

JAERI - M
93-189

2足歩行ロボットの外乱のある環境下
における歩行モデルに関する調査報告

1993年10月

加藤 一郎*・高西 淳夫*・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, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 (株)原子力資料サービス

2足歩行ロボットの外乱のある環境下における歩行モデルに関する調査報告

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

(1993年9月2日受理)

日本原子力研究所では、原子力知能化システム技術の研究テーマのもとで、2足歩行ロボットの研究を行っている。これまでに、2足歩行ロボット設計研究の観点から、直進歩行に関して種々のタイプの安定動作の解析が可能なシミュレーション・ソフトウェアを開発した。現在これに加えて、方向転換などの複雑な歩行パターンのシミュレーションを進めている。しかし、頑強な歩行を実現するためには、ロボットが歩行中に静止した物体との接触等によって受ける外力に耐える能力も必要である。そのため、このシミュレーションに必要となる種々のデータやその外乱を伴う2足歩行技術に関して調査を実施した。

本報告書は、早稲田大学における2足歩行ロボットWL-12R III及びIVの外乱のある環境下における歩行モデルに関する調査報告であり、その機械モデル、制御システム、歩行制御法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 Model Under External Force

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 September 2, 1993)

A mechanical design study of biped locomotion robots is being performed at JAERI within the scope of the Human Acts Simulation Program (HASP). The design study at JAERI is of an arbitrarily mobile robot for inspection of nuclear facilities. We have developed the simulation software which has capability of obtaining several types of stable motions for straight walking in terms of design tools. In addition, we are studying more complex walking patterns such as turning. However, in order to realize the robustness of walking, it is also necessary for the robot to have a capability of walking under external force as a disturbance which is caused by touching an object and so on. A survey has been performed for collecting useful information from already existing biped locomotion robots.

This is a survey report for the biped locomotion model under external force: the WL-12RIII/IV designed and developed at Waseda University. This report includes the machine model, control system, control method and results of walking experiments.

Keywords: HASP(Human Acts Simulation Program), Robot, Robot Design, Biped Locomotion, Machine Model, Control System, External Force

* Waseda University

目 次

1. はじめに	1
2. 機械モデル WL-12R III	1
2.1 機械ハードウェア	1
2.2 電気ハードウェア	4
2.3 歩行制御方式	4
2.4 歩行実験	21
3. 機械モデル WL-12R IV	24
3.1 機械ハードウェア	24
3.2 電気ハードウェア	28
3.3 歩行制御方式	28
3.4 歩行実験	34
4. おわりに	36
謝 辞	39
参考文献	39

Contents

1. Introduction	1
2. Machine Model WL-12RIII	1
2.1 Mechanical System	1
2.2 Computer System	4
2.3 Control Method	4
2.4 Walking Experiments	21
3. Machine Model WL-12RIV	24
3.1 Mechanical system	24
3.2 Computer System	28
3.3 Control Method	28
3.4 Walking Experiments	34
4. Concluding Remarks	36
Acknowledgements	39
References	39

1 はじめに

2足歩行ロボットの環境適応能力の一つとして、外力に対する適応能力が挙げられる。われわれは、1988年に歩行中に未知の外力が加わる環境下で安定な歩行を維持するための歩行制御方式を提案し、あらかじめ計算機シミュレーションにより作成した歩行パターンを用いてプログラム制御による歩行実験を行った結果、この歩行制御方式の有効性を確認した。

そして、1989年には、リアルタイム制御装置を搭載した2足歩行ロボットWL-12RIIIにより、腰部、進行方向に最大で大きさ100[N]、時間幅0.30[s]の矩形形状の外力が加わる環境下で0.64[s/step]の動的足踏み状態を実現した。

また、1990年には、下肢にもロール軸方向の自由度を持つ2足歩行ロボットWL-12RIVにより、腰部、横方向に最大で大きさ100[N]、時間幅0.16[s]の矩形形状の外力が加わる環境下で0.64[s/step]の動的足踏み状態を実現した。

本報告書では、2足歩行ロボットの外乱のある環境下における歩行モデルとして、これら2足歩行ロボットWL-12RIII、WL-12RIVのそれぞれの機械モデルおよび制御システムについて述べる。

2 機械モデルWL-12RIII

2.1 機械ハードウェア

機械モデルWL-12RIIIの組立図をFig.2.1に、自由度配置図をFig.2.2に示す。

本モデルの自由度構成は両脚の足首部、膝部、股部のそれぞれにピッチ軸1自由度、上体にピッチ軸およびロール軸の2自由度と合計8自由度である。上体の先端に30[kg]のおもりを搭載し、総重量103[kg]となっている。

1 はじめに

2足歩行ロボットの環境適応能力の一つとして、外力に対する適応能力が挙げられる。われわれは、1988年に歩行中に未知の外力が加わる環境下で安定な歩行を維持するための歩行制御方式を提案し、あらかじめ計算機シミュレーションにより作成した歩行パターンを用いてプログラム制御による歩行実験を行った結果、この歩行制御方式の有効性を確認した。

そして、1989年には、リアルタイム制御装置を搭載した2足歩行ロボットWL-12RIIIにより、腰部、進行方向に最大で大きさ100[N]、時間幅0.30[s]の矩形形状の外力が加わる環境下で0.64[s/step]の動的足踏み状態を実現した。

また、1990年には、下肢にもロール軸方向の自由度を持つ2足歩行ロボットWL-12RIVにより、腰部、横方向に最大で大きさ100[N]、時間幅0.16[s]の矩形形状の外力が加わる環境下で0.64[s/step]の動的足踏み状態を実現した。

本報告書では、2足歩行ロボットの外乱のある環境下における歩行モデルとして、これら2足歩行ロボットWL-12RIII、WL-12RIVのそれぞれの機械モデルおよび制御システムについて述べる。

2 機械モデルWL-12RIII

2.1 機械ハードウェア

機械モデルWL-12RIIIの組立図をFig.2.1に、自由度配置図をFig.2.2に示す。

本モデルの自由度構成は両脚の足首部、膝部、股部のそれぞれにピッチ軸1自由度、上体にピッチ軸およびロール軸の2自由度と合計8自由度である。上体の先端に30[kg]のおもりを搭載し、総重量103[kg]となっている。

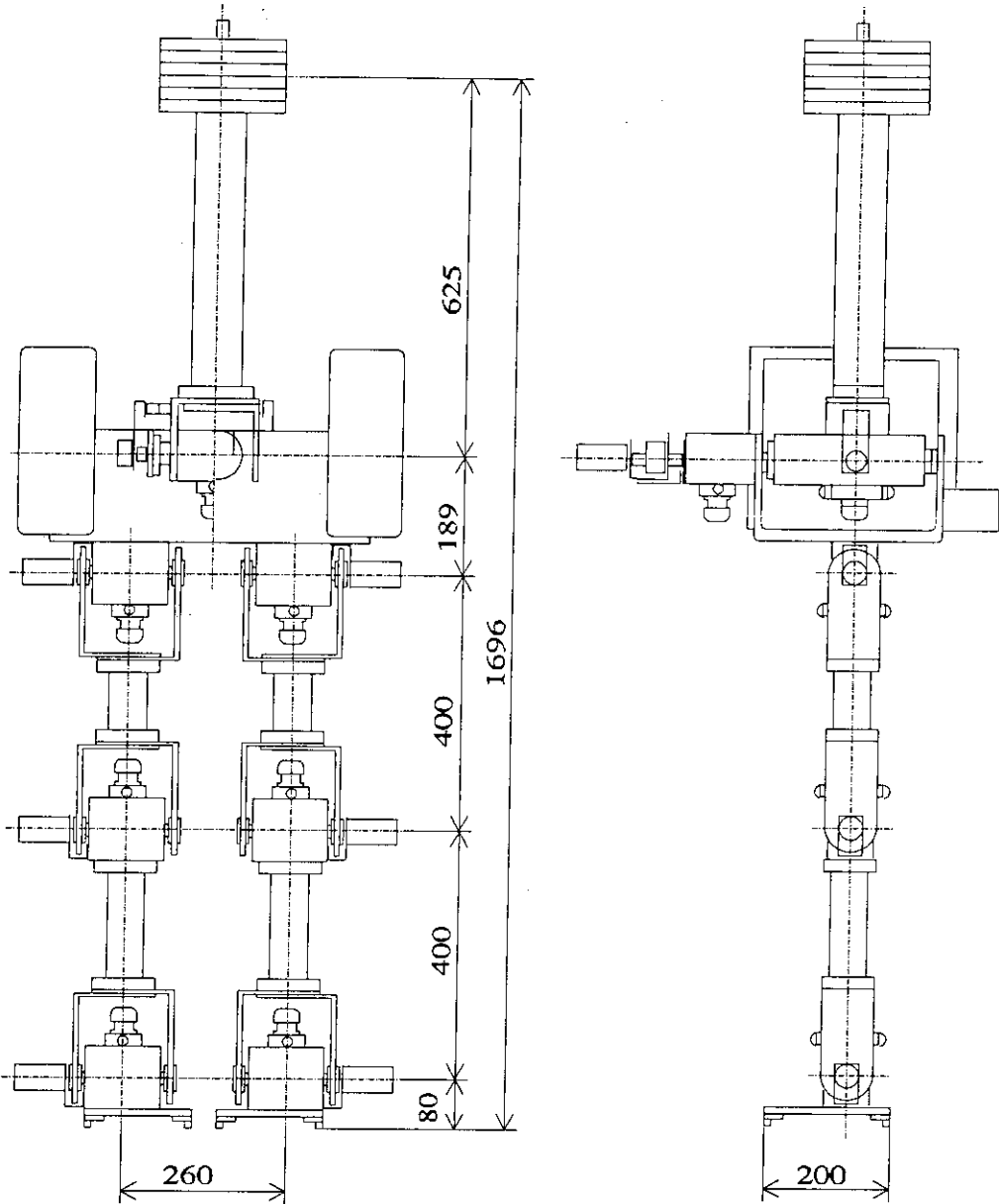


Fig.2.1 Assembly drawing of WL-12RIII

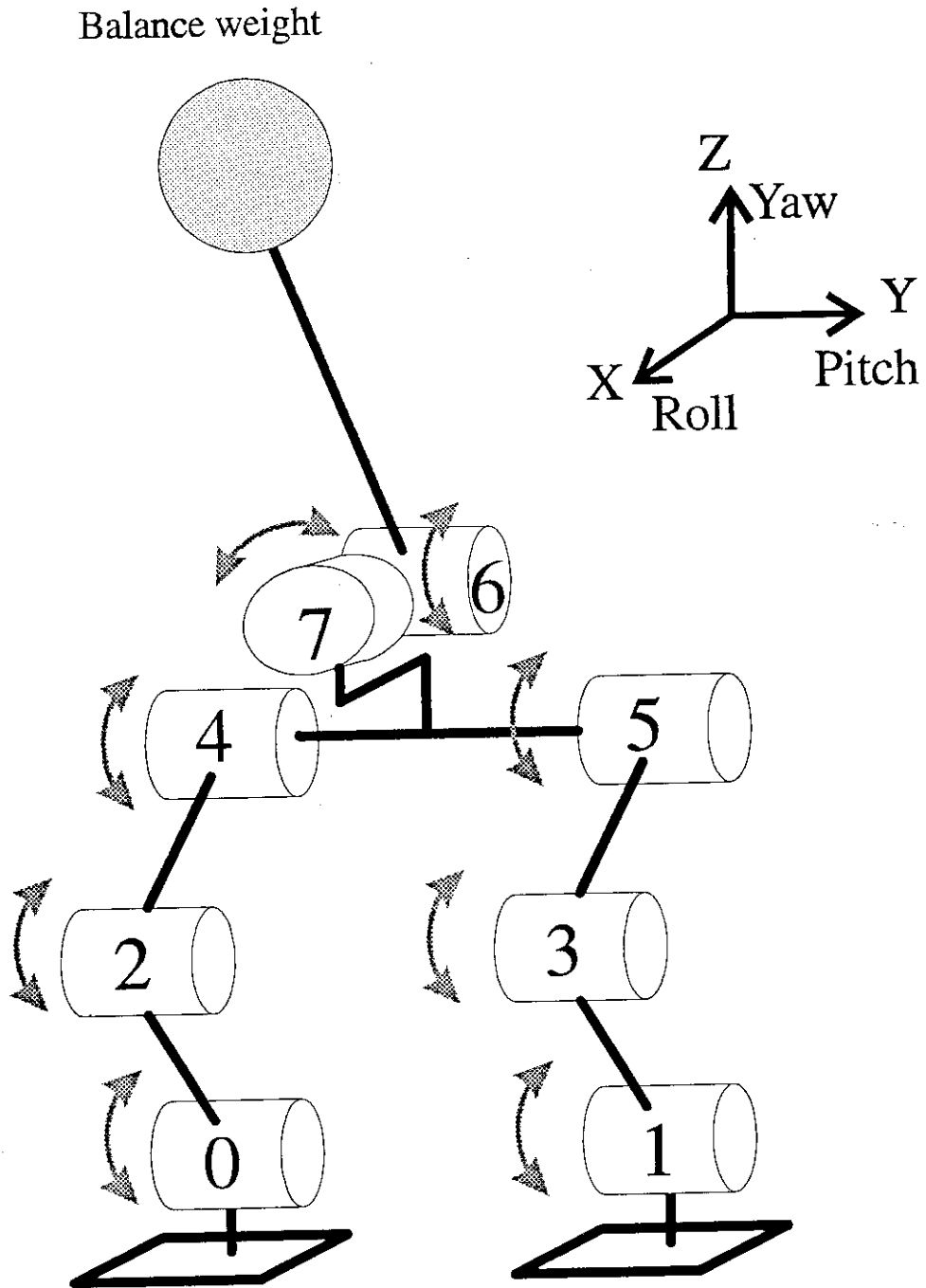


Fig.2.2 Link structure of WL-12RIII

各軸駆動用のアクチュエータには油圧式の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。

構造部材には主にCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)を用い、アクチュエータや細部にはジュラルミンを使用することで軽量化を図っている。

状態検出器としては、下肢RAの角度および角速度の検出にレゾルバ、上体RAの角度および角速度の検出にポテンショメータとタコジェネレータを備えている。また、RAの油路内に取り付けた2個の圧力センサによりRAのベーン両側の差圧を測定することでRAのトルクを検出している。

2.2 電気ハードウェア

機械モデルWL-12RIIIのコンピュータシステムの構成図をFig.2.3に、ボード間ネットワーク図をFig.2.4に示す。本システムは右脚(3自由度)、左脚(3自由度)、上体(2自由度)を個々に制御するサブボード3枚(SUBI, II, III)、外力発生装置制御ボード1枚(SUBIV)、これら4枚のサブボードを統括して全体を制御するメインボード1枚(MAIN)、外力補償歩行時にメインボードにかわってリアルタイム制御を行う高速演算ボード1枚および各ボード間の通信を行う2P-RAMボード2枚、合計8枚のボードより構成される。

このうちメインボードと各サブボードはZILOG社製の16[bit]CPUZ8002をそれぞれ1台ずつ搭載し、高速演算ボードにはINMOS社製の32[bit]CPU T802を2台搭載している。

2.3 歩行制御方式

2.3.1 未知外力

本研究で対象とする未知外力を以下のような要素を持つものとする。

[未知要素]

- ・外力の大きさ

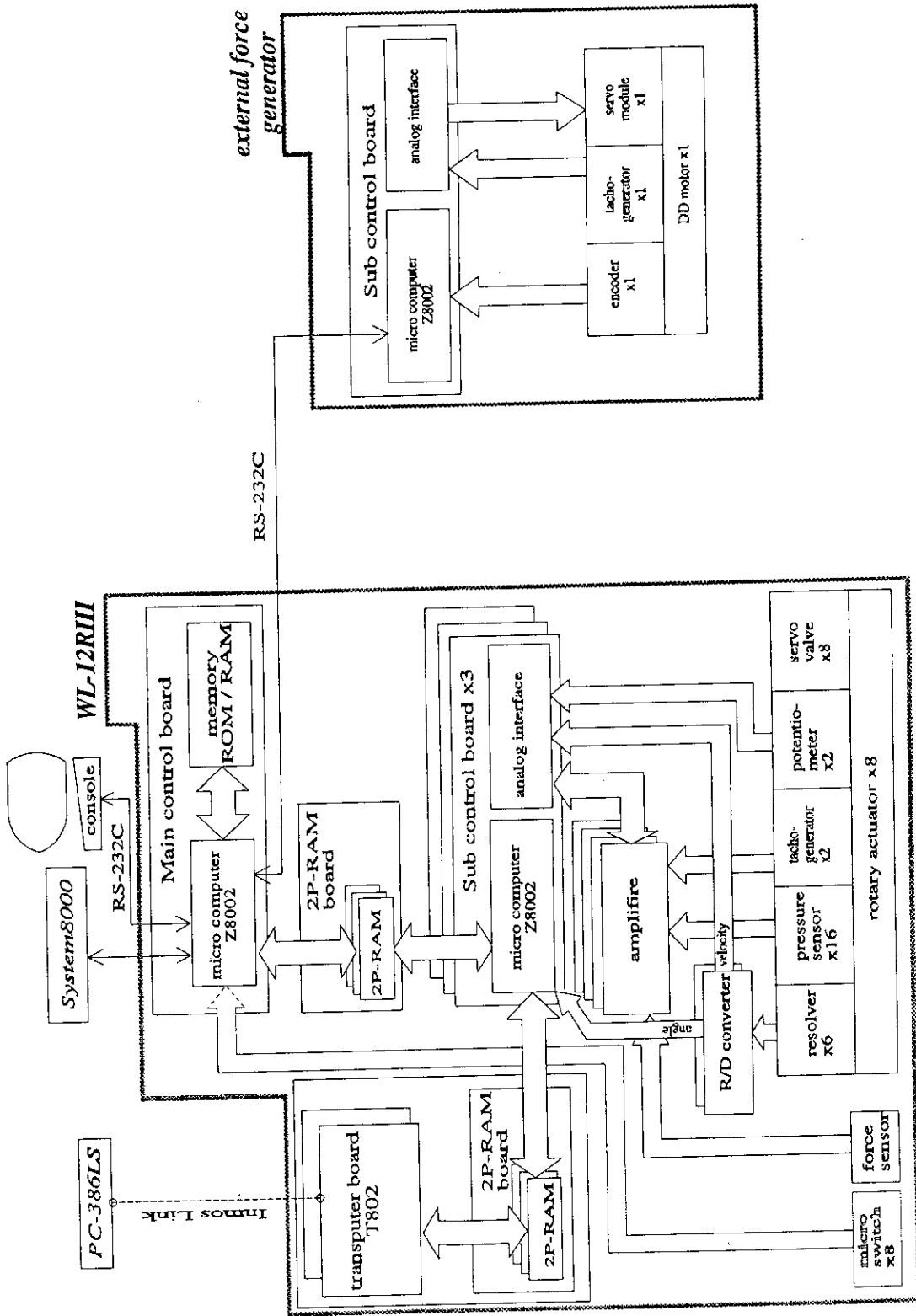


Fig.2.3 Computer system of WL-12RIII

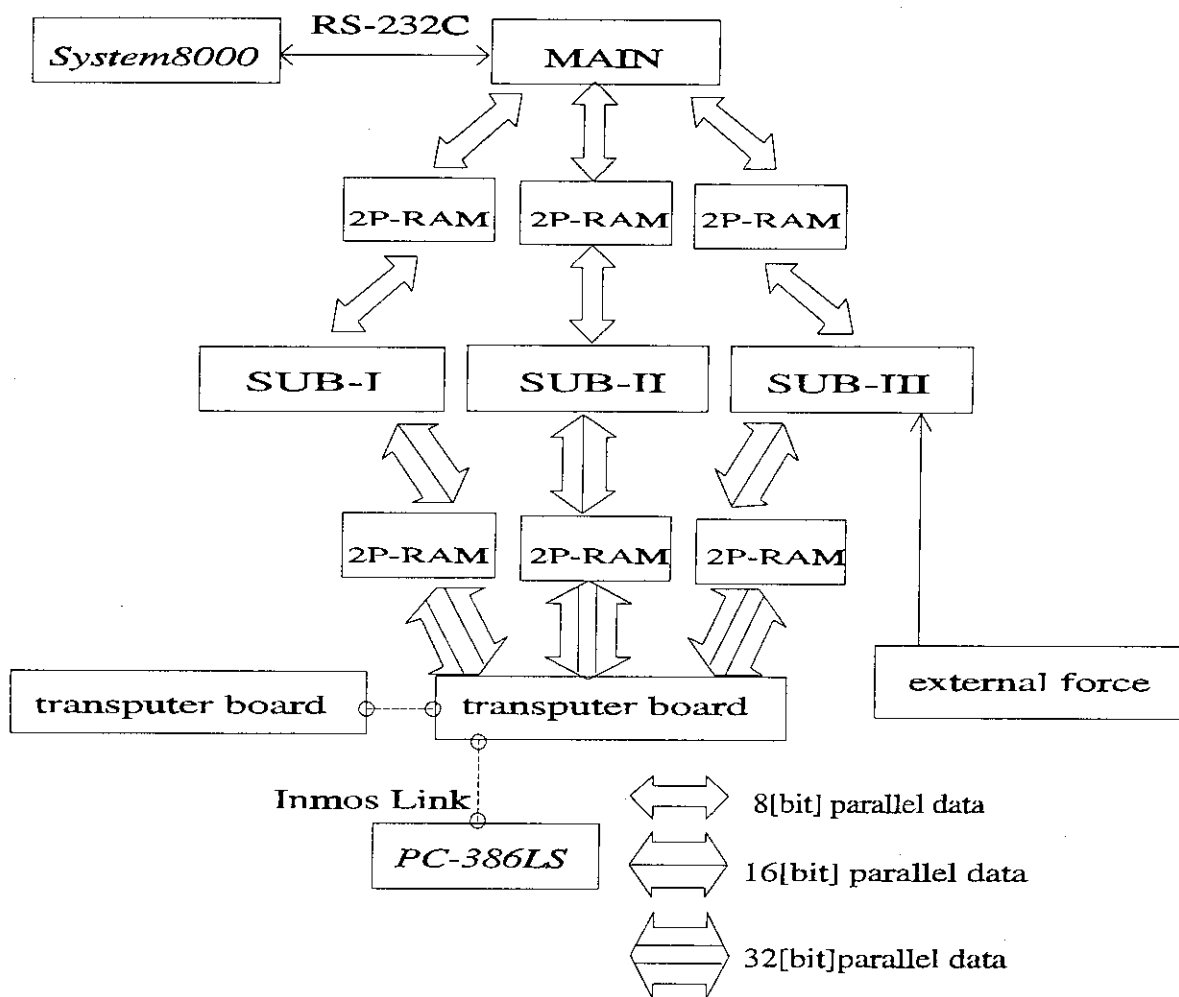


Fig.2.4 Computer network of WL-12RIII

- ・外力の形状
- ・外力の加わる時刻（ただし定常歩行中に限る）
- ・外力の加わる時間幅

[既知要素]

- ・外力の加わる位置（腰部）
- ・外力の加わる方向（進行方向）

2.3.2 ロボットのモデル化とZMP

歩行に対する安定判別としてZMP規範を用いる。

ZMPの式を導くために次のような仮定と座標設定を行う。

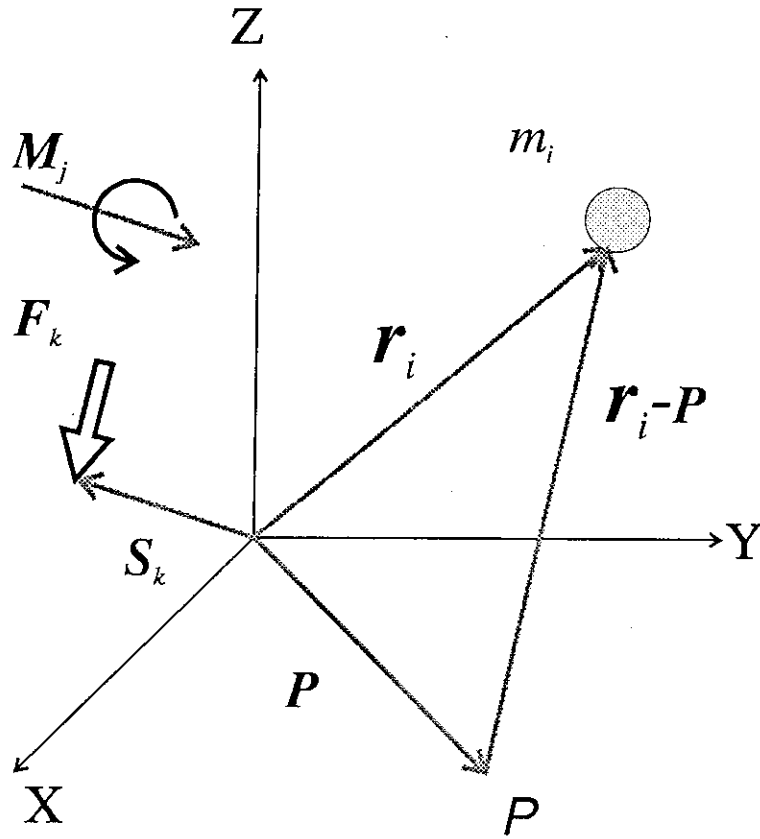
- (i) 歩行系は質点の集合よりなる。
- (ii) 路面は平面で十分に硬く、どんな力が作用しても動かない。
- (iii) X軸およびY軸を含む平面が路面に一致し、路面に垂直な軸をZ軸とする直交座標系O（右手系）を設定する。
- (iv) 歩行系と路面との接地状況は点接地の集合とする。
- (v) 路面での並進（X軸およびY軸）に対する摩擦係数は十分に大きく、すべりを生じない。
- (vi) 接地点における、路面での回転（X軸およびY軸まわり）に対する摩擦係数は無視できるほど小さい。

以上の仮定をもとに、絶対座標系Oに対してZMPを求める式を次のようにして導いた。

まず、各ベクトルをFig.2.5のように設定すると、路面上の任意の点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次のようになる。

$$(2.1) \quad \sum_i m_i (\ddot{\mathbf{r}}_i - \mathbf{P}) \times (\dot{\mathbf{r}} + \mathbf{G}) + \mathbf{T} - \sum_j \mathbf{M}_j - \sum_k (\mathbf{S}_k - \mathbf{P}) \times \mathbf{F}_k = \mathbf{0}$$

式(2.1)を変形し成分別にすると次の式(2.2)を得る。



- m_i : mass of particle i
- $r_i = [x_i, y_i, z_i]$: position vector of particle i
- $P = [x_p, y_p, 0]$: 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
- $M_j = [M_{jx}, M_{jy}, M_{jz}]$: external moment j
- $F_k = [F_{kx}, F_{ky}, F_{kz}]$: external force k
- $S_k = [x_{sk}, y_{sk}, z_{sk}]$: position vector where external force k is put

Fig.2.5 Definition of vectors for walking system

$$(2.2)$$

$$T_x = -\sum_i m_i \left\{ (y_i - y_p)(\ddot{z}_i + g_z) - z_i(\ddot{y}_i + g_y) \right\}$$

$$+ \sum_j M_{xj} + \sum_k \left\{ (y_{sk} - y_p)F_{zk} - z_{sk}F_{yk} \right\}$$

$$T_y = -\sum_i m_i \left\{ z_i(\ddot{x}_i + g_x) - (x_i - x_p)(\ddot{z}_i + g_z) \right\}$$

$$+ \sum_j M_{yj} + \sum_k \left\{ z_{sk}F_{xk} - (x_{sk} - x_p)F_{zk} \right\}$$

$$T_z = -\sum_i m_i \left\{ (x_i - x_p)(\ddot{y}_i + g_y) - (y_i - y_p)(\ddot{x}_i + g_x) \right\}$$

$$+ \sum_j M_{zj} + \sum_k \left\{ (x_{sk} - x_p)F_{yk} - (y_{sk} - y_p)F_{xk} \right\}$$

定義よりZMPは路面上のトルクが作用しない点であるので式(2.2)において

$$(2.3)$$

$$T_x = T_y = 0$$

となる点がZMPである。すなわち、

$$(2.4)$$

$$x_p = X_{ZMP}$$

$$y_p = Y_{ZMP}$$

$$(z_p = 0)$$

と表せる。これよりZMP方程式は、次のようになる

$$(2.5)$$

$$X_{ZMP} = \frac{\sum_i m_i \left\{ (\ddot{z}_i + g_z)x_i - (\ddot{x}_i + g_x)z_i \right\} + \sum_j M_{yj} + \sum_k (z_{sk}F_{xk} - x_{sk}F_{zk})}{\sum_i m_i(\ddot{z}_i + g_z) - \sum_k F_{zk}}$$

$$Y_{ZMP} = \frac{\sum_i m_i \left\{ (\ddot{z}_i + g_z)y_i - (\ddot{y}_i + g_y)z_i \right\} + \sum_j M_{xj} + \sum_k (y_{sk}F_{zk} - z_{sk}F_{yk})}{\sum_i m_i(\ddot{z}_i + g_z) - \sum_k F_{zk}}$$

ここでロボット各部の相対運動を考えるためにFig.2.6のようにロボットの腰部に並進運動座標系 $\overline{W} - \overline{X} \overline{Y} \overline{Z}$ を設け、また絶対運動座標系 $O - XYZ$ に対する運動座標系 \overline{W} の原点の座標を $Q(x_q, y_q, z_q)$ とする。(式(2.6))

$$(2.6) \quad \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_q \\ y_q \\ z_q \end{pmatrix}$$

この式(2.6)を式(2.5)に代入すると、運動座標系に対するZMP方程式が導かれる。(式(2.7))

$$(2.7) \quad \bar{X}_{ZMP} = \frac{\sum_i m_i \{ (\ddot{\bar{z}}_i + \ddot{z}_q + g_z) \bar{x}_i - (\ddot{\bar{x}}_i + \ddot{x}_q + g_x) (\bar{z}_i + z_q) \}}{\sum_i m_i (\ddot{\bar{z}}_i + \ddot{z}_q + g_z) - \sum_k F_{zk}} + \frac{\sum_j M_{yj} + \sum_k \{ (\bar{z}_{sk} + z_q) F_{zk} - \bar{x}_{sk} F_{zk} \}}{\sum_i m_i (\ddot{\bar{z}}_i + \ddot{z}_q + g_z) - \sum_k F_{zk}}$$

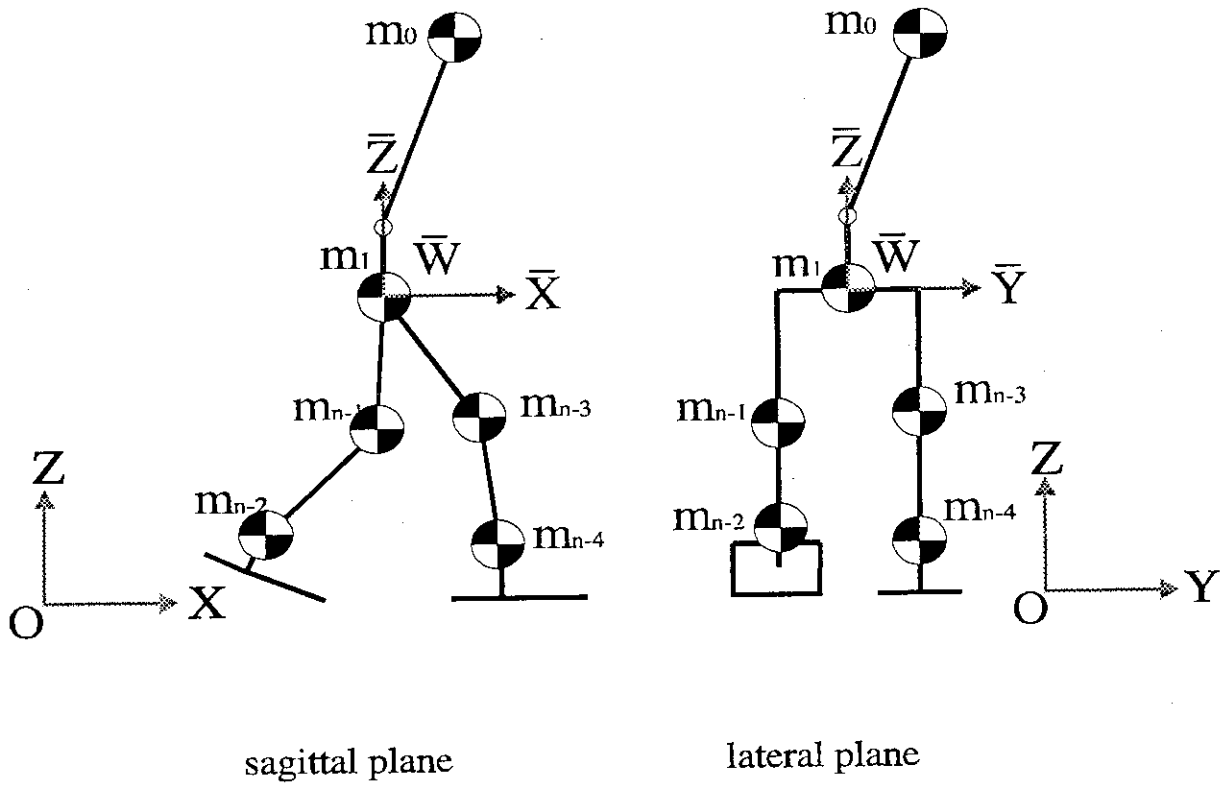
$$\bar{Y}_{ZMP} = \frac{\sum_i m_i \{ (\ddot{\bar{z}}_i + \ddot{z}_q + g_z) \bar{y}_i - (\ddot{\bar{y}}_i + \ddot{y}_q + g_y) (\bar{z}_i + z_q) \}}{\sum_i m_i (\ddot{\bar{z}}_i + \ddot{z}_q + g_z) - \sum_k F_{zk}} + \frac{\sum_j M_{xj} + \sum_k \{ \bar{y}_{sk} F_{zk} - (\bar{z}_{sk} + z_q) F_{yk} \}}{\sum_i m_i (\ddot{\bar{z}}_i + \ddot{z}_q + g_z) - \sum_k F_{zk}}$$

2.3.3 未知外力に対応した歩行制御方式

未知外力に対応した歩行制御方式の要点は次の3点である。

- (1) 未知外力が加わるまでは、予め作成しておいた設定歩行パターンを用いたプログラム制御による歩行を行う。
- (2) 歩行中に未知外力が加えられた場合には、まずZMPが設定ZMPと一致するように上体運動による補償を行う。
- (3) 上体軌道の発散を防ぐために、歩幅を変えて設定ZMP自体を変更することで上体軌道を収束させ、もとの歩行に復帰する。

この歩行制御方式の概略をFig.2.7に示す。



$\bar{W}-\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$: moving coordinate
 $O-XYZ$: fixed coordinate

Fig.2.6 Modeling of a biped walking robot having a trunk

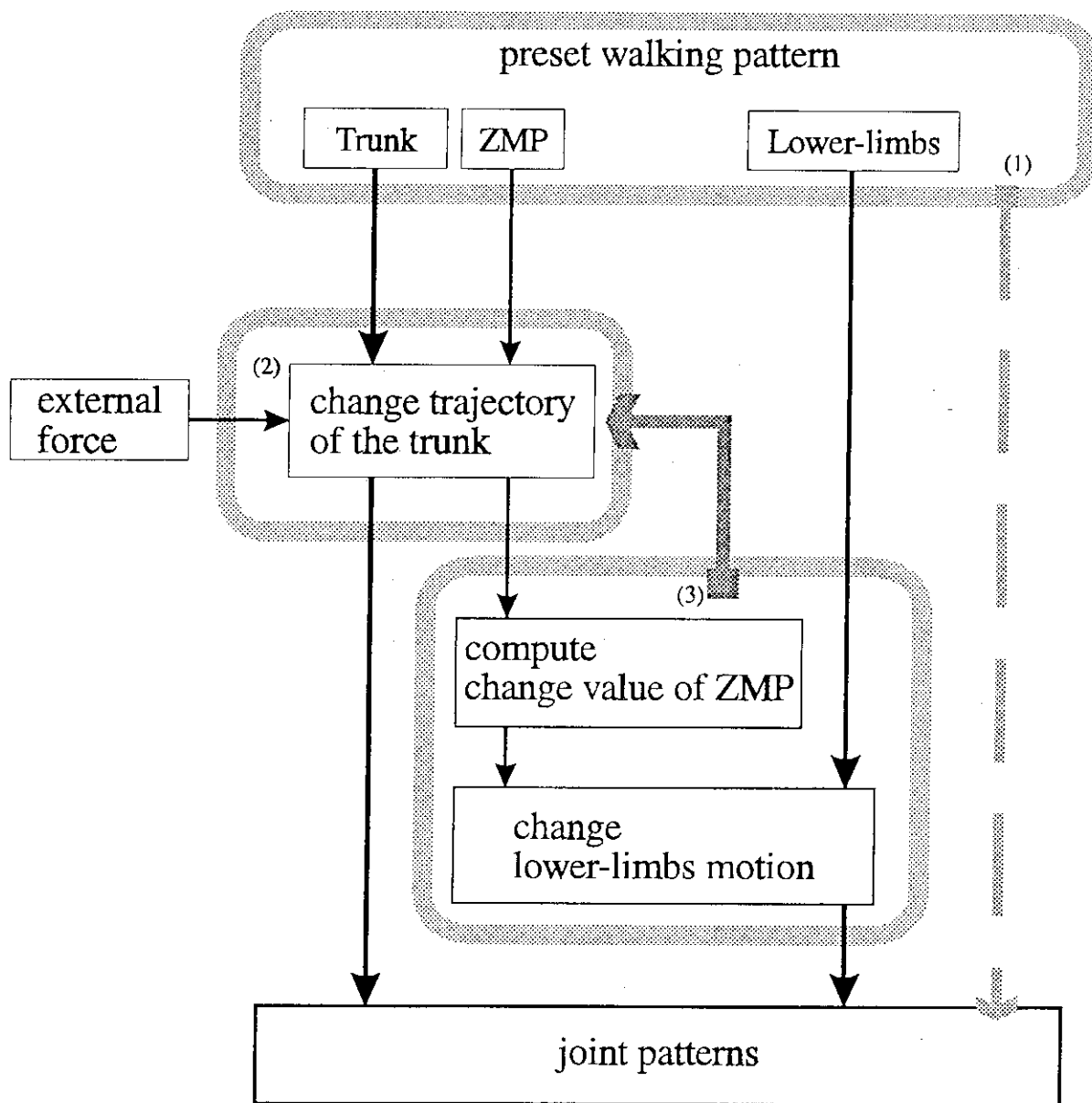


Fig.2.7 Outline of the control method

2.3.4 上体補償軌道の算出

未知外力に対応してZMPを設定ZMPと一致させるような上体補償軌道の算出アルゴリズムについて以下に述べる。本アルゴリズムは任意の位置と方向に加わる外力あるいは外力モーメントに対して有効である。Fig.2.8にフローチャートを示す。

まず運動座標系に対するZMP方程式(2.7)について、上体の運動に関する項を変数項として左辺に、またそれ以外の項を強制項として右辺にまとめると式(2.8)を得る。(ただし、重力加速度を $G=[0, 0, g]$ とする。)

$$(2.8)$$

$$\bar{z}_0 \ddot{x}_q + \ddot{z}_0 \bar{X}_{ZMP} + (\bar{z}_0 + z_q) \ddot{x}_0 - (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_q + g) \bar{x}_0 = \Phi(t)$$

$$\bar{z}_0 \ddot{y}_q + \ddot{z}_0 \bar{Y}_{ZMP} + (\bar{z}_0 + z_q) \ddot{y}_0 - (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_q + g) \bar{y}_0 = \Psi(t)$$

ここで、WL-12RIIIの上体機構より、上体を表わす各変数をFig.2.9のように定めると、上体の質点の座標は次のように表される。

$$(2.9)$$

$$\bar{x}_0 = \alpha \sin \theta_p$$

$$\bar{y}_0 = -\alpha \cos \theta_p \sin \theta_r$$

$$\bar{z}_0 = \alpha \cos \theta_p \sin \theta_r + \alpha_0$$

これを式(2.8)に代入すると式(2.10)を得る。

$$(2.10)$$

$$f(\ddot{\theta}_p, \dot{\theta}_p, \theta_p, \ddot{\theta}_r, \dot{\theta}_r, \theta_r) = \Phi(t)$$

$$g(\ddot{\theta}_p, \dot{\theta}_p, \theta_p, \ddot{\theta}_r, \dot{\theta}_r, \theta_r) = \Psi(t)$$

この式を $\dot{\theta}$ について解き、 $\dot{\theta}$ 、 θ を初期値として数値積分(4次のルンゲクッタ法)することにより、上体補償軌道 $\theta_p(t)$ 、 $\theta_r(t)$ がそれぞれ求められる。

ところで、ここで対象としている未知外力について、外力の加えられる方向は進行方向で既知としているため、補償運動は上体ピッチ軸軌道の変更のみで行うこととし、上体ロール軸軌道については、設定パターンそのままとする。

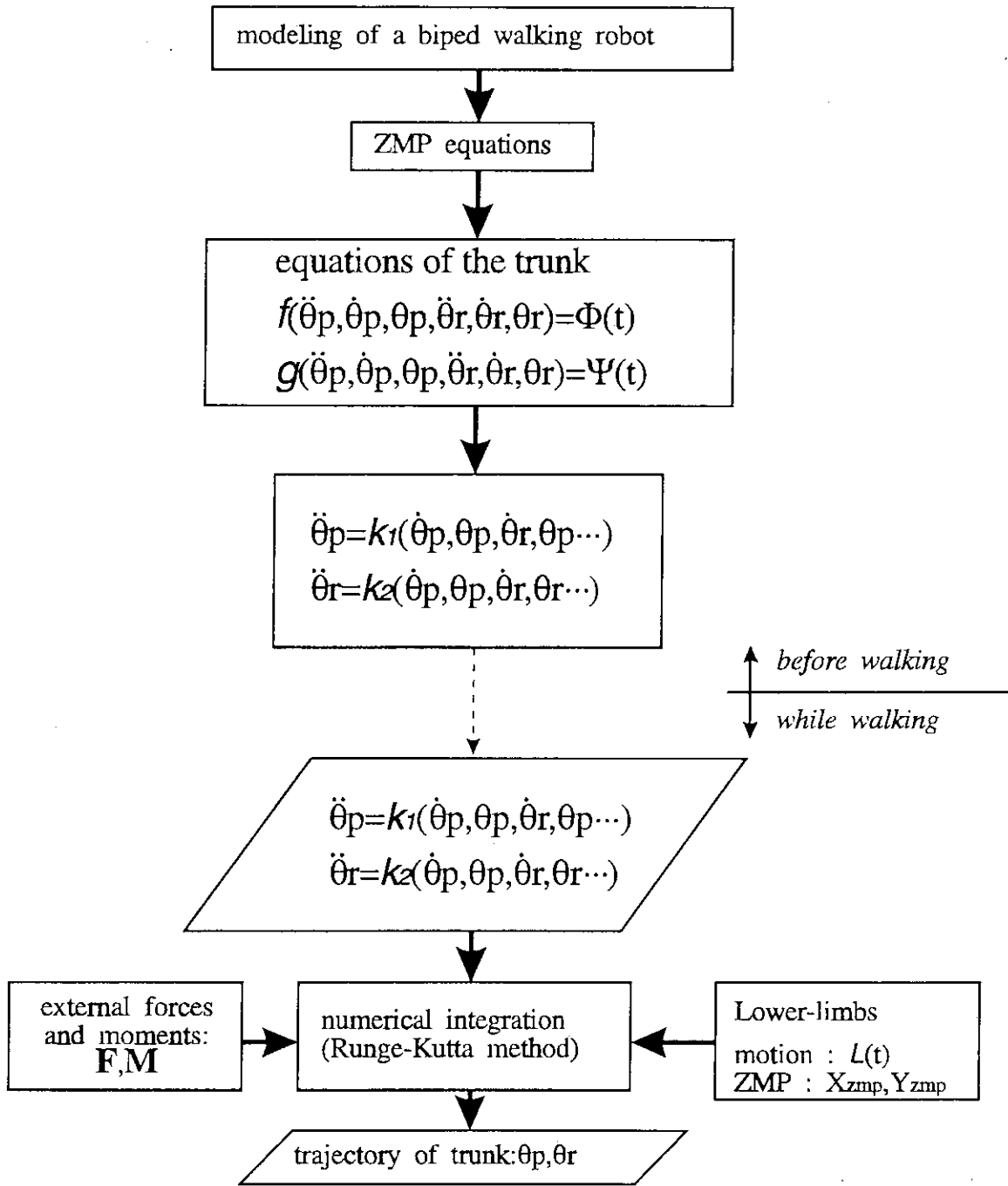


Fig.2.8 Flow-chart to compute the trunk motion

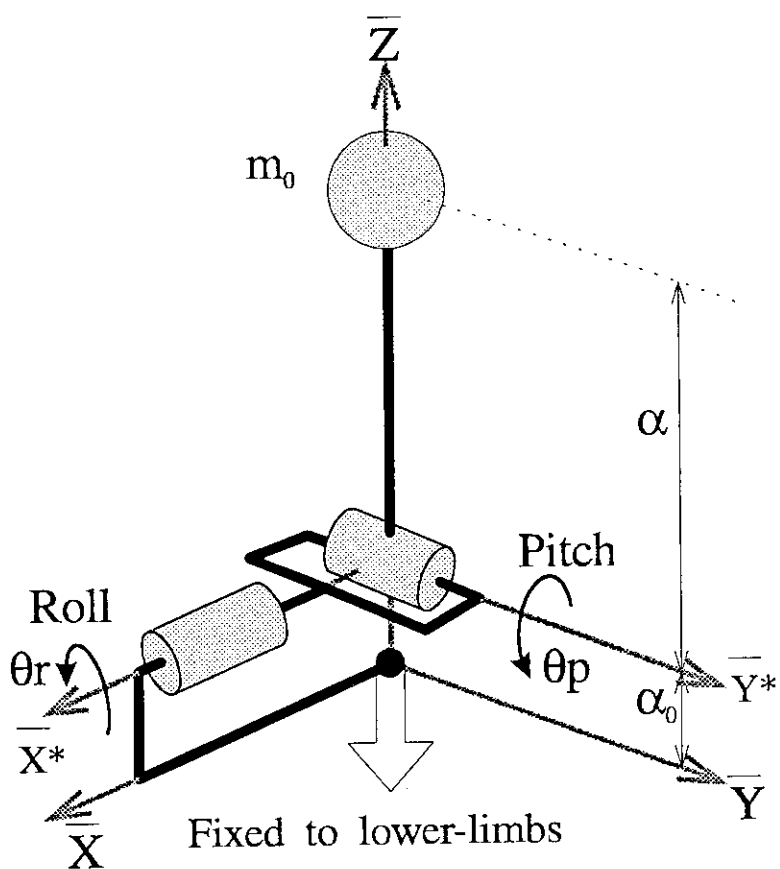


Fig.2.9 Structure of the trunk

ただし、このままでは上体軌道が発散してしまうため、もとの歩行状態に戻すためには何らかの方法で上体軌道を収束させなければならない。そこで設定ZMPそのものを変更して上体軌道を収束させる方法について以下に述べる。

2.3.5 ZMP変更量の算出

上体軌道を収束させるために、着地点を変えて設定ZMPを変更する。このZMP変更量を算出するため、ロボットを上体と腰の2質点に単純化したモデルを考える。(Fig.2.10) ZMP変更量算出アルゴリズムのフローチャートをFig.2.11に示す。

この2質点モデルについてのZMP方程式は式(2.11)のようになる。

$$(2.11)$$

$$\bar{X}_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^1 m_i \{ (\ddot{z}_i + \ddot{z}_q + g) \bar{x}_i - (\ddot{x}_i + \ddot{x}_q) (\bar{z}_i + z_q) \}}{\sum_{i=0}^1 m_i (\ddot{z}_i + \ddot{z}_q + g)}$$

$$\bar{Y}_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^1 m_i \{ (\ddot{z}_i + \ddot{z}_q + g) \bar{y}_i - (\ddot{y}_i + \ddot{y}_q) (\bar{z}_i + z_q) \}}{\sum_{i=0}^1 m_i (\ddot{z}_i + \ddot{z}_q + g)}$$

ここで、腰は等速直線運動をし、上体はZ軸方向に運動しないと仮定してX方向の式を線形化すると式(2.12)を得る。

$$(2.12)$$

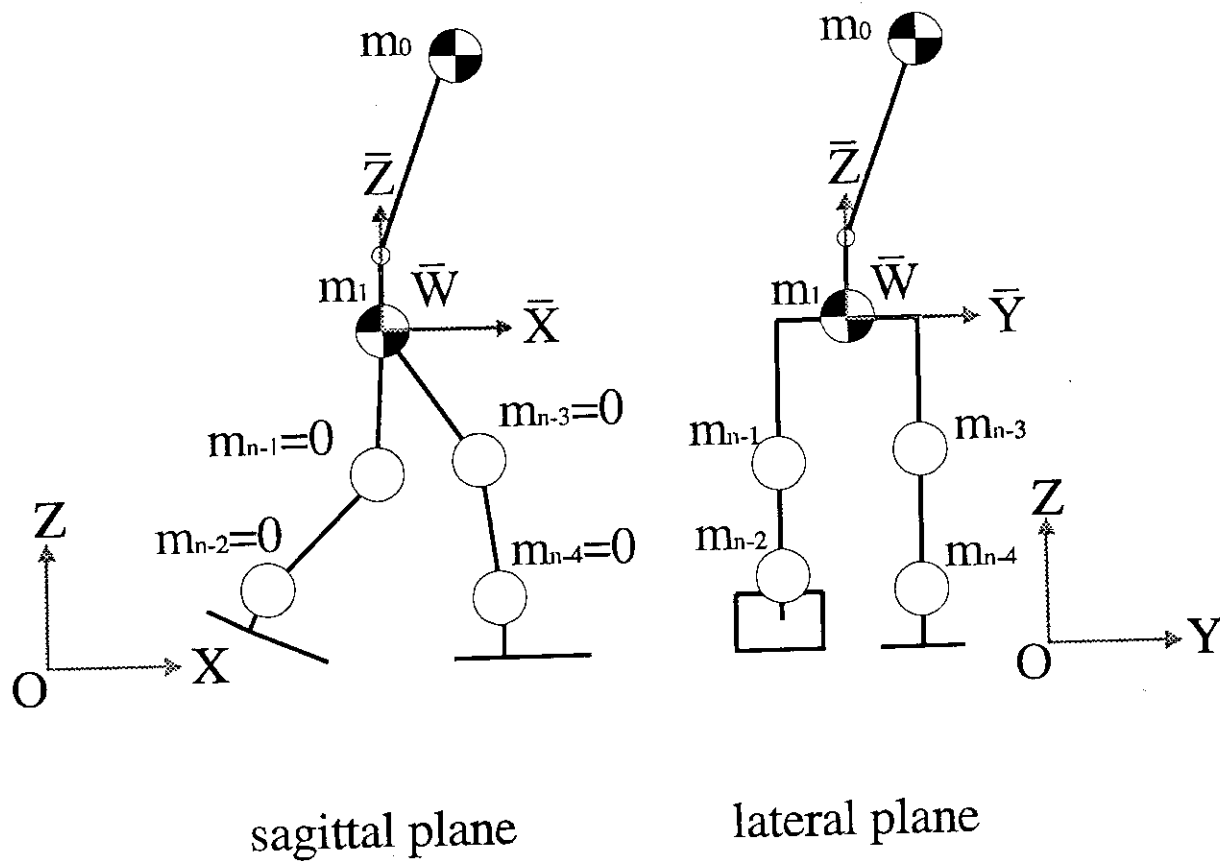
$$m_0 (\bar{z}_0 + z_q) \ddot{\bar{x}}_0 - m_0 g \bar{x}_0 + m_1 (\bar{z}_1 + z_q) \ddot{\bar{x}}_1 - m_1 g \bar{x}_1 = -(m_0 + m_1) g \bar{X}_{ZMP}$$

次に、設定パターンに対する上体の偏差を $\Delta \bar{x}_0$ 、ZMP変更量を $\Delta \bar{X}_{ZMP}$ とすると、

式(2.13)の偏差に関する微分方程式を得る。

$$(2.13)$$

$$m_0 (\bar{z}_0 + z_q) \Delta \ddot{\bar{x}}_0 - m_0 g \Delta \bar{x}_0 = -(m_0 + m_1) g \Delta \bar{X}_{ZMP}$$



$\bar{W}-\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$: moving coordinate

$O-XYZ$: fixed coordinate

Fig.2.10 Two-particle model of a biped walking robot

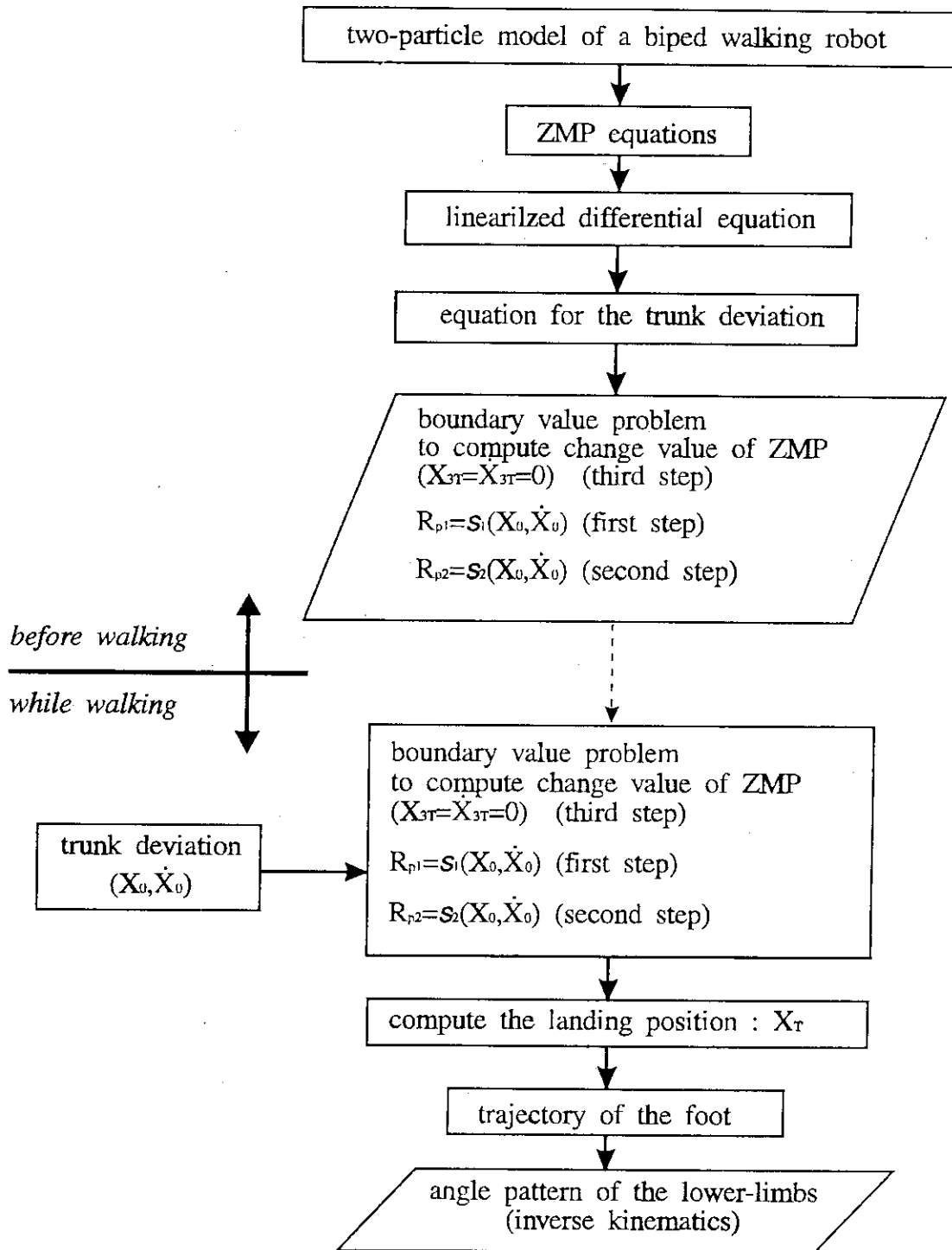


Fig.2.11 Flow-chart to compute change value of ZMP

この微分方程式の解は次のように表せる。

(2.14)

$$X = \frac{A(X_0 + R_p/A^2) + \dot{X}_0}{2A} e^{At} + \frac{A(X_0 + R_p/A^2) - \dot{X}_0}{2A} e^{-At} - \frac{R_p}{A^2}$$

$$\dot{X} = \frac{A(X_0 + R_p/A^2) + \dot{X}_0}{2} e^{At} - \frac{A(X_0 + R_p/A^2) - \dot{X}_0}{2} e^{-At}$$

$$\left(\begin{array}{l} X = \Delta \bar{x}_0 \\ A^2 = \frac{g}{(\bar{z}_0 + z_q)} \\ R_p = \frac{-(m_0 + m_1)g\Delta \bar{X}_{ZMP}}{m_0(\bar{z}_0 + z_q)} \\ X_0 = X|_{t=0}, \dot{X}_0 = \dot{X}|_{t=0} \end{array} \right)$$

この式は、ある時刻における上体の偏差 (X, \dot{X}_0) が与えられた場合の t 秒後の上体偏差を表している。

そこで、式(2.14)より3歩目の上体偏差(位置および速度)が0となるように境界値問題を解いて1歩目と2歩目のZMP変更量を求める。

いま、時刻 $t=t_0$ の時の上体偏差がそれぞれ X_{t_0}, \dot{X}_{t_0} で与えられた場合、1歩目、2歩目、3歩目の上体偏差 X_T, X_{2T}, X_{3T} はそれぞれ式(2.15)のようになる。

ここで T は1歩の時間すなわち半歩行周期である。また R_p, R_{p1}, R_{p2} はそれぞれ遊脚着地前、1歩目、2歩目のZMP変更量を示す。ただし、遊脚着地以前に設定ZMPを変更することは不可能なので $R_p = 0$ である。

この3歩目の上体偏差 (X_{3T}, \dot{X}_{3T}) が0となるように R_{p1}, R_{p2} を求めることで、1歩目と2歩目のZMP変更量が決定される。(式2.15)

(2.15)

$$X_T = \frac{A(X_{t_0} + R_p/A^2) + \dot{X}_{t_0}}{2A} e^{A(T-t_0)} + \frac{A(X_{t_0} + R_p/A^2) - \dot{X}_{t_0}}{2A} e^{-A(T-t_0)} - \frac{R_p}{A^2}$$

$$\dot{X}_T = \frac{A(X_{t_0} + R_p/A^2) + \dot{X}_{t_0}}{2} e^{A(T-t_0)} - \frac{A(X_{t_0} + R_p/A^2) - \dot{X}_{t_0}}{2} e^{-A(T-t_0)}$$

$$X_{2T} = \frac{A(X_T + R_{p1}/A^2) + \dot{X}_T}{2A} e^{AT} + \frac{A(X_T + R_{p1}/A^2) - \dot{X}_T}{2A} e^{-AT} - \frac{R_{p1}}{A^2}$$

$$\dot{X}_{2T} = \frac{A(X_T + R_{p1}/A^2) + \dot{X}_T}{2} e^{AT} - \frac{A(X_T + R_{p1}/A^2) - \dot{X}_T}{2} e^{-AT}$$

$$X_{3T} = \frac{A(X_{2T} + R_{p2}/A^2) + \dot{X}_{2T}}{2A} e^{AT} + \frac{A(X_{2T} + R_{p2}/A^2) - \dot{X}_{2T}}{2A} e^{-AT} - \frac{R_{p2}}{A^2}$$

$$\dot{X}_{3T} = \frac{A(X_{2T} + R_{p2}/A^2) + \dot{X}_{2T}}{2} e^{AT} - \frac{A(X_{2T} + R_{p2}/A^2) - \dot{X}_{2T}}{2} e^{-AT}$$

2.3.6 下肢軌道の変更

前項より決定されたZMP変更量をもとにして下肢軌道を変更する。このときに注意することは次の2点である。

(1) 下肢の各質点は滑らかな運動をする。

(2) 遊脚が着地する際には、路面との相対速度を出来るだけ小さくして、着地の衝撃を緩和する。

1歩目のZMP変更量 R_{p1} より遊脚の着地目標位置 X_p は次のように求められる。

(2.16)

$$X_p = -\frac{m_0(\bar{z}_0 + z_q)}{(m_0 + m_1)g} R_{p1}$$

また着地までの軌道は、この X_p から式(2.17)を用いて求める。

(2.17)

$$x_{i+1} = -x_{i-1} + 2x_i + \ddot{x}_i dt^2$$

$$\ddot{x}_i = k_p \frac{(x_p - x_i)}{dt(p-i)} + k_v (\dot{x}_p - \dot{x}_i) \quad (x_p = X_p, \dot{x}_p = 0)$$

ここで、 x_i は*i*相目の足首部X座標を表わし、着地は*p*相目に行われるものとする。また、 k_p 、 k_v はそれぞれ位置および速度のゲインである。

しかし、着地の寸前に着地目標位置が大きく変更されると、路面に対する相対速度が大きくなって、着地の衝撃によって歩行が不安定になることが考えられる。そこで、着地前のある期間に限り、あえて着地目標位置を変更せずに一定とすることによってこの問題を回避する。

計算機シミュレーションによる検討の結果、式(2.17)に与える制御パラメータとして、 $k_p=0.7$ 、 $k_v=0.3$ とし、また着地前の6相の間は着地目標位置を一定とすることにした。

2.4 歩行実験

2.4.1 実験目的

2足歩行ロボットWL-12RIIIを用いて、リアルタイム制御により進行方向の未知外力が加わる環境下での安定な動的足踏み状態を実現し、システムの有効性を確認する。

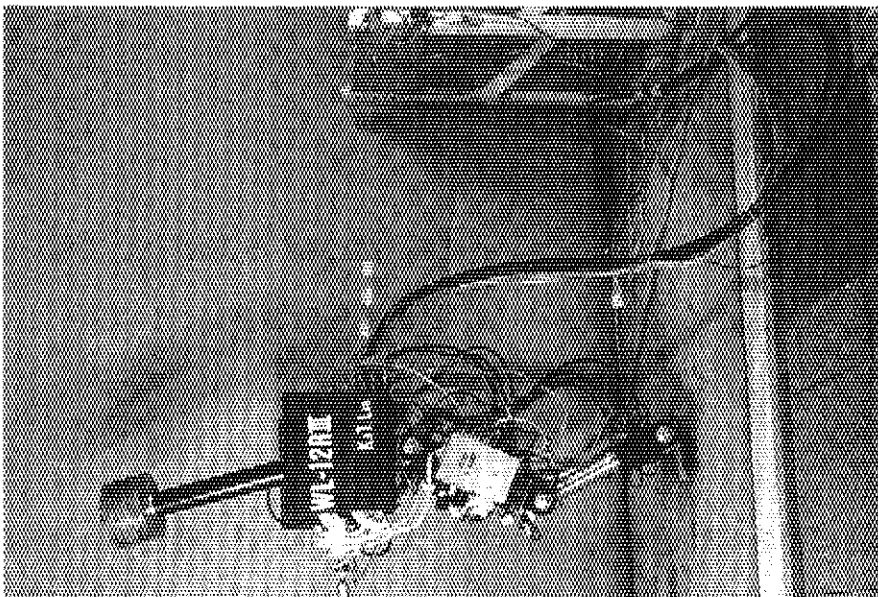
2.4.2 実験方法

Photo2.1に歩行実験の様子を示す。ロボットに外力を加える方法としては、(a)外力発生装置を用いる、(b)人がひもで引っ張る、の2通りの場合について行う。

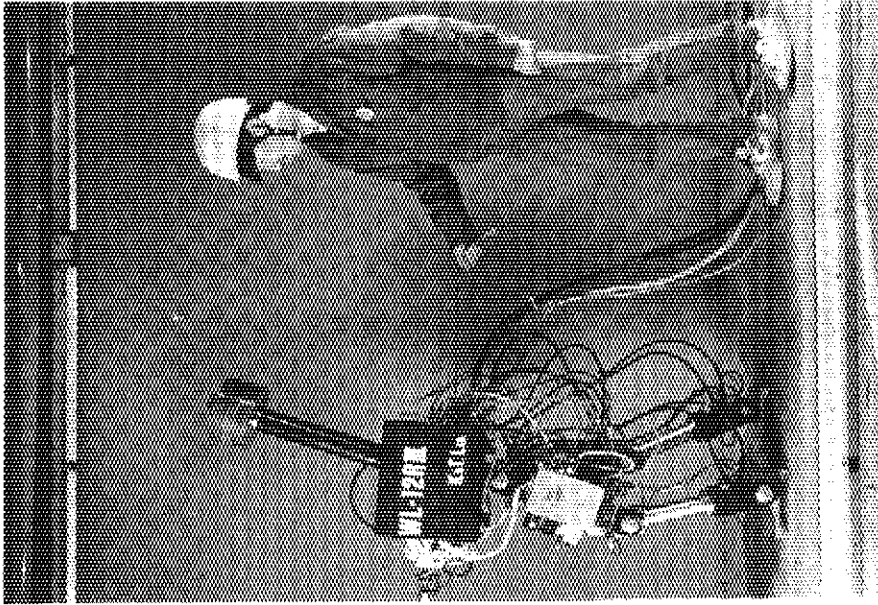
2.4.3 実験結果

リアルタイム制御による実験の結果、最大で、大きさ100[N]、時間幅0.30[s]の進行方向の外力の加わる環境下において、0.64[s/step]の動的足踏み状態を実現した。

また歩行動作中に2～3度に渡って加えられた外力についても補償可能であることを確認した。

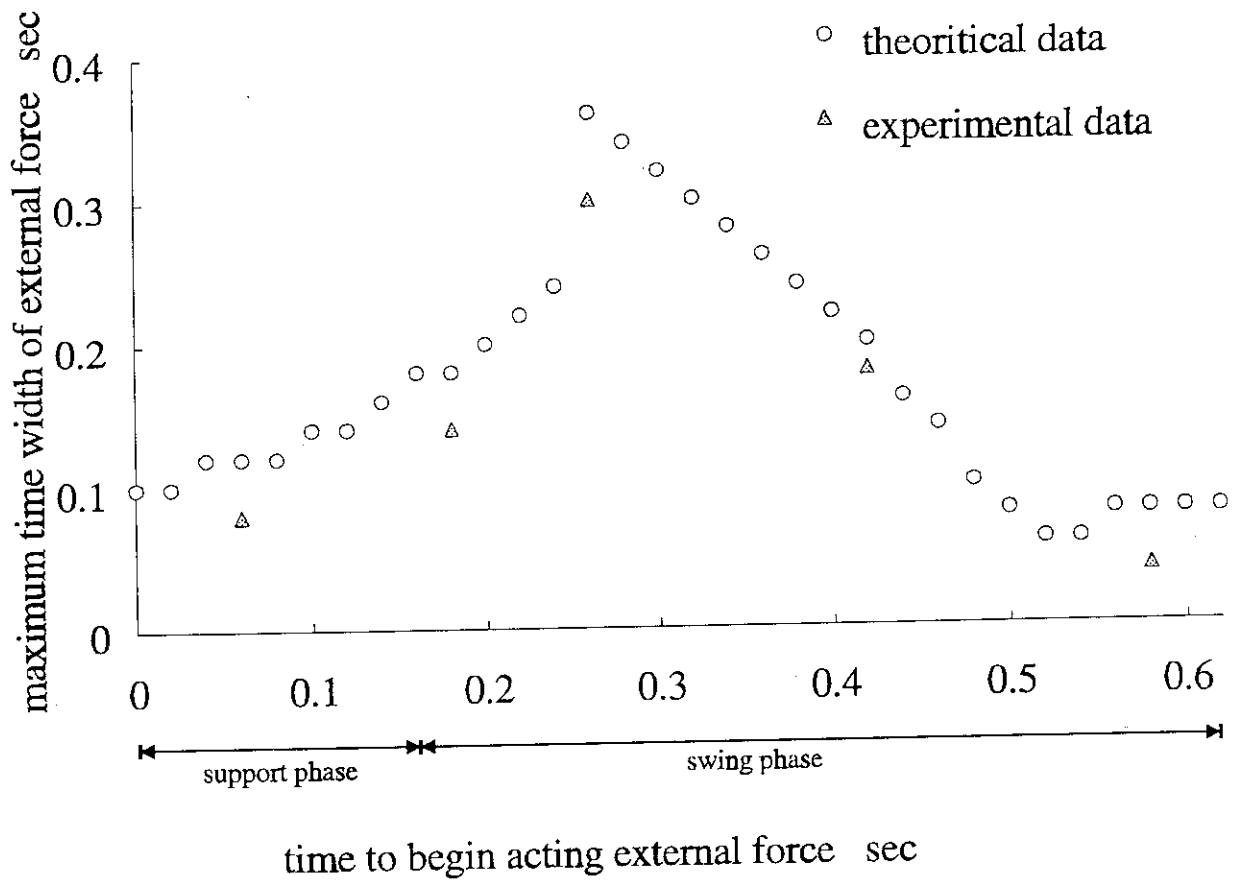


(a) External force added by a DD motor



(b) External force added by a human

photo 2.1 Walking experiment



stepping motion : 0.64[sec/step]
 force strength : 100[N]

Fig.2.12 Relation between time width of the external force
 and time to begin acting external force

100[N]の大きさの外力について、外力を加える時刻と補償可能な時間幅の関係をFig.2.12に示す。

また実験に際しては、足首部にコンプライアンスを持たせて、足底の接地状態が路面にならうようにすると安定な補償動作が実現できることが確認された。

3 機械モデルWL-12RIV

3.1 機械ハードウェア

機械モデルWL-12RIVの組立図をFig.3.1に、自由度配置図をFig.3.2に示す。

本モデルはWL-12RIIIの下肢にロール軸方向の自由度を増設して、横方向の外力に対応できるようにしたものであり、下肢に8自由度、上体に2自由度の合計10自由度を有している。下肢の股部にロール軸2自由度を増設したことにともない、機械モデルの総重量はWL-12RIIIの103[kg]から120[kg]に増加した。各自由度は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により駆動される。下肢ピッチ軸の6自由度はレゾルバ、上体3自由度および下肢ロール軸2自由度はポテンショメータとタコジェネレータの組み合わせによって、各RAの角度および角速度を検出している。またRAの油路に2個の圧力センサを取り付けてベーン両側の差圧を測定することによってRAの出力トルクを検出している。

なお、股部にロール軸方向の自由度を増設することによって、足部にもロール軸方向の自由度が必要である。しかし、足部にアクチュエータを増設することで生じる重量増加は歩行を不安定化する要因となる。そこで、足部にアクチュエータを取り付ける代わりに、2枚のジュラルミン板の間に衝撃吸収材をはさんだ3層構造の足底板を開発し、これによってロール軸方向の受動的自由度を増設した。またこの足底板は、足首部RAに加わる衝撃加重を緩和する効果も合わせ持っている。開発した足底板の構造をFig.3.3およびphoto.3.1に示す。

100[N]の大きさの外力について、外力を加える時刻と補償可能な時間幅の関係をFig.2.12に示す。

また実験に際しては、足首部にコンプライアンスを持たせて、足底の接地状態が路面にならうようにすると安定な補償動作が実現できることが確認された。

3 機械モデルWL-12RIV

3.1 機械ハードウェア

機械モデルWL-12RIVの組立図をFig.3.1に、自由度配置図をFig.3.2に示す。

本モデルはWL-12RIIIの下肢にロール軸方向の自由度を増設して、横方向の外力に対応できるようにしたものであり、下肢に8自由度、上体に2自由度の合計10自由度を有している。下肢の股部にロール軸2自由度を増設したことにともない、機械モデルの総重量はWL-12RIIIの103[kg]から120[kg]に増加した。各自由度は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により駆動される。下肢ピッチ軸の6自由度はレゾルバ、上体3自由度および下肢ロール軸2自由度はポテンショメータとタコジェネレータの組み合わせによって、各RAの角度および角速度を検出している。またRAの油路に2個の圧力センサを取り付けてベーン両側の差圧を測定することによってRAの出力トルクを検出している。

なお、股部にロール軸方向の自由度を増設することによって、足部にもロール軸方向の自由度が必要である。しかし、足部にアクチュエータを増設することで生じる重量増加は歩行を不安定化する要因となる。そこで、足部にアクチュエータを取り付ける代わりに、2枚のジュラルミン板の間に衝撃吸収材をはさんだ3層構造の足底板を開発し、これによってロール軸方向の受動的自由度を増設した。またこの足底板は、足首部RAに加わる衝撃加重を緩和する効果も合わせ持っている。開発した足底板の構造をFig.3.3およびphoto.3.1に示す。

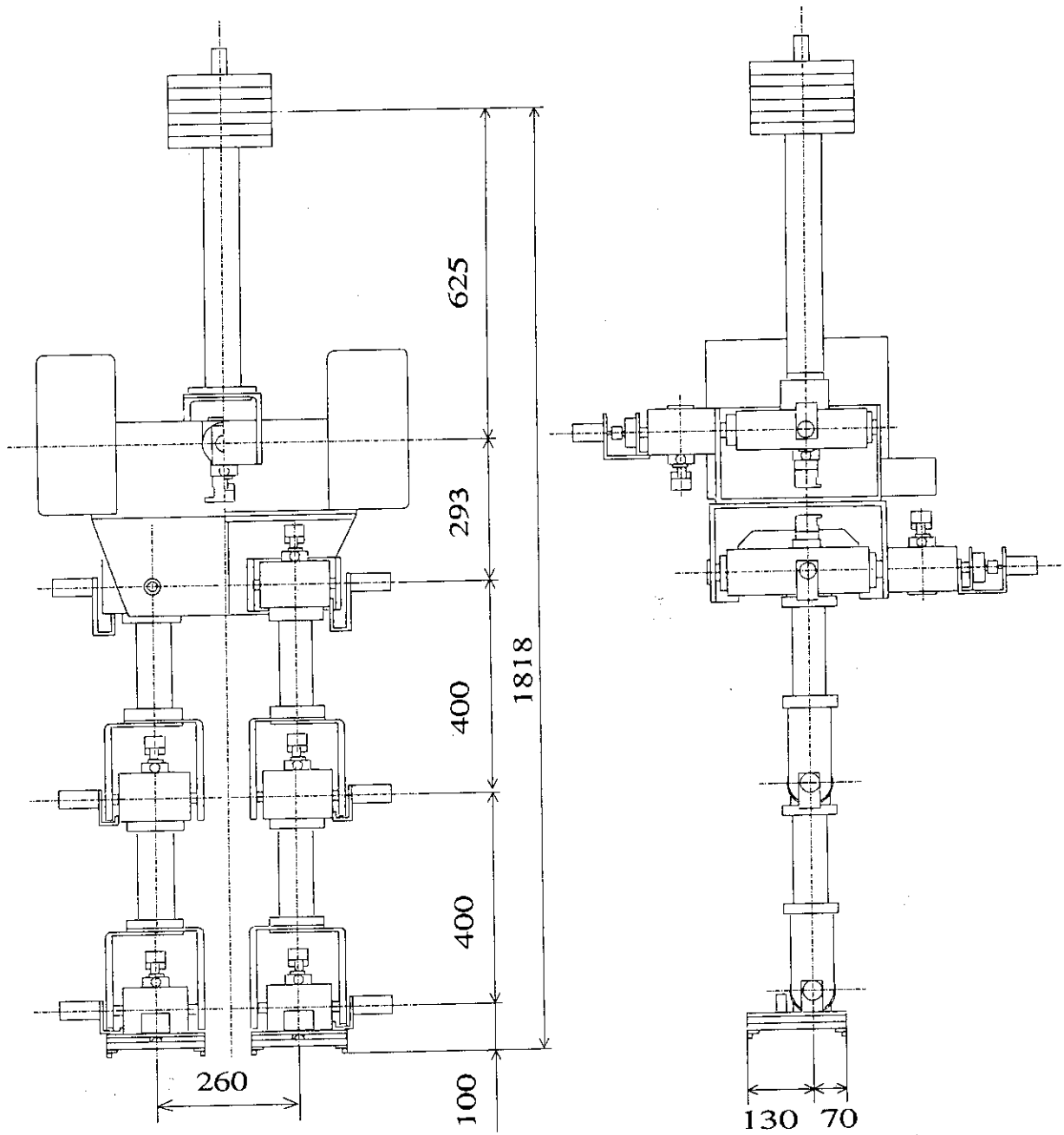


Fig.3.1 Assembly drawing of WL-12RIV

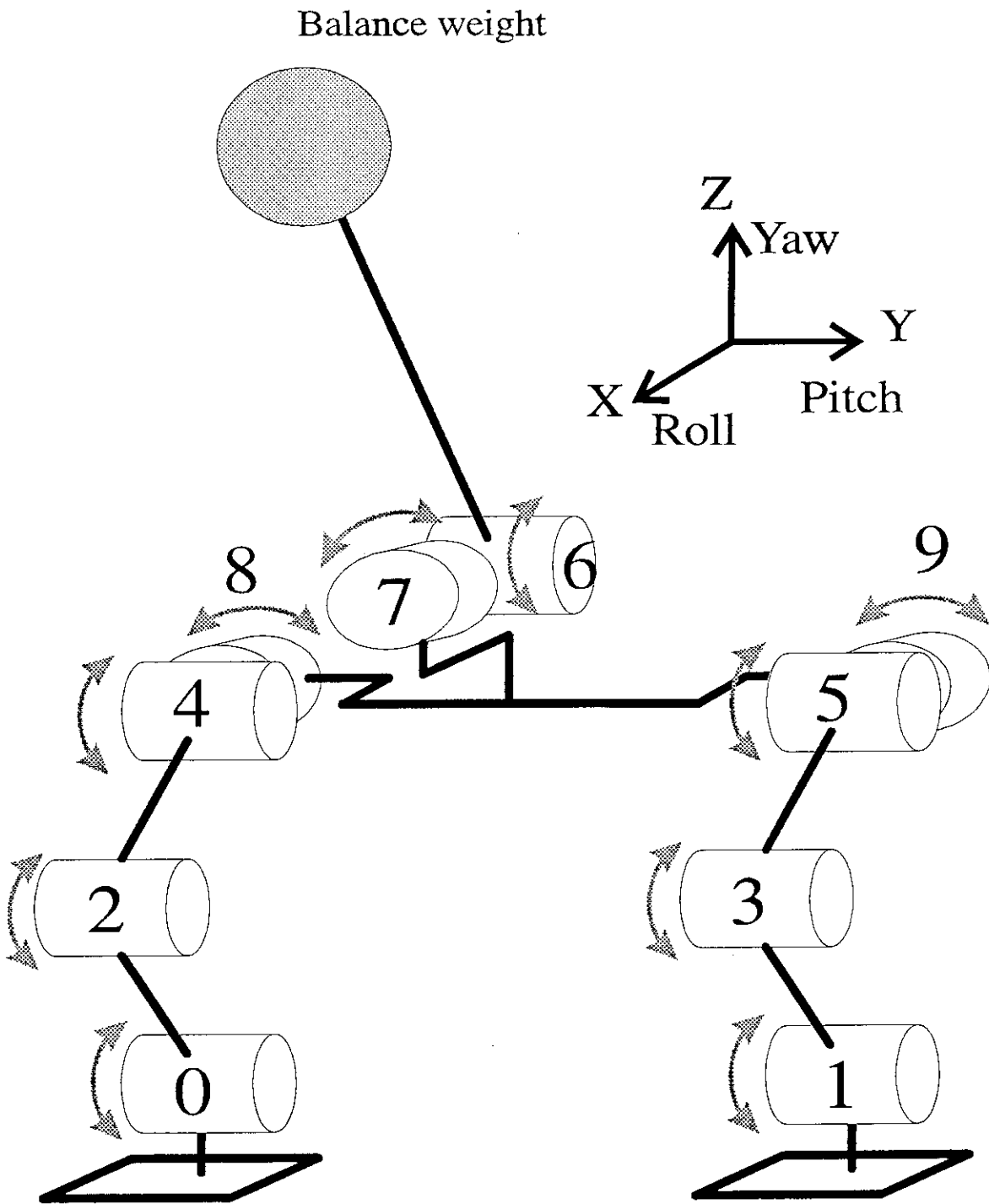


Fig.3.2 Link structure of WL-12RIV

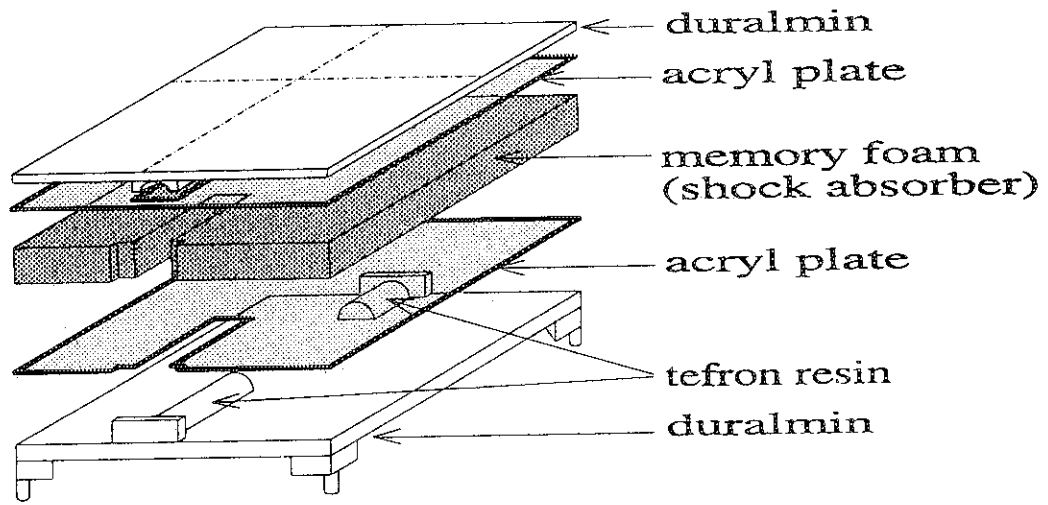


Fig.3.3 Structure of new sole plate

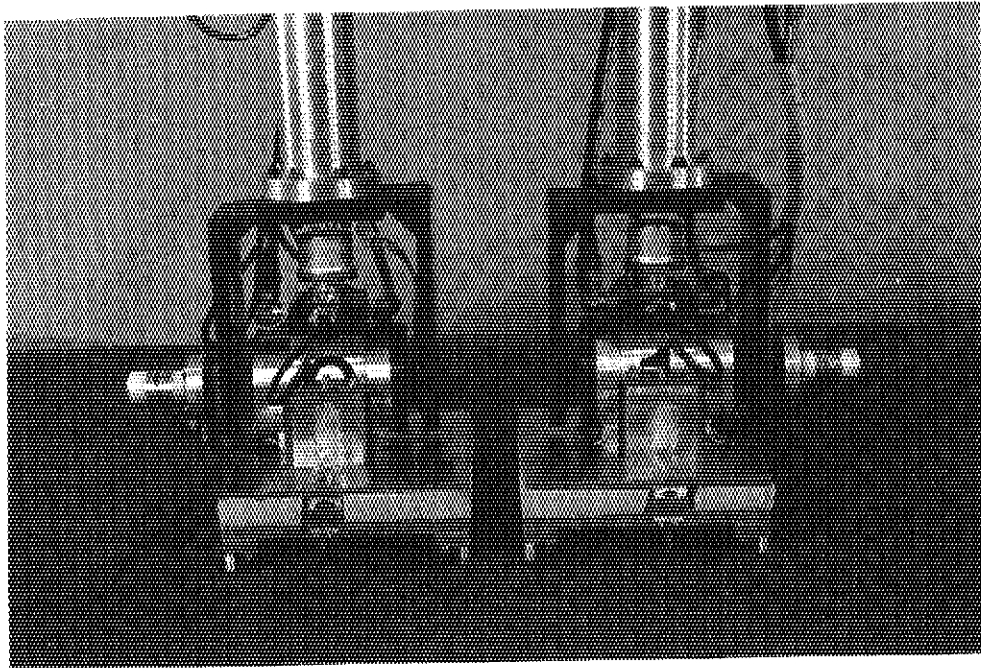


photo 3.1 Feet with new sole plate

3.2 電気ハードウェア

下肢股部ロール軸RAの増設に対応して、WL-12RIIIにおいて上体2自由度を制御していたサブボード（SUBIII）上にRAの制御回路を2系統増設した。WL-12RIVのコンピュータシステム構成図をFig.3.4に示す。

3.3 歩行制御方式

3.3.1 未知外力

本研究で対象とする未知外力を以下のような要素を持つものとする。

[未知要素]

- ・外力の大きさ
- ・外力の形状
- ・外力の加わる時刻（ただし定常歩行中に限る）
- ・外力の加わる時間幅

[既知要素]

- ・外力の加わる位置（腰部）
- ・外力の加わる方向（横方向）

3.3.2 横方向の未知外力に対応した歩行制御方式

横方向の未知外力に対応した歩行制御方式も前章（2.3）と同様に、歩行中に加えられた未知外力に対して、まずZMPが設定ZMPと一致するように上体運動の変更によって補償を行い、次に、設定ZMPそのものの変更すなわち下肢運動の変更による（横方向の）歩幅変更によって上体運動を収束させて元の歩行状態に戻すものである。

しかし、横方向に歩幅を変更しようとする場合には、下肢の相互干渉という問題が生じる。

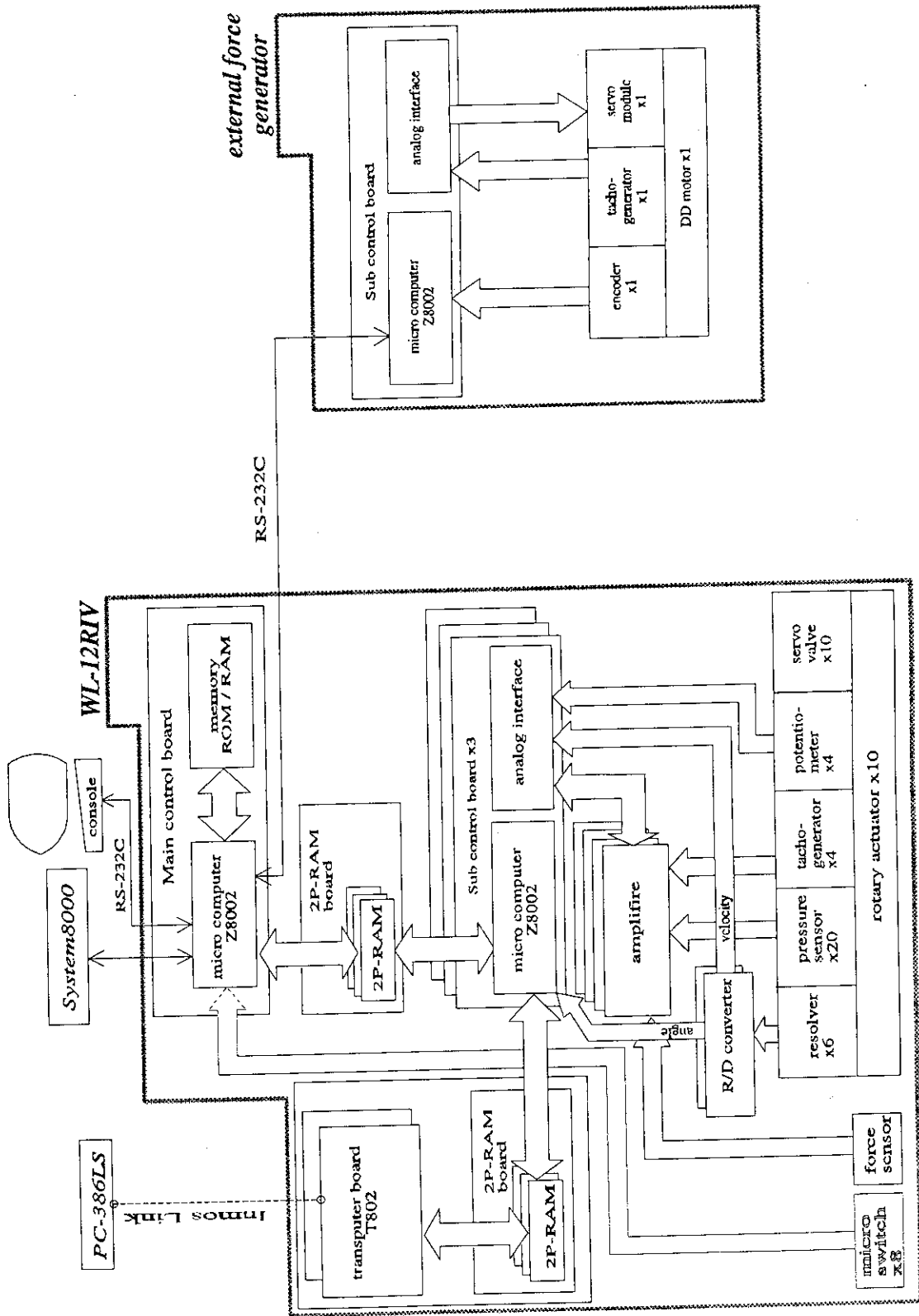


Fig.3.4 Computer system of WL-12RIV

進行方向の未知外力に対応する歩行制御方式においては、設定ZMPの変更には、着地時刻を一定として、着地位置のみを変更していた。しかし、着地時刻を一定とすると、外力が加えられてから次に着地するまではZMPの変更が不可能であるため、この間は上体の偏差が小さくできない。その結果、上体運動を収束させるための下肢運動の変更量も大きくなり、下肢の相互干渉が発生し易い。

そこで、本章で述べる横方向の未知外力に対応した歩行制御方式においては、着地の位置および時刻の両方を変更することでZMPを変更する方法を採用した。ただし、一步の時間は一定とし、また干渉の度合いが僅かな場合には、着地目標位置を干渉の直前の位置に固定するものとする。

横方向の未知外力に対応した歩行制御の概要は以下の通りである。

- (i) 未知外力が加えられるまでは、予め歩行前に作成しておいた設定歩行パターンによるプログラム制御によって歩行する。
- (ii) 歩行中に未知外力が加えられた場合、まず着地時刻を変更する。ただし、着地時刻の変更は、シミュレーションによって予め求めておいた1歩目と2歩目それぞれの適正時刻からの選択によるものとする。
- (iii) 次にZMPを設定ZMPに一致させるように上体の運動によって補償する。
- (iv) このままでは、上体運動が発散してしまうので、設定ZMPそのものの変更によりこれを収束させる。

ZMPの変更は、外力が加わってから3歩目の上体の偏差（位置と速度両方）が0となるようにして求めた1歩目と2歩目の着地目標位置と、(ii)で選択した着地時刻に従って下肢運動を変更することによって行うものとする。

3.3.3 上体補償軌道の算出

未知外力に対応してZMPを設定ZMPと一致させるような上体補償軌道の算出方法については、2.3.4で述べた通りである。ただし、ここで対象としている横方向

の未知外力に対応するためには上体ロール軸による補償が必要である。そのため、 $\theta_r(t)$ の解を数値積分（4次のルンゲクッタ法）によって求める。

なお、このままでは上体軌道が発散してしまうため、もとの歩行状態に復帰するためには何らかの方法によって上体軌道を収束させることが必要である。そこで設定ZMPそのものを変更して上体軌道を収束させる方法について以下に述べる。

3.3.4 ZMP変更量の算出

上体軌道を収束させるために、着地点を変えて設定ZMPを変更する。X軸方向について述べた2.3.5と同様の方法によって、Y軸方向の上体偏差を求めると、次の式を得る。

$$(3.1)$$

$$Y_T = \frac{A(Y_{t0} + R_p/A^2) + \dot{Y}_{t0}}{2A} e^{A(T-t_0)} + \frac{A(Y_{t0} + R_p/A^2) - \dot{Y}_{t0}}{2A} e^{-A(T-t_0)} - \frac{R_p}{A^2}$$

$$\dot{Y}_T = \frac{A(Y_{t0} + R_p/A^2) + \dot{Y}_{t0}}{2} e^{A(T-t_0)} - \frac{A(Y_{t0} + R_p/A^2) - \dot{Y}_{t0}}{2} e^{-A(T-t_0)}$$

$$Y_{2T} = \frac{A(Y_T + R_{p1}/A^2) + \dot{Y}_T}{2A} e^{AT} + \frac{A(Y_T + R_{p1}/A^2) - \dot{Y}_T}{2A} e^{-AT} - \frac{R_{p1}}{A^2}$$

$$\dot{Y}_{2T} = \frac{A(Y_T + R_{p1}/A^2) + \dot{Y}_T}{2} e^{AT} - \frac{A(Y_T + R_{p1}/A^2) - \dot{Y}_T}{2} e^{-AT}$$

$$Y_{3T} = \frac{A(Y_{2T} + R_{p2}/A^2) + \dot{Y}_{2T}}{2A} e^{AT} + \frac{A(Y_{2T} + R_{p2}/A^2) - \dot{Y}_{2T}}{2A} e^{-AT} - \frac{R_{p2}}{A^2}$$

$$\dot{Y}_{3T} = \frac{A(Y_{2T} + R_{p2}/A^2) + \dot{Y}_{2T}}{2} e^{AT} - \frac{A(Y_{2T} + R_{p2}/A^2) - \dot{Y}_{2T}}{2} e^{-AT}$$

ここで T は1歩の時間すなわち半歩行周期を示す一定の値である。このため、着地時刻を早めた場合には両脚支持期を延長し、逆に着地時刻を遅くした場合には両脚支持期を短くして一步に要する時間を一定としている。また R_p , R_{p1} , R_{p2} はそれぞれ遊脚着地前、1歩目、2歩目のZMP変更量である。ただし、遊脚着地以前に設定ZMPを変更することは不可能なので $R_p=0$ とする。

この3歩目の上体偏差 (Y_{3T} , Y_{3T}) が0となるように R_{p1} , R_{p2} を求めることで、1歩目と2歩目のZMP変更量が決定される。

3.3.5 下肢軌道の変更

前項で求めたZMP変更量をもとに、下肢軌道を変更する。i相目の足首部のY軸方向の軌道 y_i は2.3.6で述べたX軸方向の軌道と同様に式(3.2)、式(3.3)により求められる。

(3.2)

$$Y_p = -\frac{m_0(\bar{z}_0 + z_q)}{(m_0 + m_1)g} R_{p1}$$

(3.3)

$$y_{i+1} = -y_{i-1} + 2y_i + \ddot{y}_i dt^2$$

$$\ddot{y}_i = k_p \frac{(y_p - y_i)}{dt(p-i)} + k_v (\dot{y}_p - \dot{y}_i) \quad (y_p = Y_p, \dot{y}_p = 0)$$

ここで Y_p は遊脚の着地目標位置 (着地時刻は p 相目) である。また k_p , k_v はそれぞれ位置および速度のゲインである。なお、着地の衝撃によって歩行が不安定となることを避けるため、着地前のある期間に限り、あえて着地目標位置の変更を行わずに $Y_p = \text{constant}$ とする。なおシミュレーションによって、上体運動の収束性および収束後の足部の干渉性を検討した結果、 $Y_p = \text{constant}$ とする相数の最適値として、外力が加えられてから4歩 (2歩行周期) の間は、この相数を6相とし、5歩目以降は10相とした。

また、着地時刻の変更をするためには、Z軸方向についても新たに軌道を作成しなければならない。Z軸方向の下肢軌道の作成の際の条件は以下の通りである。

- (1) 外力の加わった時刻が両脚支持期あるいは遊脚期前半であれば、6次の多項式によって軌道を生成する。(位置・速度・加速度の初期値、足上げ高さ、着地の位置・速度・加速度によって決定される。)

- (2)外力の加わった時刻が遊脚期後半であれば、5次の多項式によって軌道を生成する。(位置・速度・加速度の初期値, 着地の位置・速度・加速度によって決定される。)
- (3)これらの多項式を用いるとき, 着地の衝撃をなくすため, 着地時の速度・加速度を0とする。
- (4)外力の加わる前後での位置・速度・加速度の連続性を保つ。

上記の条件より, まず足首部の軌道を以下のようにして決定する。

いま, 外力の加えられた時の足首のZ軸方向の位置, 速度および加速度を, それぞれ p_{z0}, v_{z0}, a_{z0} とおく。また, 着地時の足首の位置, 速度および加速度も同様に p_{z1}, v_{z1}, a_{z1} とおく。

時刻 t における足首の位置 $p_z(t)$ を6次の多項式で表わすと次のようになる。ここでは外力の加えられた時刻を $t=0$ とする。ただし, 外力が両脚支持期中に加えられた場合には遊脚期の始まりを $t=0$ とする。

(3.4)

$$p_z(t) = a_0 t^6 + a_1 t^5 + a_2 t^4 + a_3 t^3 + a_4 t^2 + a_5 t + a_6$$

次に示す初期条件により, 各項の係数 $a_0 \sim a_6$ を決定する。なお着地の時刻を $t=t_1$ とする。 sh は足上げ高である。

(3.5)

$$\begin{aligned} p_z(0) = p_{z0} & \quad p_z\left(\frac{t_1}{2}\right) = sh & \quad p_z(t_1) = p_{z1} \\ \dot{p}_z(0) = v_{z0} & & \quad \dot{p}_z(t_1) = v_{z1} = 0 \\ \ddot{p}_z(0) = a_{z0} & & \quad \ddot{p}_z(t_1) = a_{z1} = 0 \end{aligned}$$

5次の多項式により軌道を生成する場合にも同様に, 外力の加えられた時刻を $t=0$ としたときの時刻 t における足首の位置 $p_z(t)$ は

(3.6)

$$p_z(t) = b_0 t^5 + b_1 t^4 + b_2 t^3 + b_3 t^2 + b_4 t + b_5$$

と表せる。

ここで、初期条件

(3.7)

$$p_z(0) = p_{z_0} \quad p_z(t_1) = p_{z_1}$$

$$\dot{p}_z(0) = v_{z_0} \quad \dot{p}_z(t_1) = v_{z_1} = 0$$

$$\ddot{p}_z(0) = a_{z_0} \quad \ddot{p}_z(t_1) = a_{z_1} = 0$$

より、各項の係数 $b_0 \sim b_5$ が決定される。こうして足首部の軌道が決定できる。

また、股部の軌道は、腰部と同じく等速直線運動するものとして、膝部の軌道を足首部の軌道と股部の軌道とから幾何学的に決定する。このようにして、新たな下肢軌道が生成される。

3.4 歩行実験

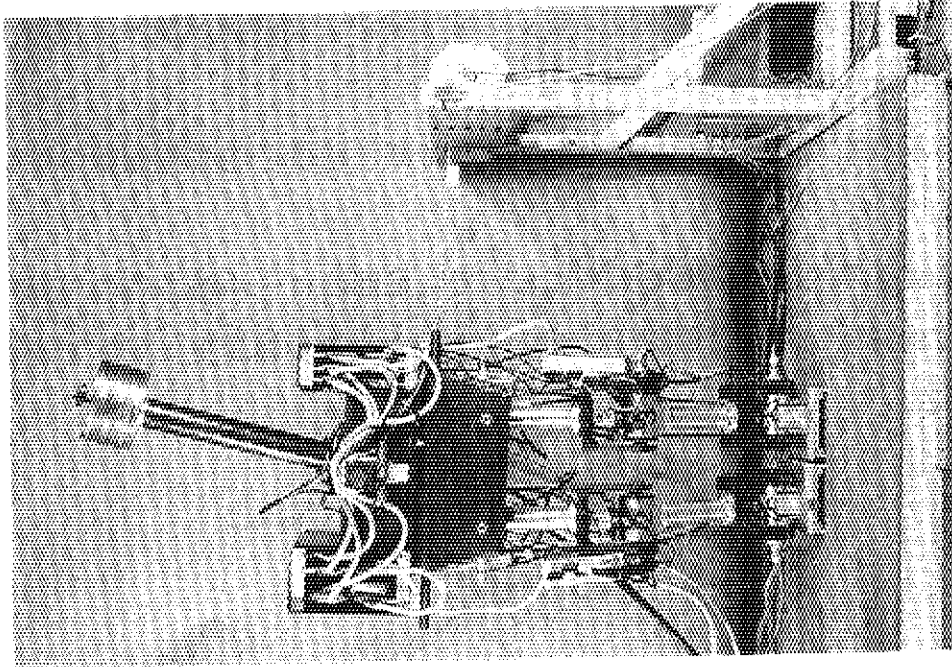
3.4.1 実験目的

2足歩行ロボットWL-12RIVを用いて、リアルタイム制御により横方向の未知外力が加わる環境下での安定な動的足踏み状態を実現し、システムの有効性を確認する。

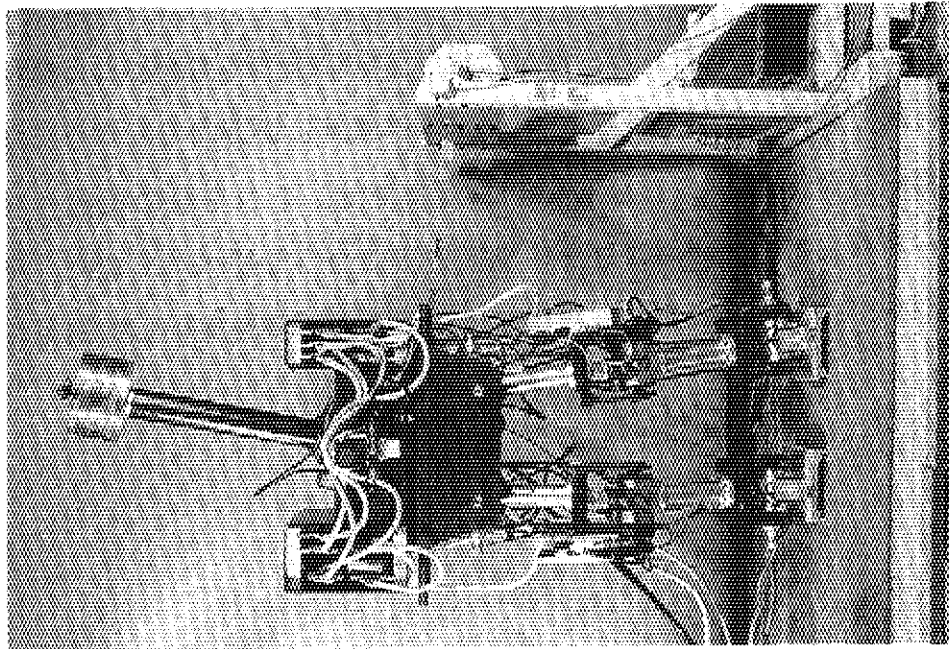
3.4.2 実験方法

Photo3.2に歩行実験の様子を示す。ロボットに外力を加える方法としては、(a)遊脚側から外力を加える、(b)立脚側から外力を加える、の2通りの場合について行う。

外力は外力発生装置からワイヤを介して任意の時刻にロボットに加えられる。ただし、ワイヤの初期張力として常に15[N]が加えられている。



(b) Support leg : Left



(a) Support leg : Right

Photo 3.2 Walking experiment

3.4.3 実験結果

リアルタイム制御による歩行実験の結果、遊脚側、立脚側のいずれの場合においても、最大で、大きさ100[N]、時間幅0.16[s]の横方向の未知外力が加わる環境下において、0.64[s/step]の動的足踏み状態を実現した。

100[N]の大きさの外力について、外力を加える時刻と補償可能な時間幅の関係をFig.3.5に示す。

実験値と理論値との差は、機械モデルにおいて、足部のロール軸方向の可動角が ± 10 [deg]程度であるために、これ以上の角度が要求される歩幅変更に対応できないためと考えられる。

4 おわりに

本報告は、2足歩行ロボットの外乱のある環境下における歩行モデルについて、早稲田大学で開発した2足歩行ロボットWL-12RIIIおよびWL-12RIVに対する調査結果である。

WL-12RIIIはリアルタイム制御により、腰部に進行方向の未知外力が加わる環境下で、動的足踏み状態を実現した。そして、WL-12RIVは腰部に横方向の未知外力が加わる環境下で、動的足踏み状態を実現した。本報告では、それぞれの機械ハードウェアと電気ハードウェアの概略およびその制御方法について述べた。また、それぞれの機械モデルを用いた実験により、再現性のある外力補償を実現した結果について述べた。

3.4.3 実験結果

リアルタイム制御による歩行実験の結果、遊脚側、立脚側のいずれの場合においても、最大で、大きさ100[N]、時間幅0.16[s]の横方向の未知外力が加わる環境下において、0.64[s/step]の動的足踏み状態を実現した。

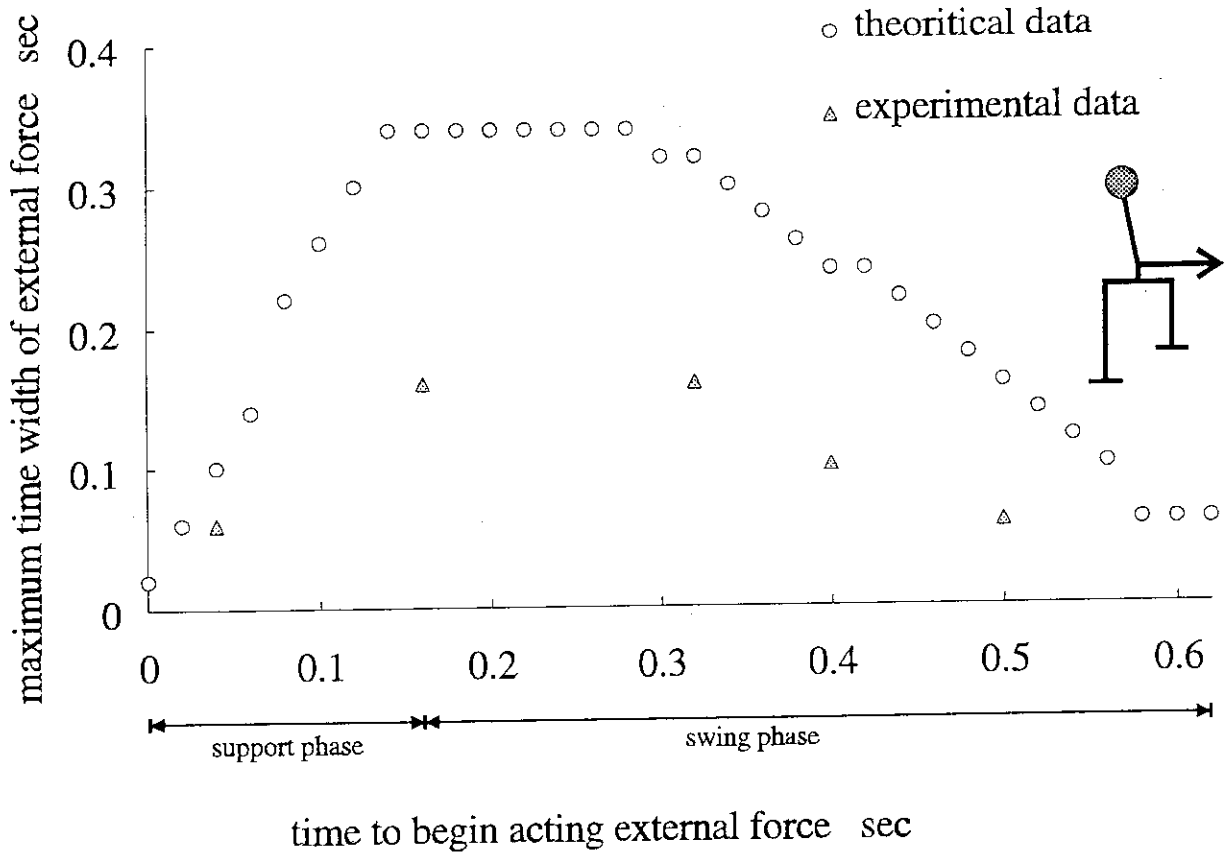
100[N]の大きさの外力について、外力を加える時刻と補償可能な時間幅の関係をFig.3.5に示す。

実験値と理論値との差は、機械モデルにおいて、足部のロール軸方向の可動角が ± 10 [deg]程度であるために、これ以上の角度が要求される歩幅変更に対応できないためと考えられる。

4 おわりに

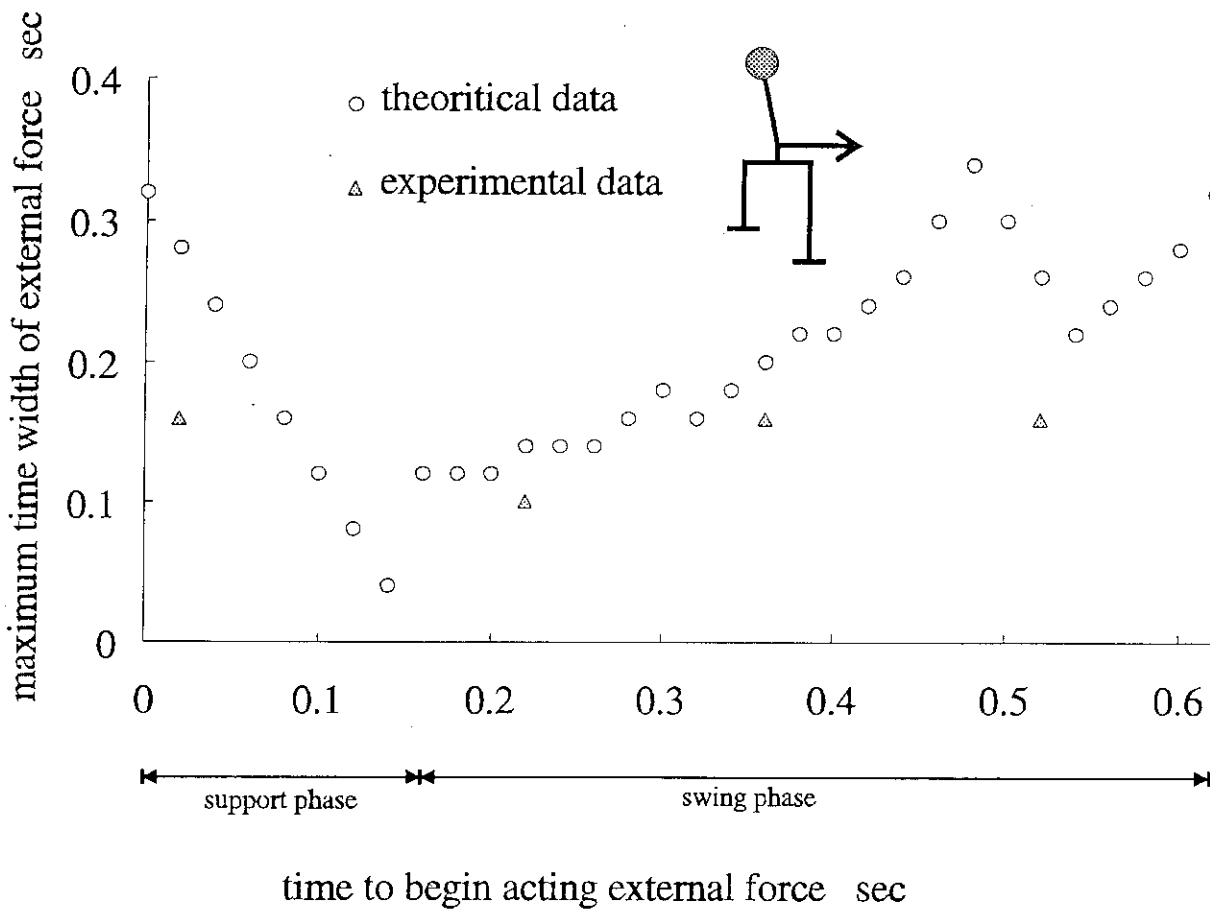
本報告は、2足歩行ロボットの外乱のある環境下における歩行モデルについて、早稲田大学で開発した2足歩行ロボットWL-12RIIIおよびWL-12RIVに対する調査結果である。

WL-12RIIIはリアルタイム制御により、腰部に進行方向の未知外力が加わる環境下で、動的足踏み状態を実現した。そして、WL-12RIVは腰部に横方向の未知外力が加わる環境下で、動的足踏み状態を実現した。本報告では、それぞれの機械ハードウェアと電気ハードウェアの概略およびその制御方法について述べた。また、それぞれの機械モデルを用いた実験により、再現性のある外力補償を実現した結果について述べた。



stepping motion : 0.64[sec/step]
 force strength : 100[N]
 support leg : Right
 phases keeping the target landing points : 6(first two walking cycle), 10

Fig.3.5(a) Relation between maximum time width of external force and time to begin acting external force



stepping motion : 0.64[sec/step]
 force strength : 100[N]
 support leg : Left
 phases keeping the target landing points
 : 6(first two walking cycle), 10

Fig.3.5(b) Relation between maximum time width of external force and time to begin acting external force

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へ深く感謝します。

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)加藤，人間工学－工学的人間学－，放送大学教育振興会
- (2)高西，2足歩行ロボットの動歩行に関する研究，昭和62年度早稲田大学博士論文
- (3)江草，環境適応能力を持つ2足歩行ロボットの研究～上体補償型動歩行の実現～，昭和61年度早稲田大学修士論文
- (4)栃沢，環境適応能力を持つ2足歩行ロボットの研究～既知の外力下での歩行の実現～，昭和62年度早稲田大学修士論文
- (5)武谷，環境適応能力を持つ2足歩行ロボットの研究～未知の外力に対応した2足歩行制御方式の開発～，昭和63年度早稲田大学修士論文
- (6)唐木，環境適応能力を持つ2足歩行ロボットの研究～未知の外力に対する適応歩行の実現～，平成元年度早稲田大学修士論文
- (7)桑田，環境適応能力を持つ2足歩行ロボットの研究～横方向の未知外力に対する適応歩行の実現～，平成2年度早稲田大学修士論文
- (8)M.Vukoburatovic(加藤・山下訳)，歩行ロボットと人工の足，日刊工業新聞社
- (9)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－システムの開発と上体補償型動歩行の実現－，第5回日本ロボット学会学術講演会，昭和62年11月
- (10)高西，他，既知の外力下における上体補償型動歩行の実現，第4回知能移動ロボットシンポジウム，1988年6月
- (11)Atsuo Takanishi, A CONTROL METHOD FOR DYNAMIC BIPED WALKING UNDER UNKNOWN EXTERNAL FORCE, IROS'90, 1990.9

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へ深く感謝します。

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)加藤，人間工学 - 工学的人間学 - ，放送大学教育振興会
- (2)高西，2足歩行ロボットの動歩行に関する研究，昭和62年度早稲田大学博士論文
- (3)江草，環境適応能力を持つ2足歩行ロボットの研究～上体補償型動歩行の実現～，昭和61年度早稲田大学修士論文
- (4)栃沢，環境適応能力を持つ2足歩行ロボットの研究～既知の外力下での歩行の実現～，昭和62年度早稲田大学修士論文
- (5)武谷，環境適応能力を持つ2足歩行ロボットの研究～未知の外力に対応した2足歩行制御方式の開発～，昭和63年度早稲田大学修士論文
- (6)唐木，環境適応能力を持つ2足歩行ロボットの研究～未知の外力に対する適応歩行の実現～，平成元年度早稲田大学修士論文
- (7)桑田，環境適応能力を持つ2足歩行ロボットの研究～横方向の未知外力に対する適応歩行の実現～，平成2年度早稲田大学修士論文
- (8)M.Vukoburatovic(加藤・山下訳)，歩行ロボットと人工の足，日刊工業新聞社
- (9)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-システムの開発と上体補償型動歩行の実現-，第5回日本ロボット学会学術講演会，昭和62年11月
- (10)高西，他，既知の外力下における上体補償型動歩行の実現，第4回知能移動ロボットシンポジウム，1988年6月
- (11)Atsuo Takanishi, A CONTROL METHOD FOR DYNAMIC BIPED WALKING UNDER UNKNOWN EXTERNAL FORCE, IROS'90, 1990.9