heel Contact}

Fig. 4.4 Response of actuators for left leg (position)



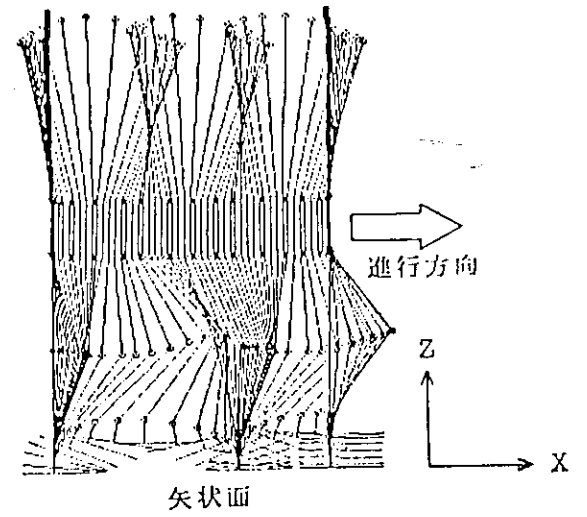
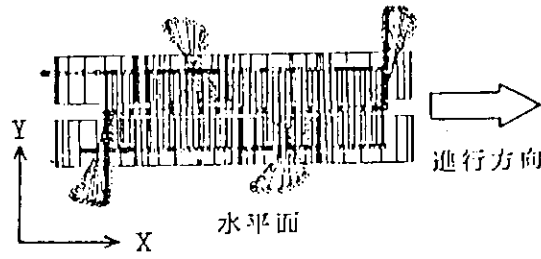
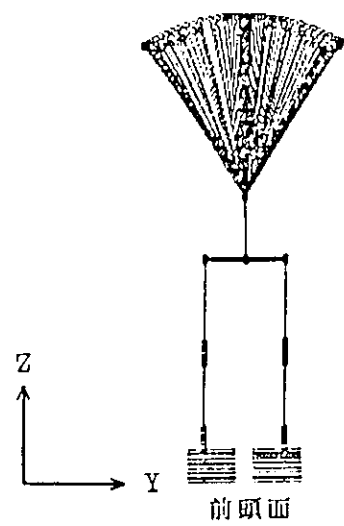
(1) 上体ピッチ (G番) アクチュエータの応答



(2) 上体ロール (7番) アクチュエータの応答

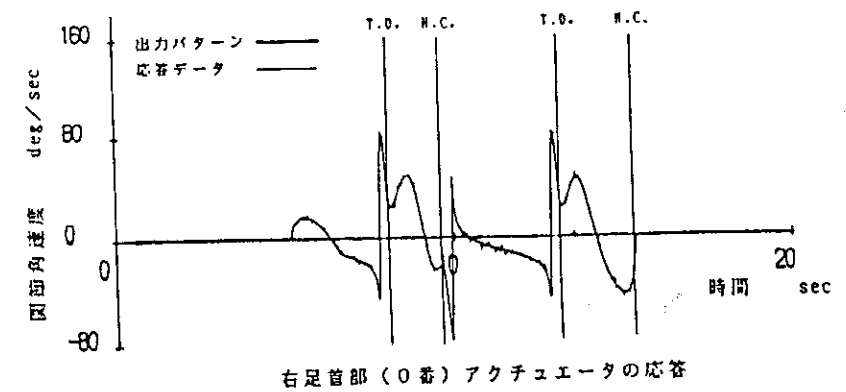
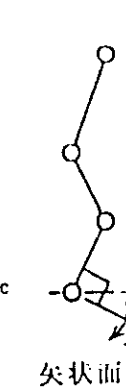
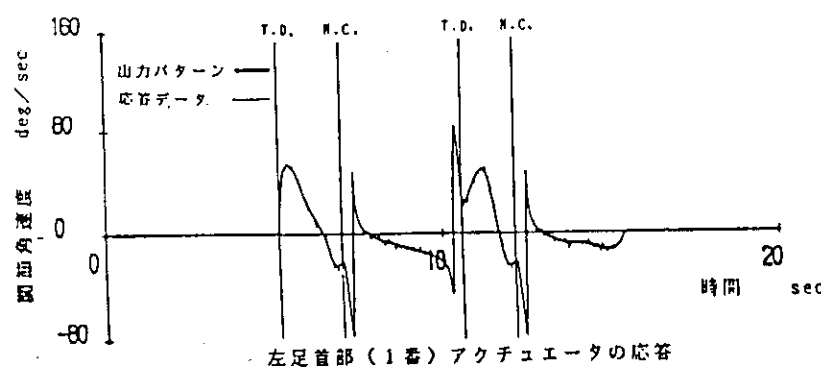
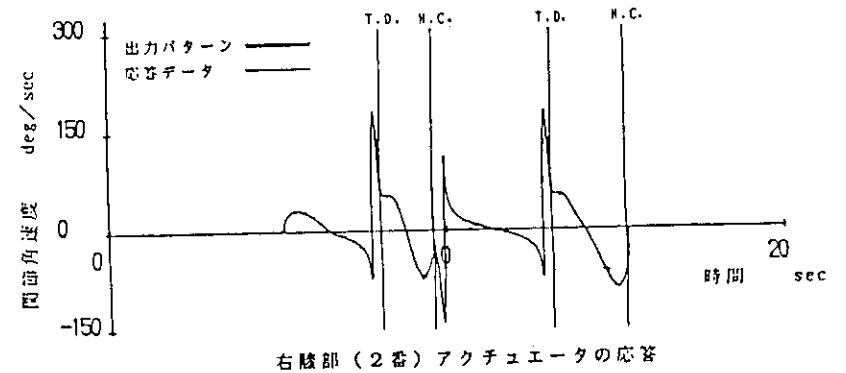
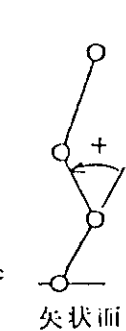
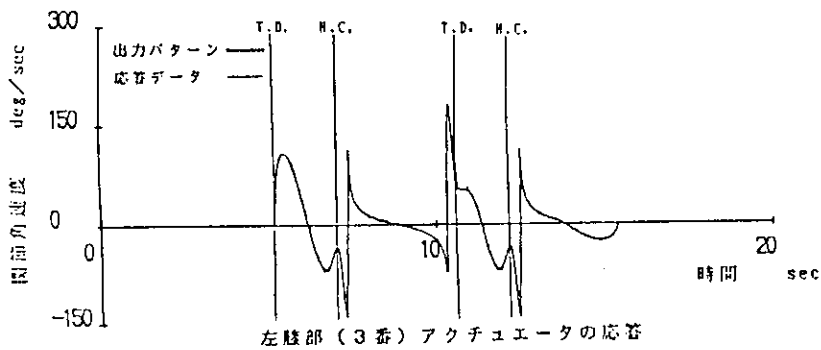
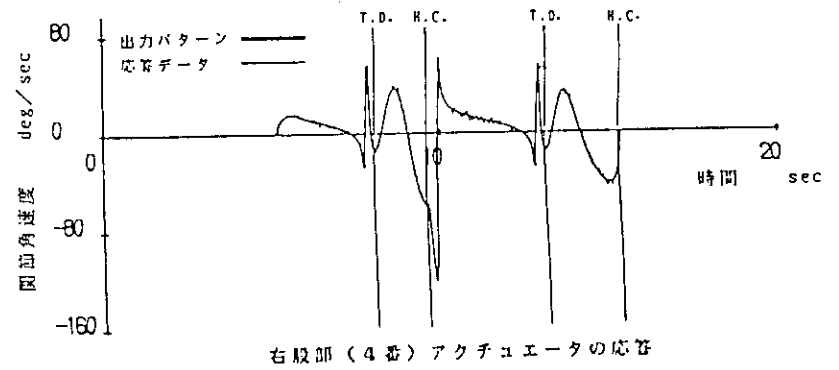
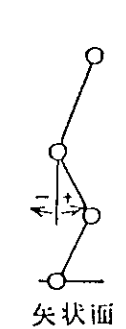
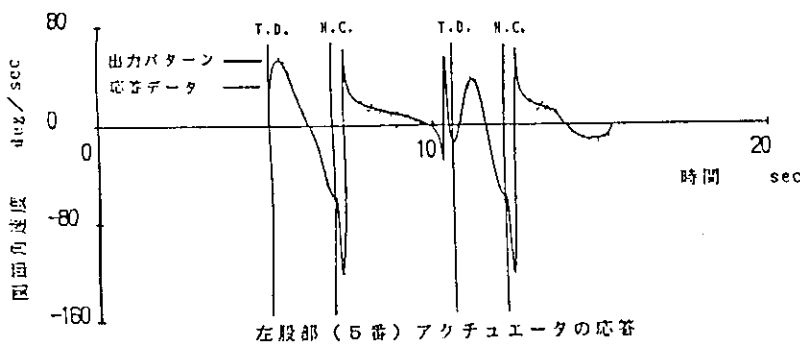
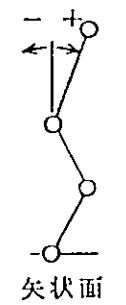
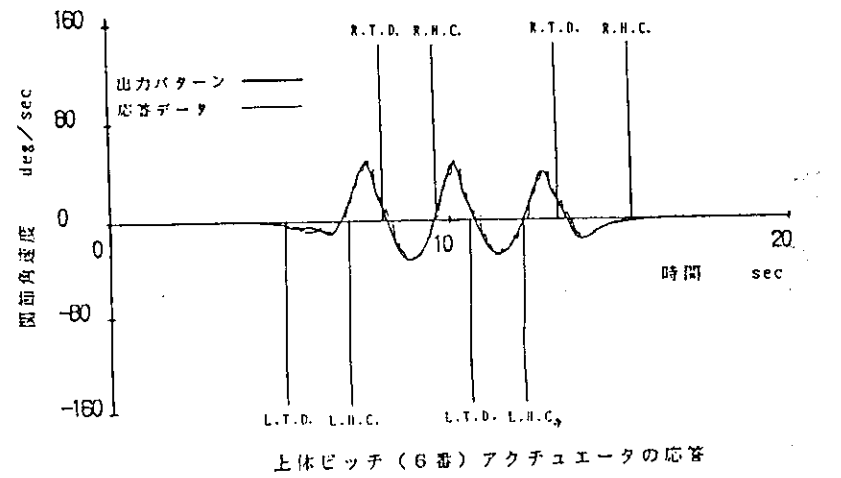
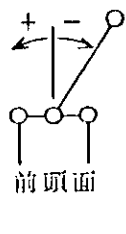
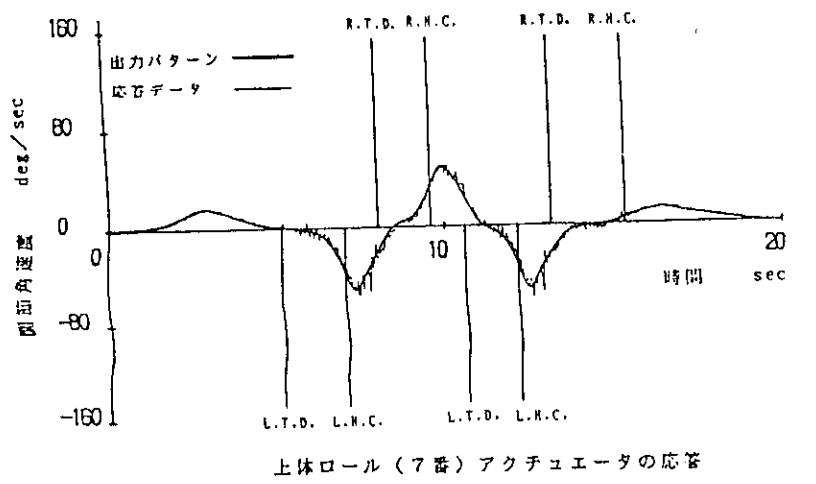
R.T.D.; Right toe Detach
 R.H.C.; Right Heel Contact
 L.T.D.; Left Toe Detach
 L.H.C.; Left Heel Contact

Fig. 4.5 Response of actuators for trunk (position)



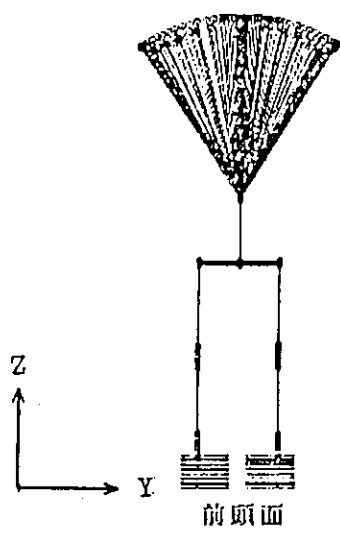
歩行パターン3次元グラフィック

L.H.C.; Left Heel Contact
L.T.D.; Left Toe Detach
R.H.C.; Right Heel Contact
R.T.D.; Right Toe Detach

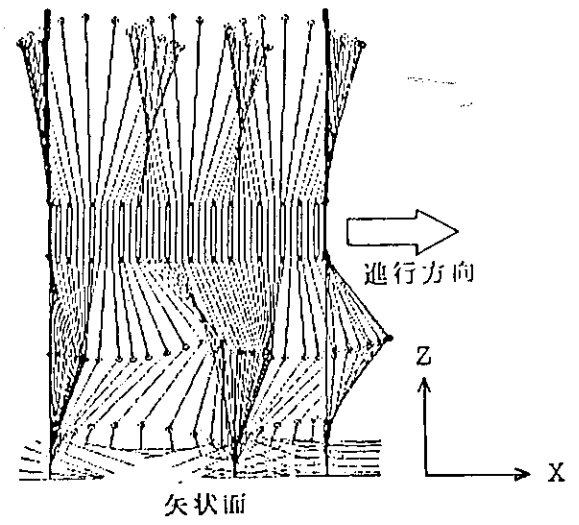
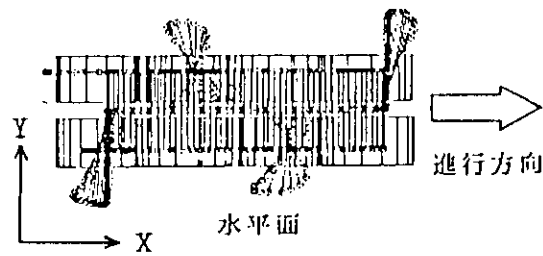


JAERI-M 90-093

Fig. 4.6 Response of actuators (velocity)



歩行パターン3次元グラフィック



L.H.C.; Left Heel Contact
L.T.D.; Left Toe Detach
R.H.C.; Right Heel Contact
R.T.D.; Right toe Detach

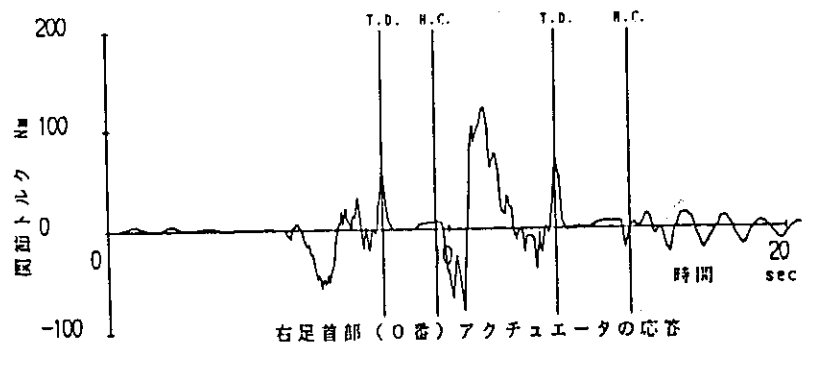
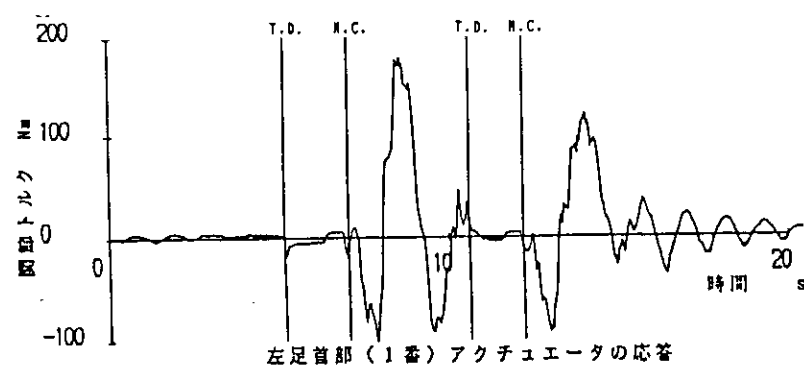
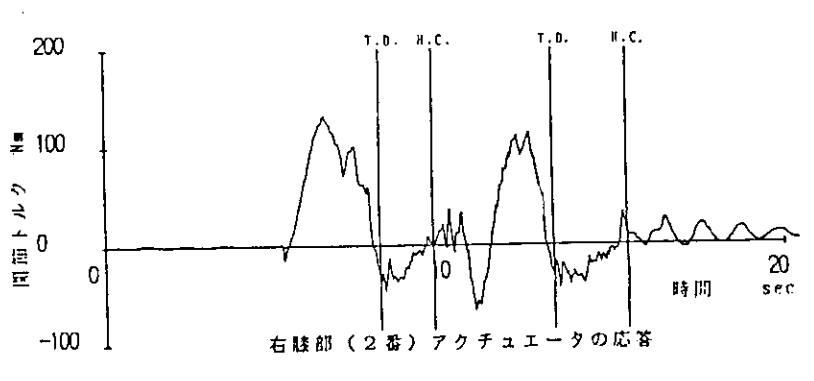
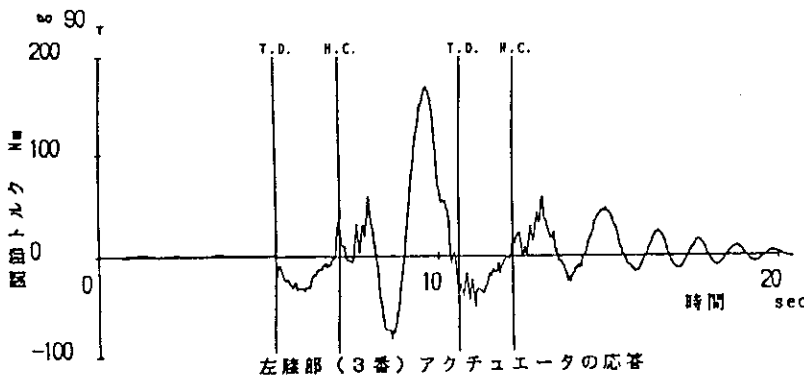
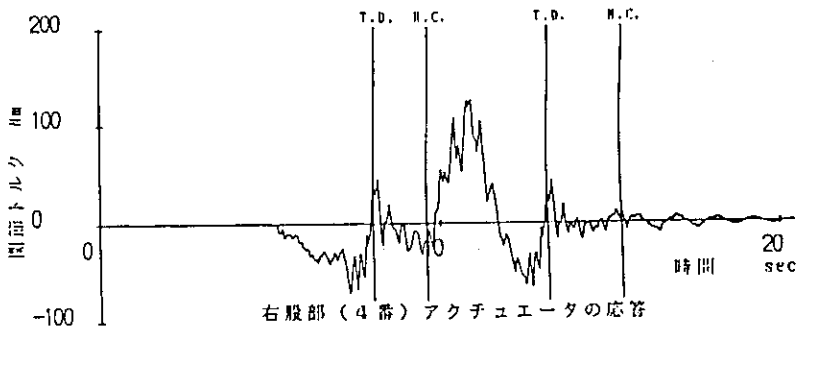
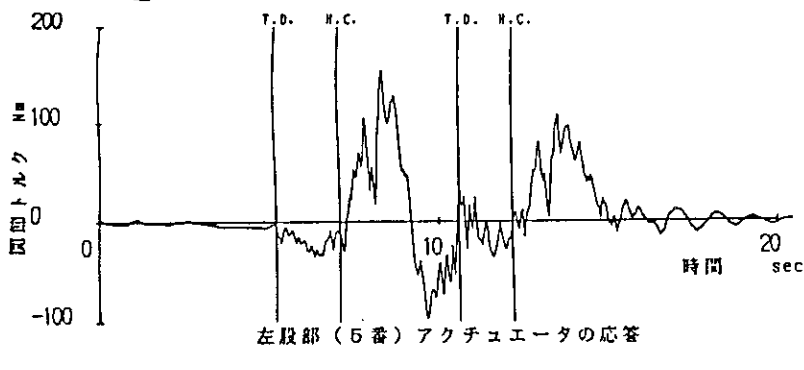
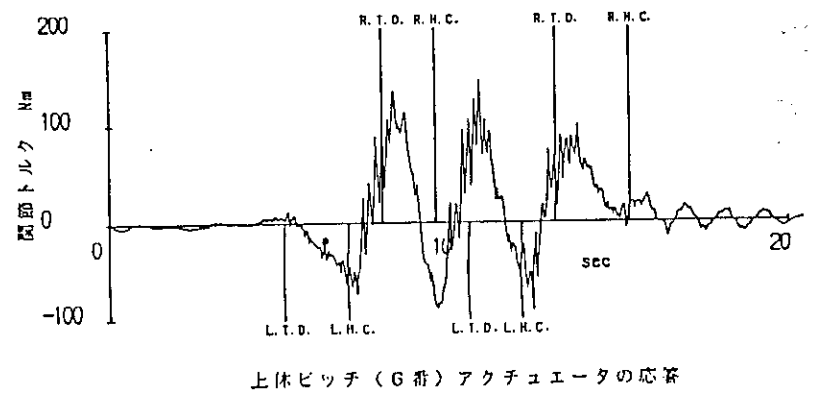
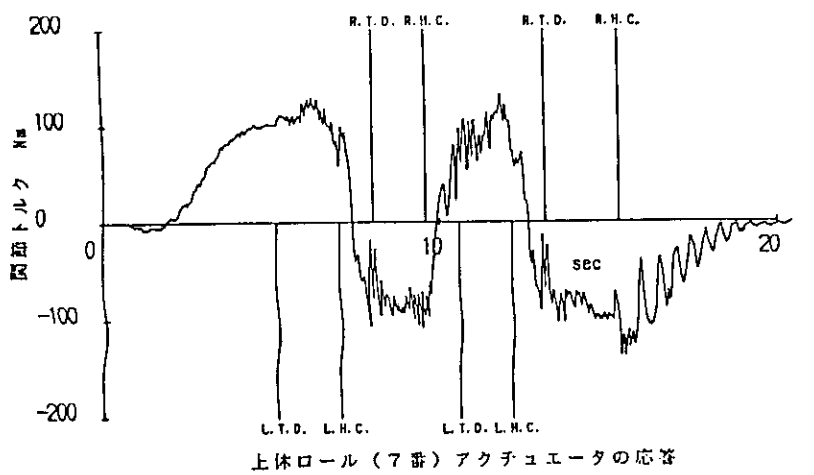
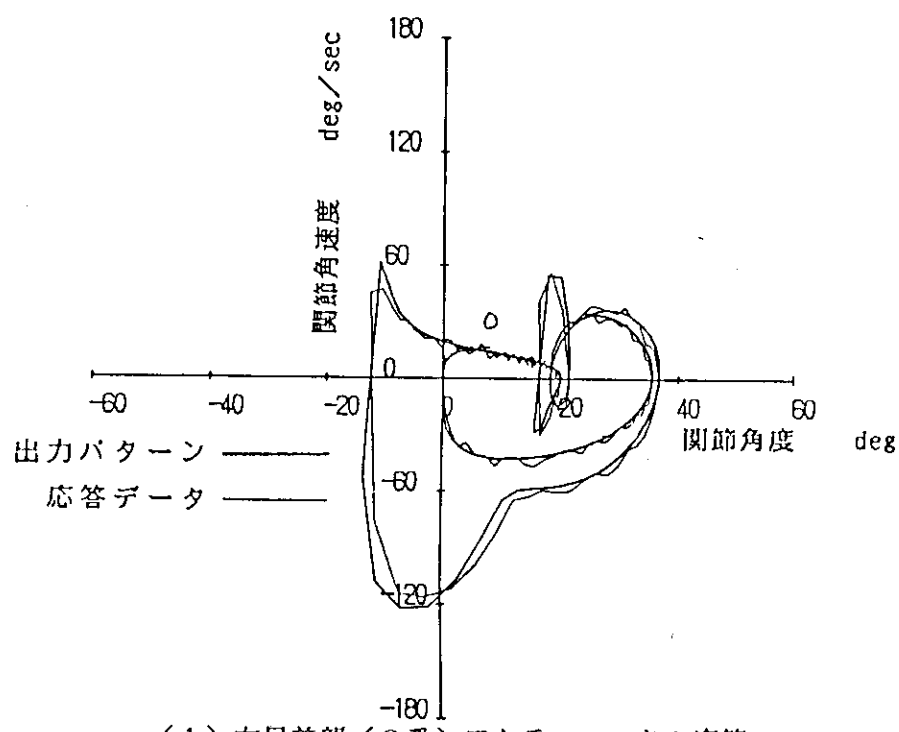
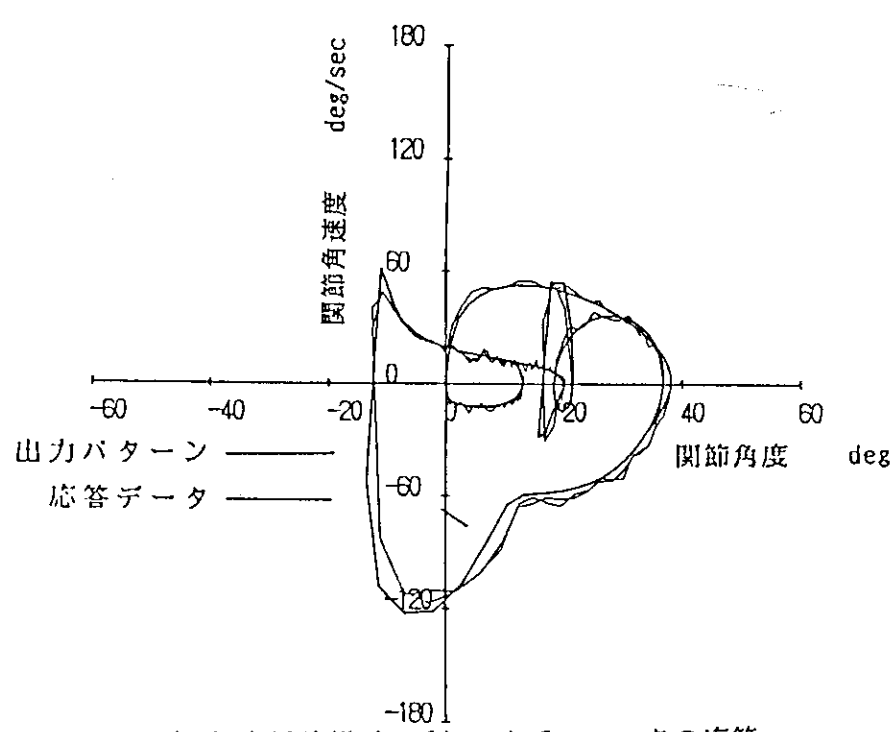


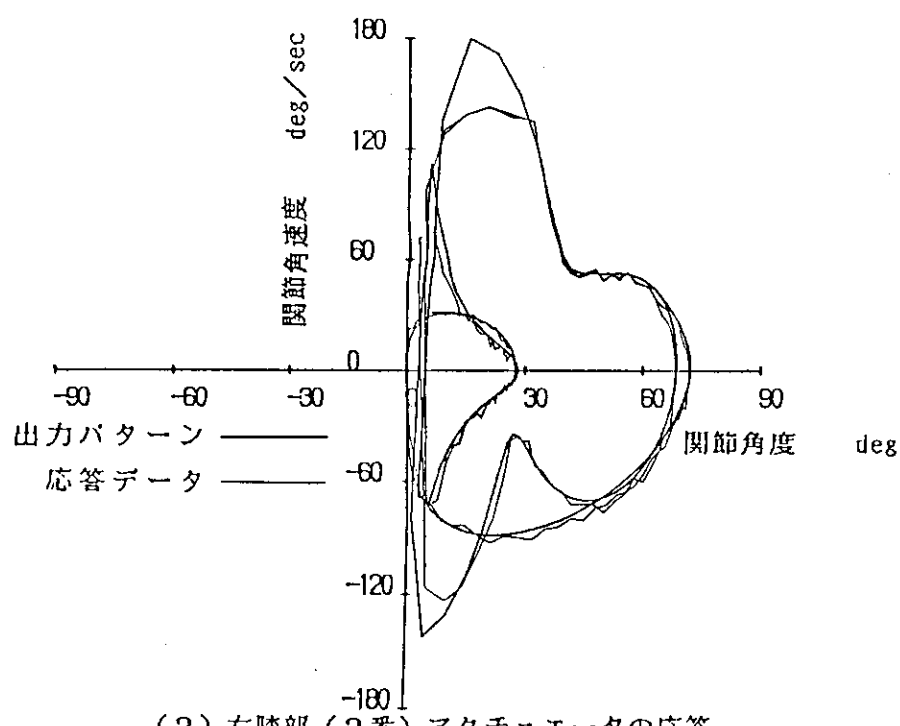
Fig. 4.7 Response of actuators (torque)



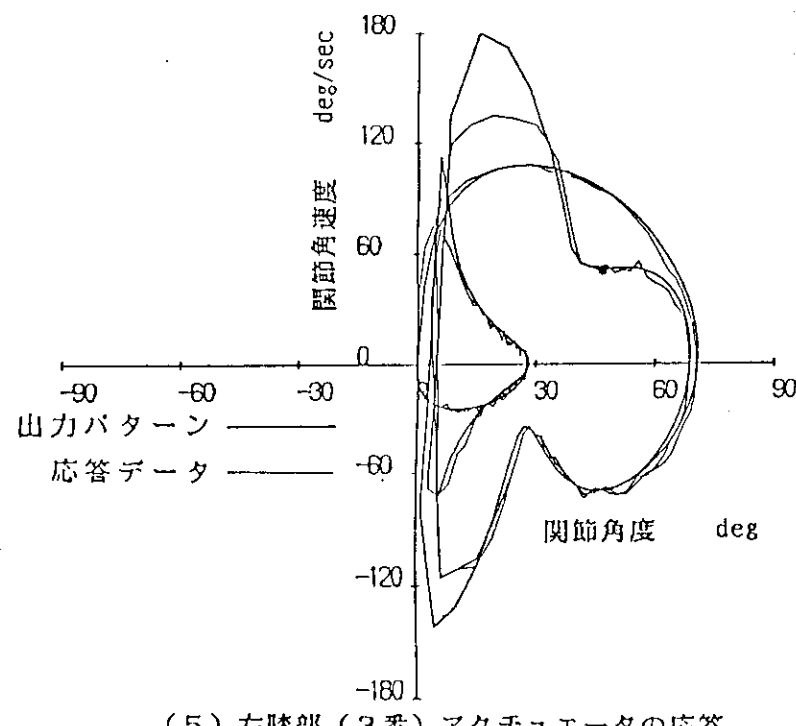
(1) 右足首部 (0番) アクチュエータの応答



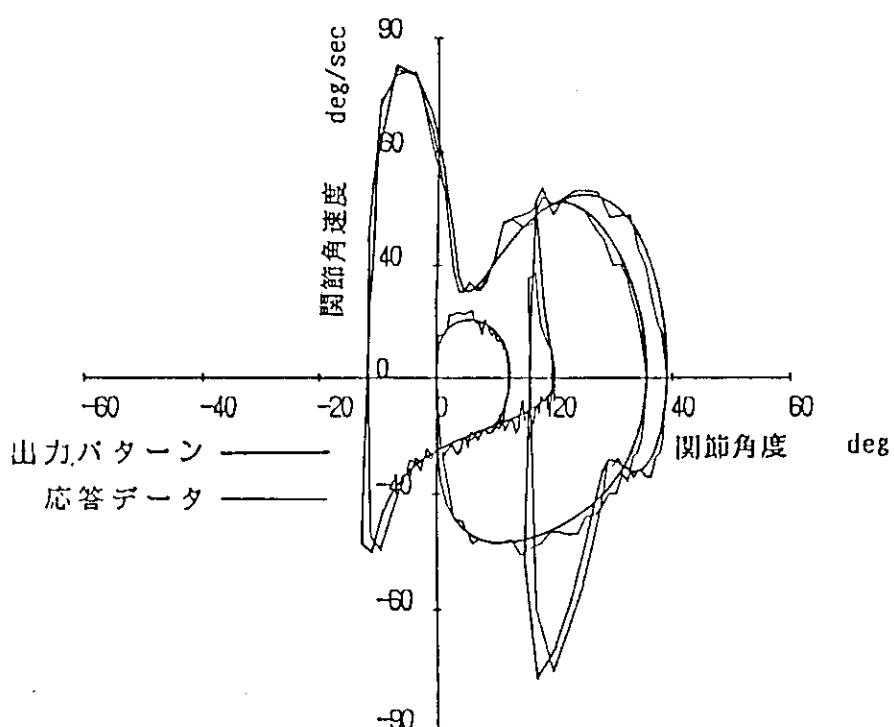
(4) 左足首部 (1番) アクチュエータの応答



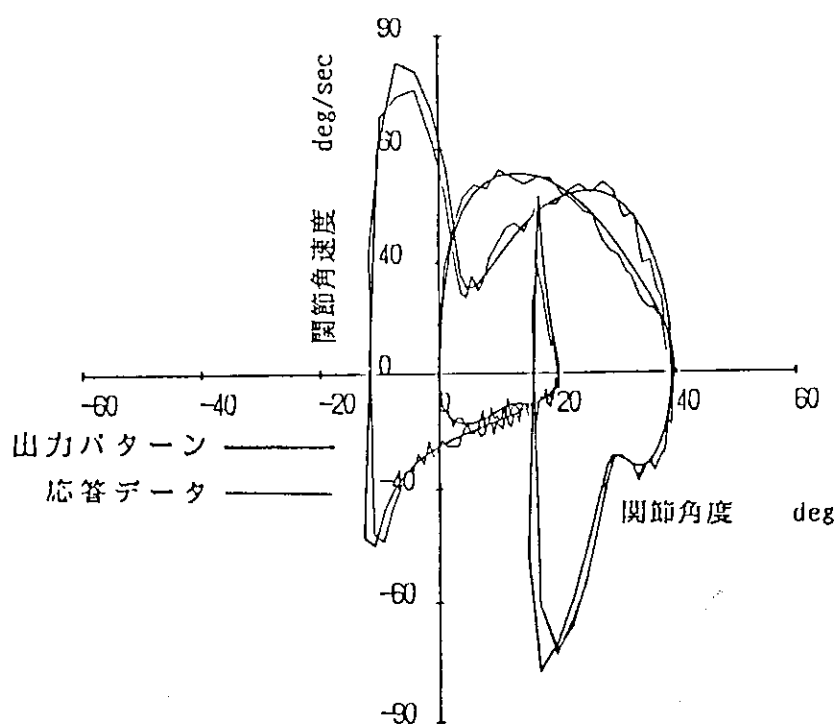
(2) 右膝部 (2番) アクチュエータの応答



(5) 左膝部 (3番) アクチュエータの応答



(3) 右股部 (4番) アクチュエータの応答



(6) 左股部 (5番) アクチュエータの応答

Fig. 4.8 Phase plane analysis of lower-limbs walking pattern

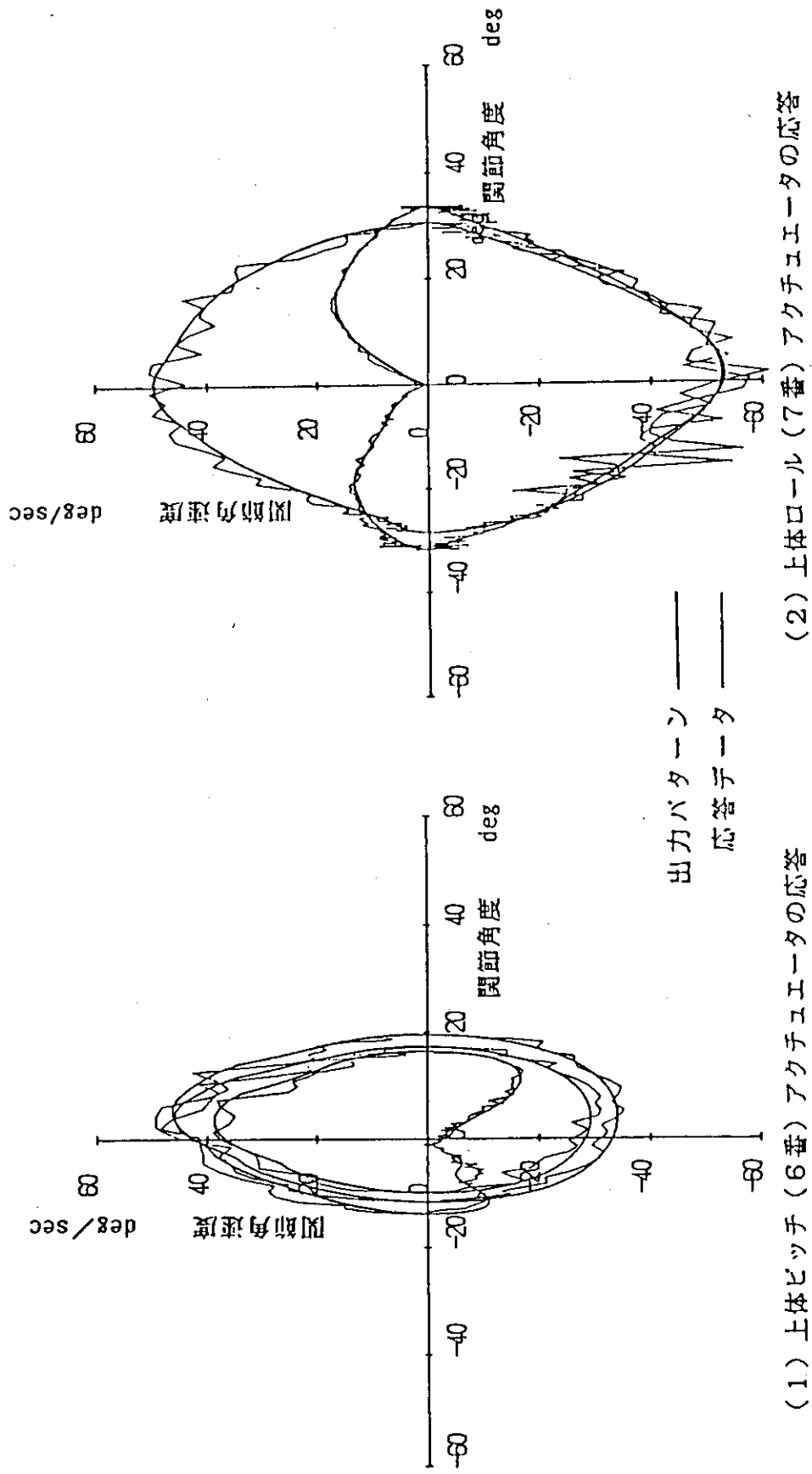
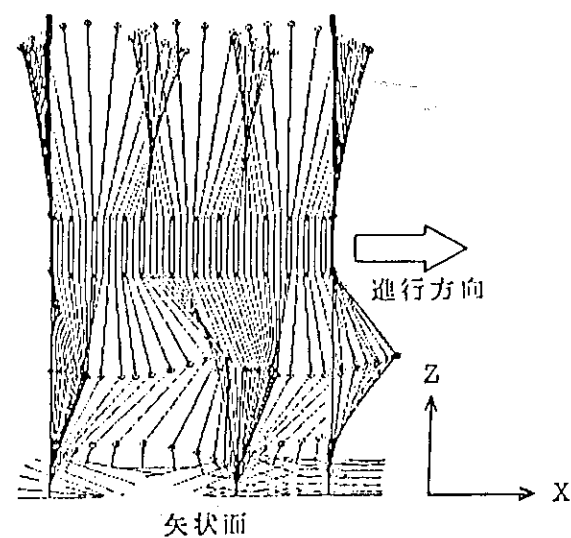
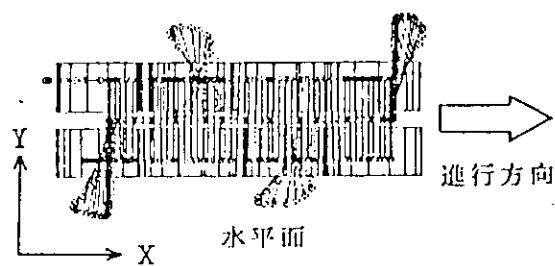
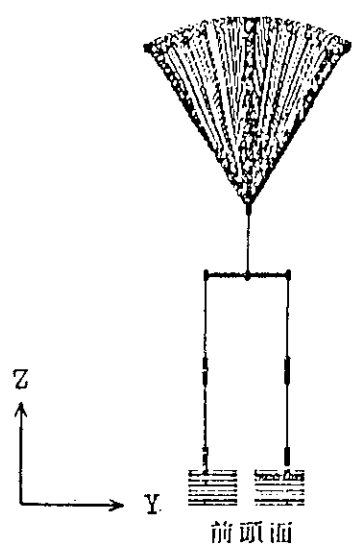
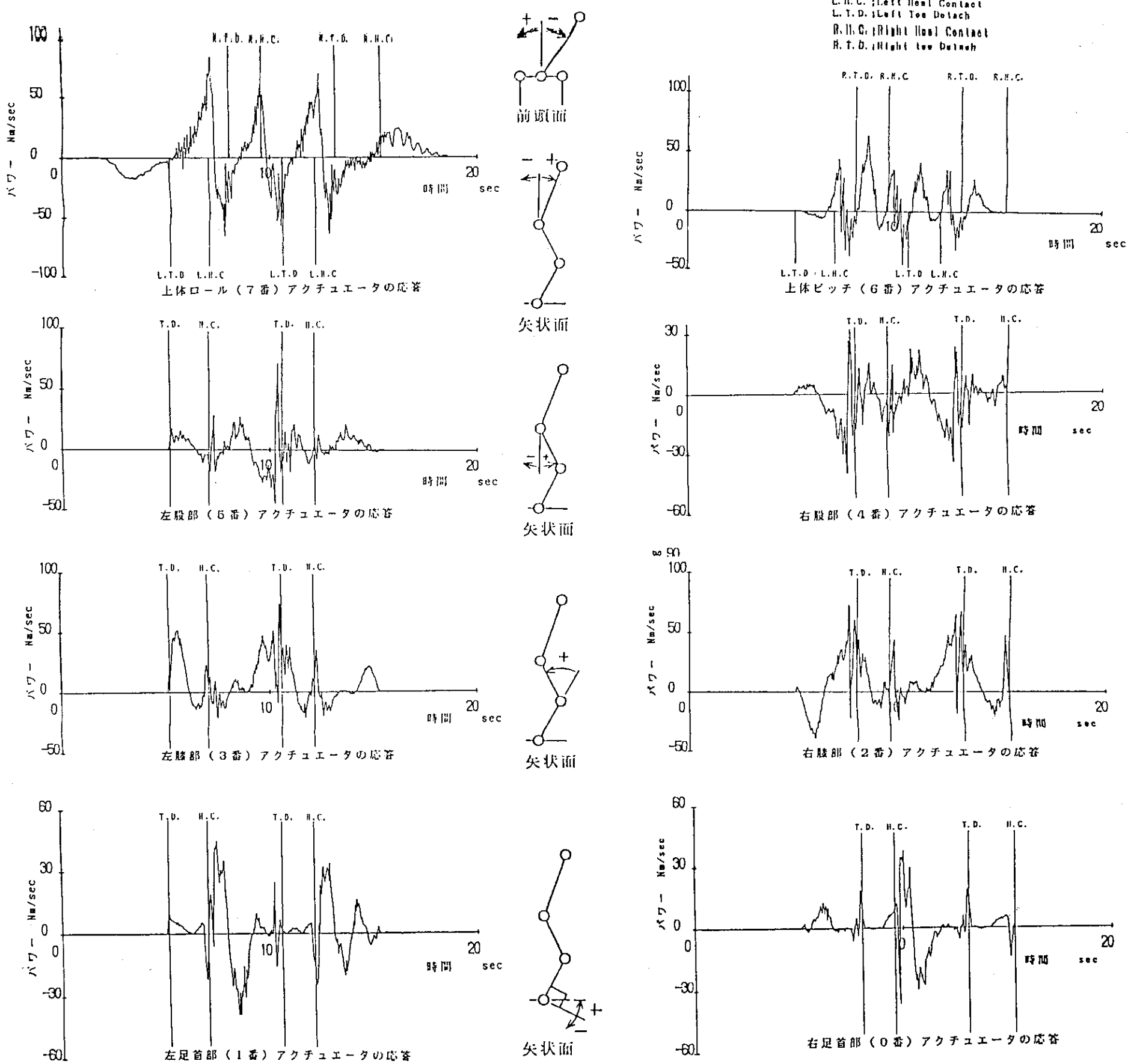


Fig. 4.9 Phase plane analysis of a trunk motion



歩行パターン3次元グラフィック

(パワー) = - (トルク) * (角速度)



JAERI-M 90-093

Fig. 4.10 Response of actuators (power)

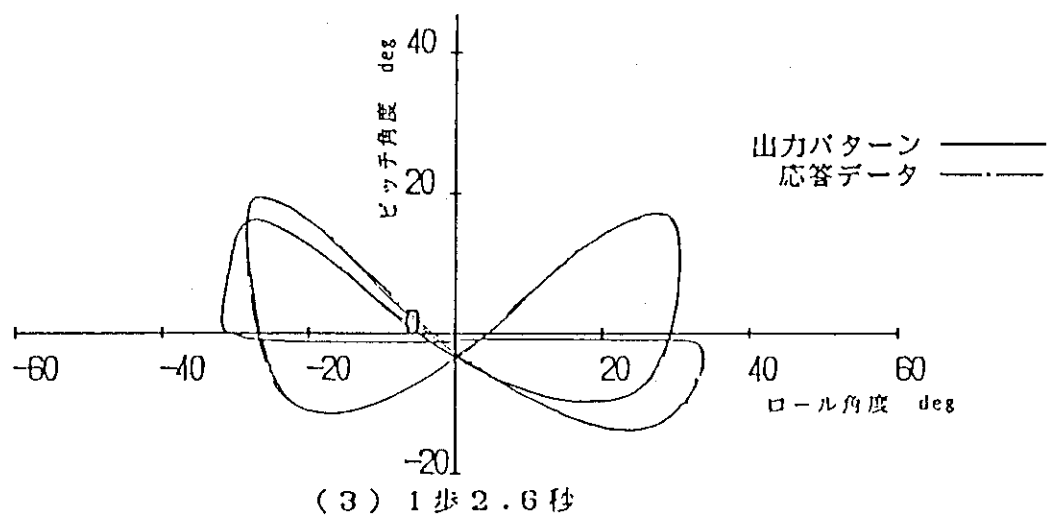
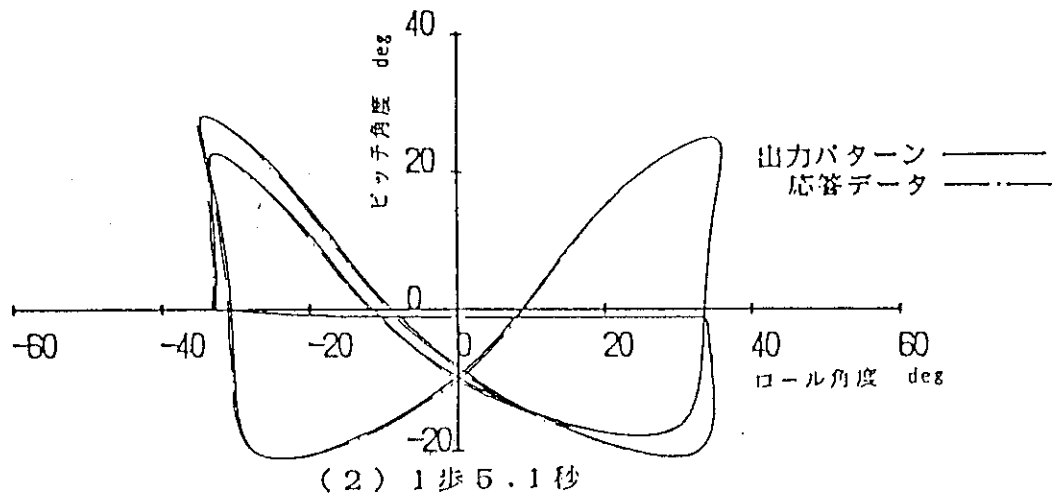
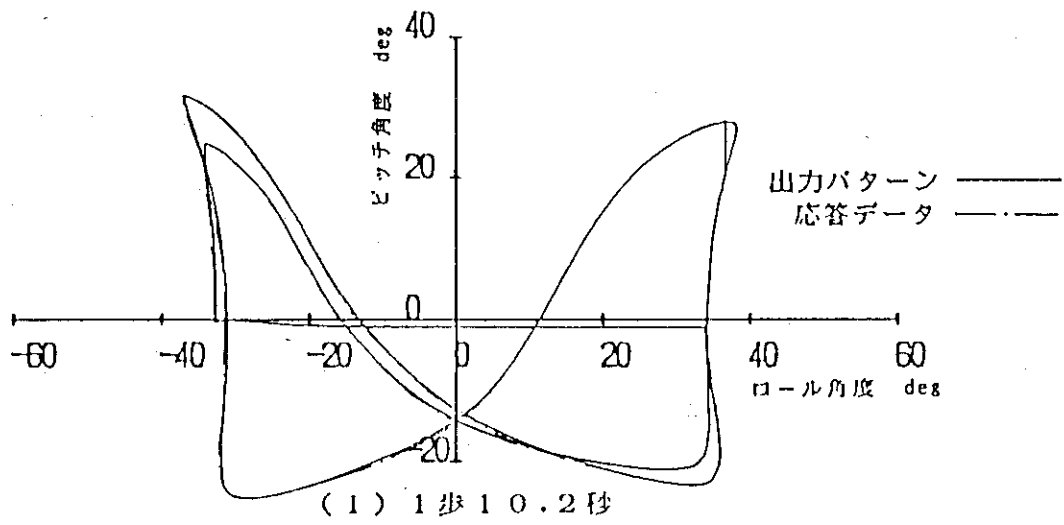


Fig. 4.11 Comparison of trajectory of a trunk motion (step length 30cm)

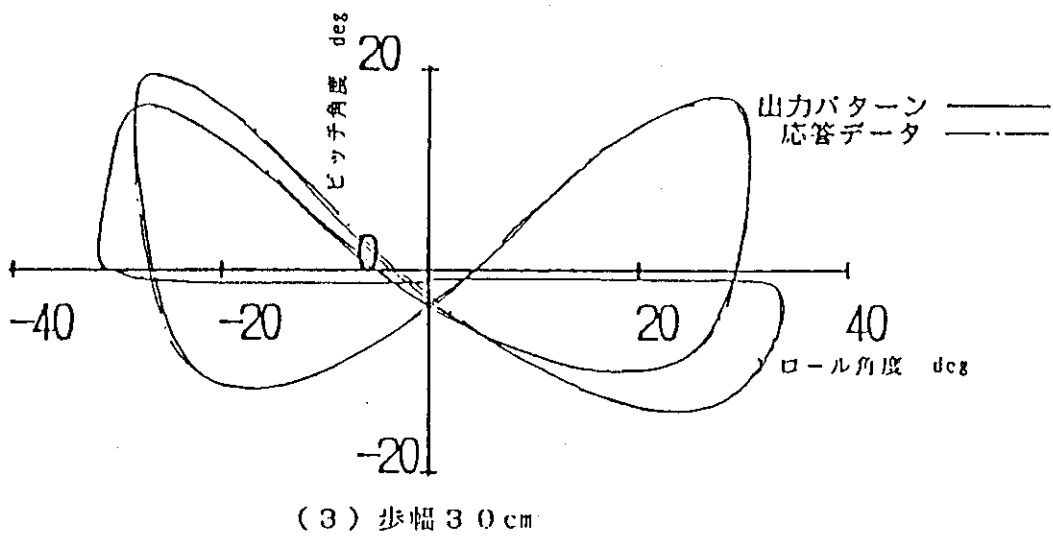
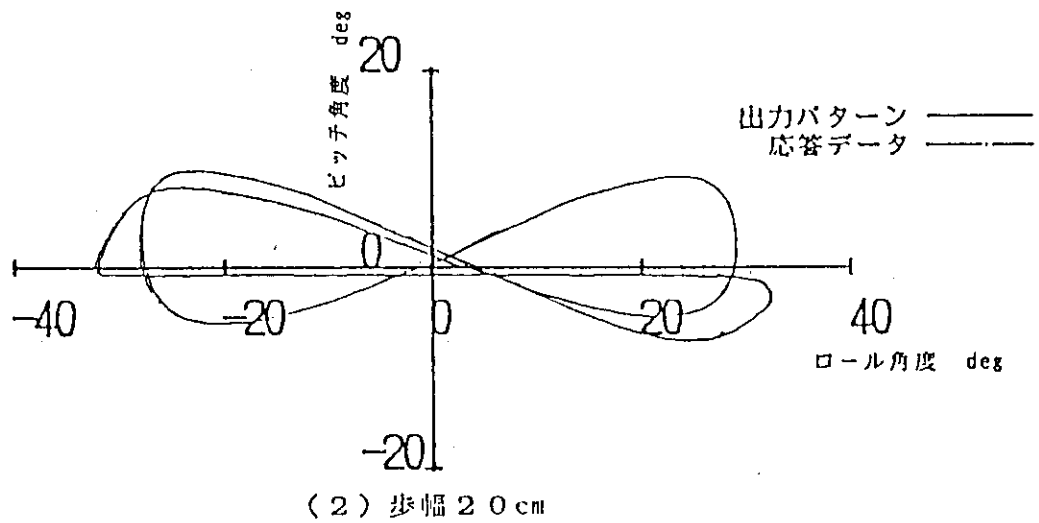
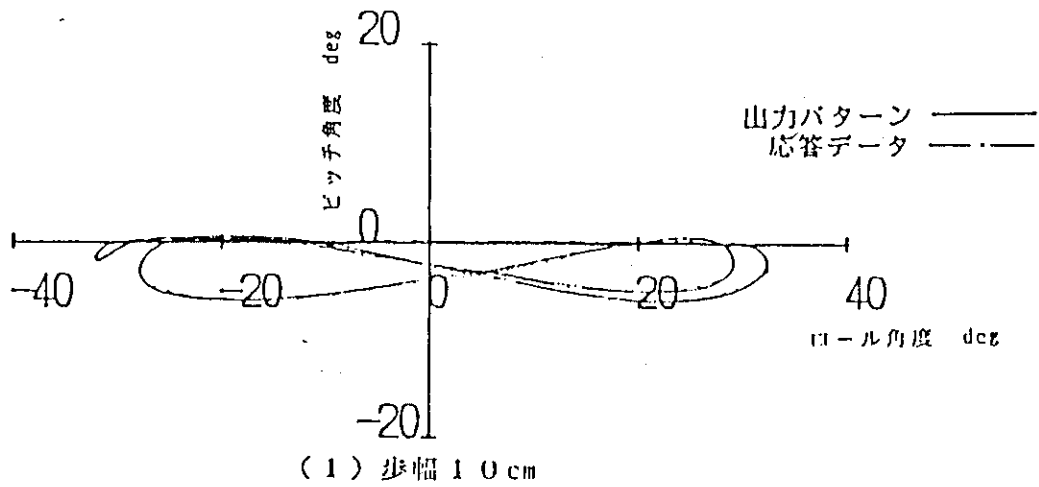


Fig. 4.12 Comparison of trajectory of a trunk motion (2.6 s/step)

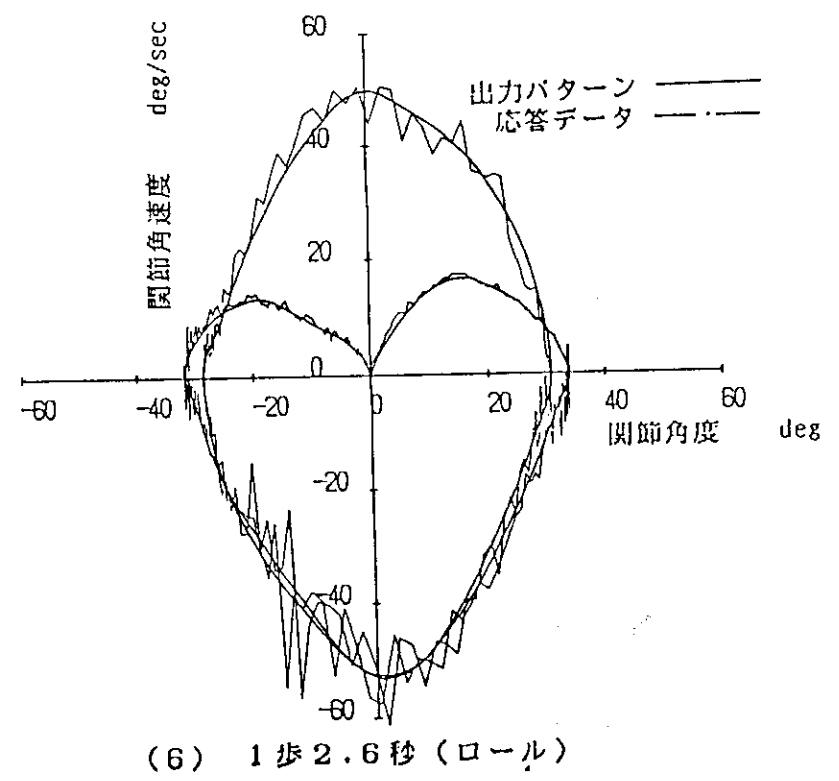
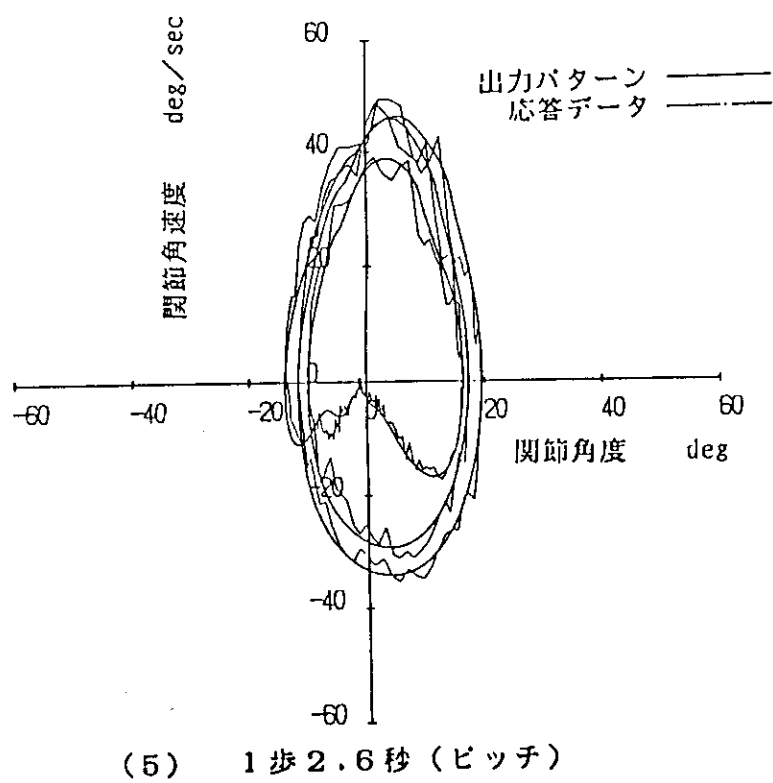
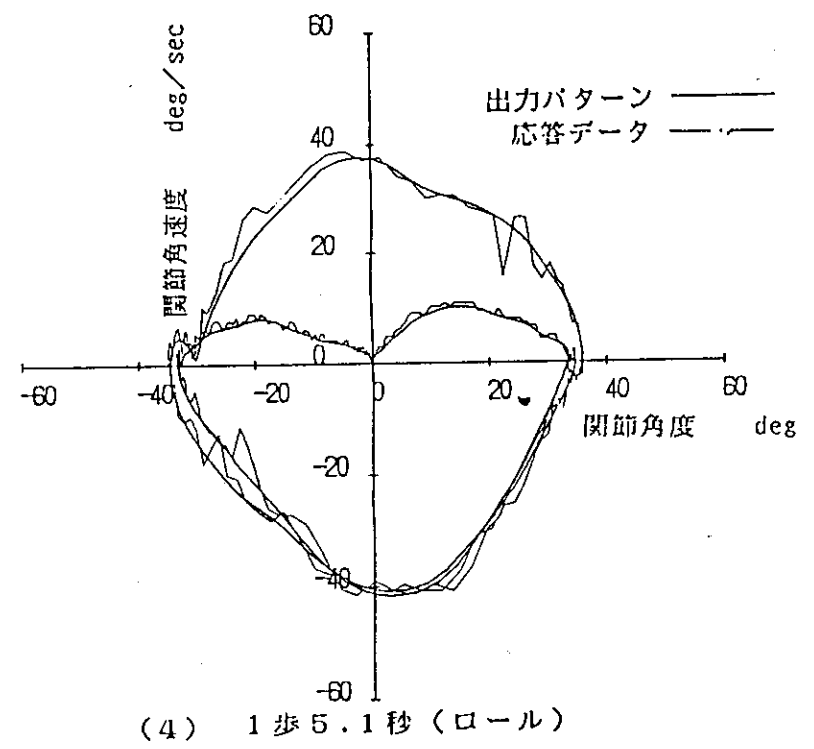
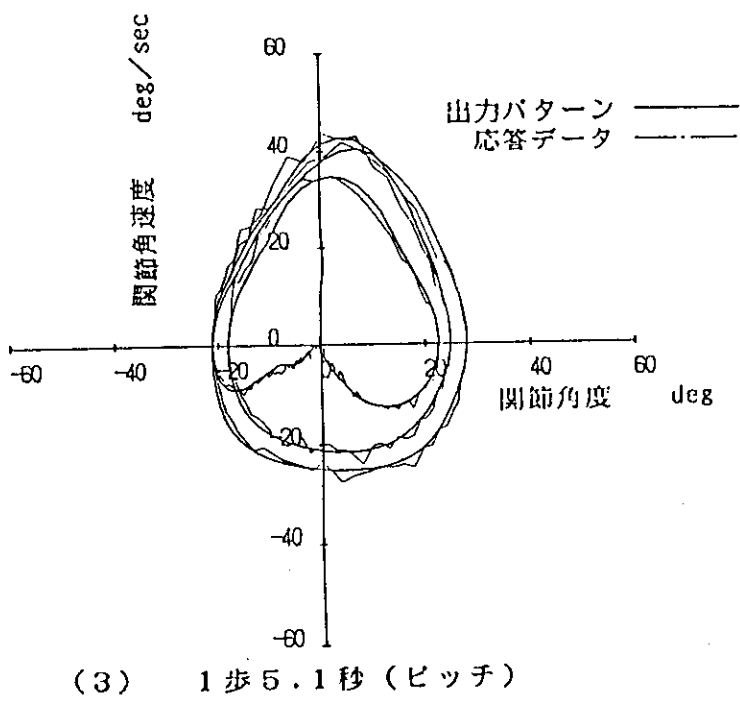
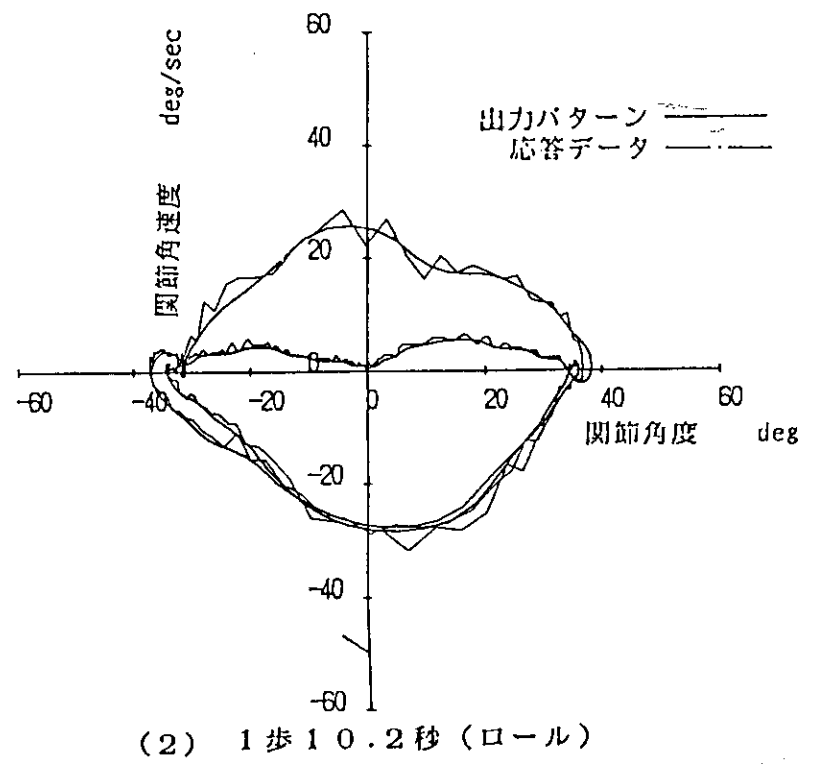
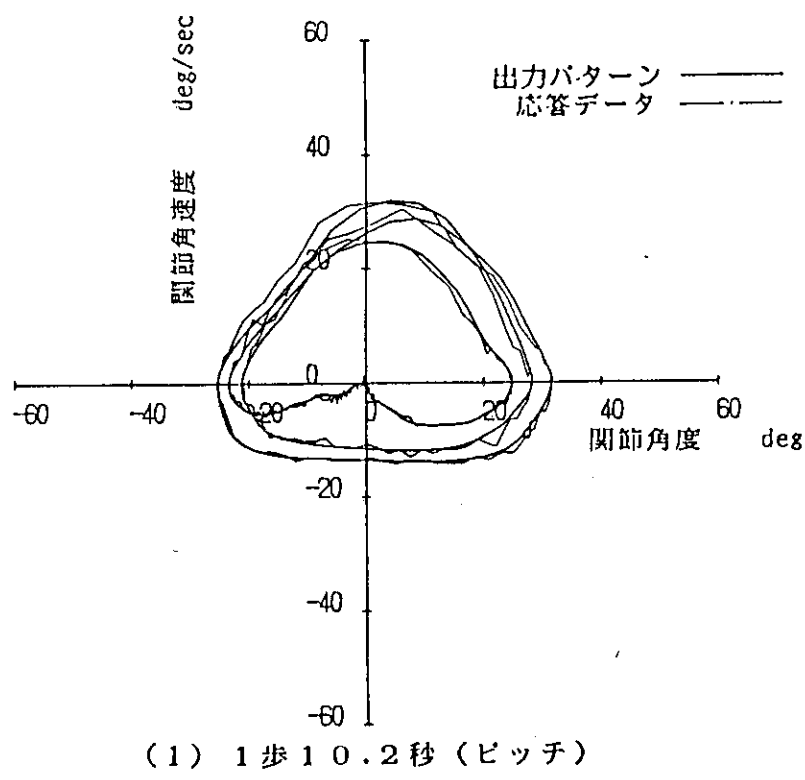


Fig. 4.13 Phase plane analysis of a trunk motion (step length 30cm)

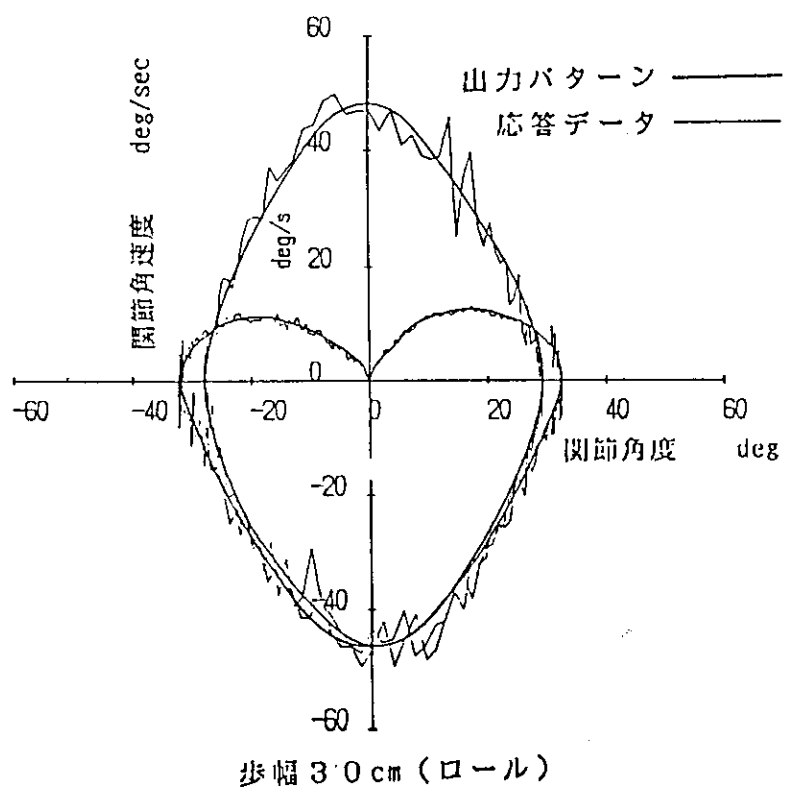
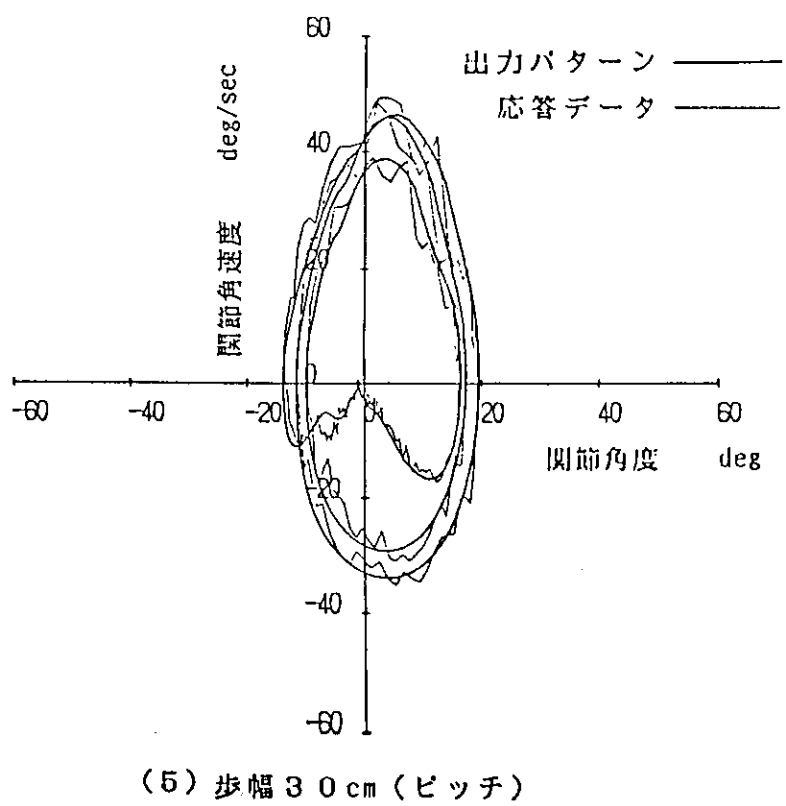
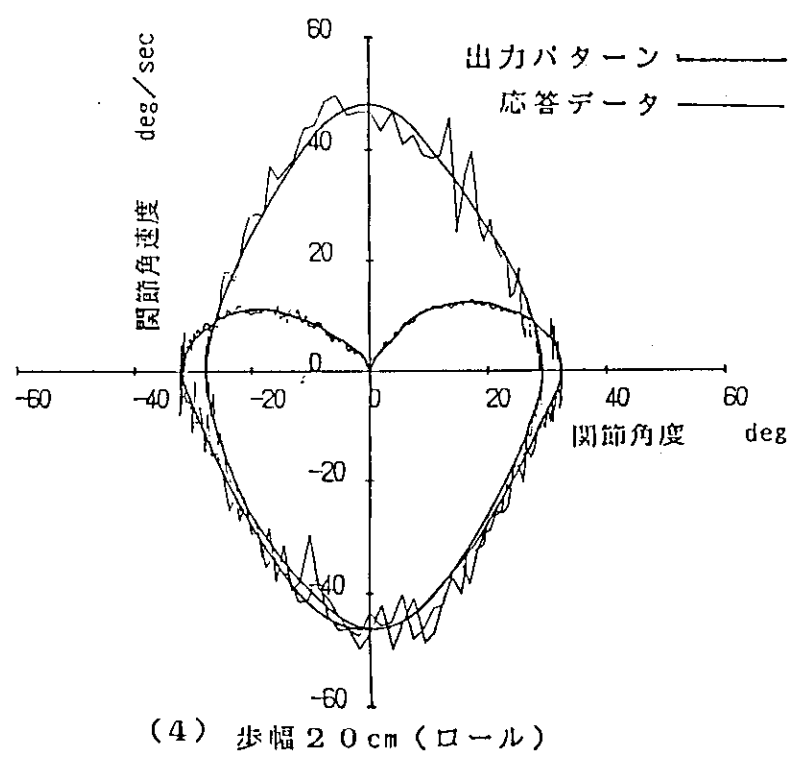
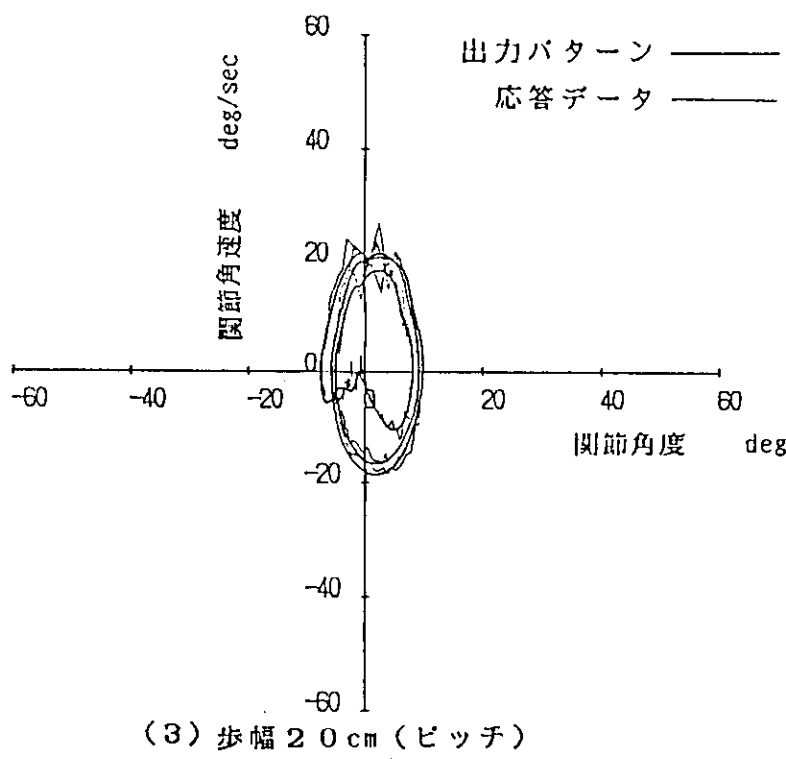
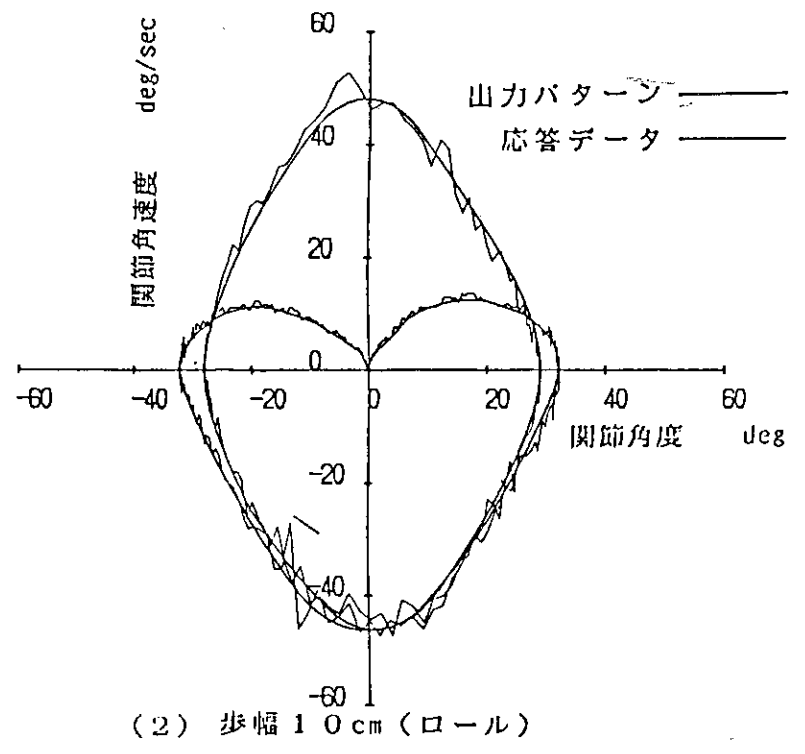
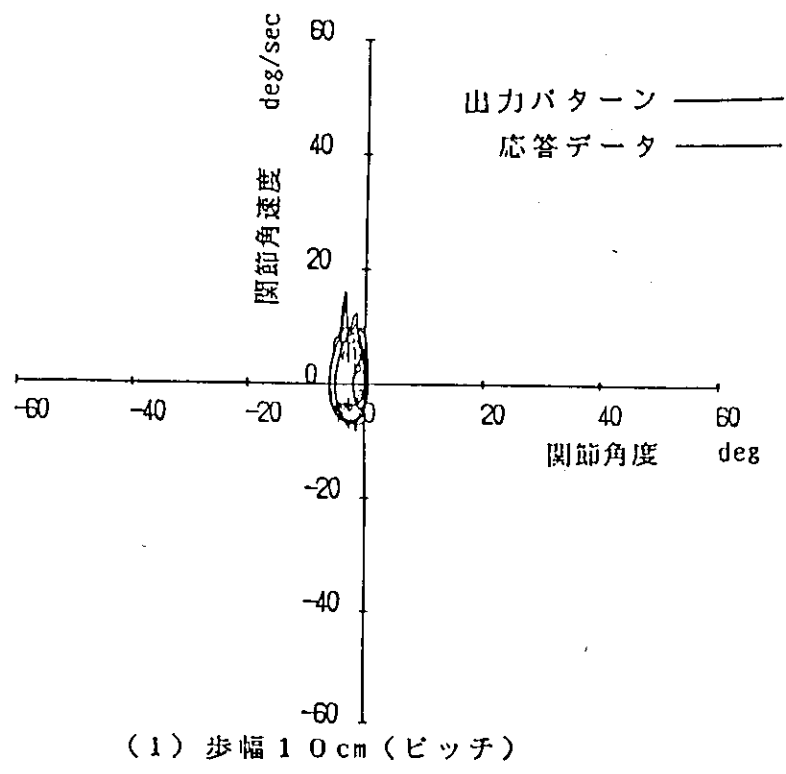


Fig. 4.14 Phase plane analysis of a trunk motion (2.6 s/step)

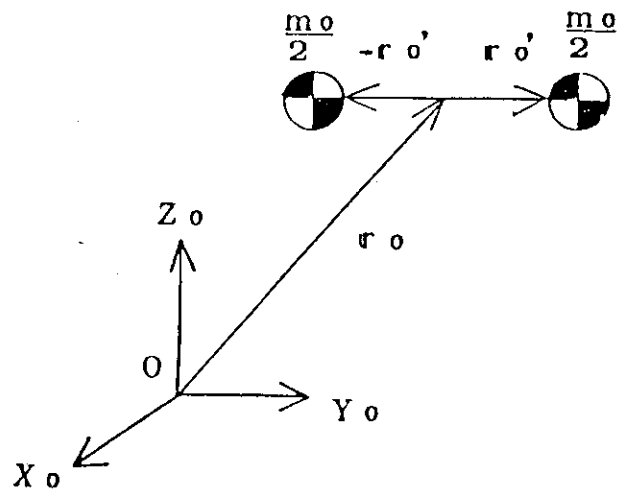


Fig. 4.15 A couple of forces

5. お わ り に

本報告の内容を要約すると以下のようなになる。始めに近年の二足歩行ロボットに関する論文のうち特に二足歩行の運動方程式に関係があるものの抄訳を示し、以後二足歩行の運動方程式及び拘束条件について記述した。運動方程式に関しては、まず歩行系の動力学について触れ、上体補償型の歩行モデルに対する非線形干渉2階微分方程式の線形化・非干渉化手法と非線形解法について述べた。これは、既知の外力、例えば荷物を持った歩行にも適応出来る手法であり、発進から定常歩行、停止に至る完全歩行を対象としている。また、歩行パターン作成方法等についても解説を行った。

最後に実際の二足歩行ロボットWL-12を用いた歩行実験により、上体補償型動歩行の検証を行った。これにより、上体補償軌道作成アルゴリズムの有効性を確認した。また、本調査では予め計算された設定歩行パターンによるプログラム制御を行っているが、より高速な歩行を行わせる場合に生じる衝撃力やZ軸まわりのひねりの問題については、前者対してはトルク位置制御系を歩行制御系に採用すればよく、後者に対しては偶力モーメントを与えるのが適当である。

本調査は、二足歩行ロボットの直進歩行での、発進→定常歩行→停止に至る、完全歩行シミュレーションの実現に非常に有効なものである。

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機械工学科高西研究室及び加藤研究室の皆様に深く感謝します。

また、本報告書を書く機会を与えて頂きました計算センター室長浅井清氏に深く感謝します。

5. お わ り に

本報告の内容を要約すると以下のようなになる。始めに近年の二足歩行ロボットに関する論文のうち特に二足歩行の運動方程式に関係があるものの抄訳を示し、以後二足歩行の運動方程式及び拘束条件について記述した。運動方程式に関しては、まず歩行系の動力学について触れ、上体補償型の歩行モデルに対する非線形干渉2階微分方程式の線形化・非干渉化手法と非線形解法について述べた。これは、既知の外力、例えば荷物を持った歩行にも適応出来る手法であり、発進から定常歩行、停止に至る完全歩行を対象としている。また、歩行パターン作成方法等についても解説を行った。

最後に実際の二足歩行ロボットWL-12を用いた歩行実験により、上体補償型動歩行の検証を行った。これにより、上体補償軌道作成アルゴリズムの有効性を確認した。また、本調査では予め計算された設定歩行パターンによるプログラム制御を行っているが、より高速な歩行を行わせる場合に生じる衝撃力やZ軸まわりのひねりの問題については、前者に対してはトルクー位置制御系を歩行制御系に採用すればよく、後者に対しては偶力モーメントを与えるのが適当である。

本調査は、二足歩行ロボットの直進歩行での、発進→定常歩行→停止に至る、完全歩行シミュレーションの実現に非常に有効なものである。

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機械工学科高西研究室及び加藤研究室の皆様に深く感謝します。

また、本報告書を書く機会を与えて頂きました計算センター室長浅井清氏に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 浅井清 他：原子力知能化システム技術の研究，私信，1988.
- 2) 浅井清・久米悦雄 他：原子力知能化システム技術の研究 -昭和63年度作業報告-，JAERI-M 89-023, 1989.
- 3) 浅井清・久米悦雄 他：原子力知能化システム技術の研究 -平成元年度作業報告-，JAERI-M 90-060, 1990.
- 4) 高西 他：上体補償型二足歩行制御方式，第26回計測自動制御学会学術講演会，1987.
- 5) 高西 他：上体補償機構を有する二足歩行ロボットWL-12の開発，第5回日本ロボット学会学術講演会，1987.
- 6) 武市・伊藤：低次元モデルによる三次元二足歩行の考案，第5回日本ロボット学会学術講演会，1987.
- 7) 若原 他：二足歩行パターン作成支援システム「WALK MASTER-4」の開発，第5回日本ロボット学会学術講演会，1987.
- 8) 五十嵐・野飼：二足歩行運動における両脚支持状態の力学解析と制御，第5回日本ロボット学会学術講演会，1987.
- 9) 米田：HC地形のための二足歩行ロボットの開発，第5回日本ロボット学会学術講演会，1987.
- 10) 梶田・谷：動的二足歩行ロボットのFrontal Plane内運動の制御，第5回日本ロボット学会学術講演会，1987.
- 11) 佐野・古荘 他：二足歩行ロボットBLR-G1の開発と制御，第5回日本ロボット学会学術講演会，1987.