

JAERI-M
92-197

2足歩行ロボットの方向転換に関する調査報告

1992年12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。

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, 1992

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

2足歩行ロボットの方向転換に関する調査報告

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

(1992年11月24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。これまでにヴコプラトビッチの人体モデルを基本に、2足歩行ロボット設計研究の観点から、直進定常歩行及び発進・停止歩行の完全歩行シミュレーションを実現した。また、現在シミュレーション結果の妥当性の検証と機械モデルの機構や特性等ハードウェアに関する問題点を明らかにするために、ハードウェア化を目的としたモデル開発を進めている。しかし、現在のロボットモデルは直進歩行に限定され、方向転換の自由度を持たない。そのため、2足歩行ロボットの方向転換用自由度の付加に必要となる、ハードウェアに依存する種々のデータやその方向転換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-10Rの方向転換に関する調査報告であり、その歩行制御法、歩行実験、機械モデル及び制御システムについて述べたものである。

A Survey Report for the Turning of Biped Locomotion Robot

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 November 24, 1992)

A mechanical design study of biped locomotion robots is going on 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. A survey has been performed for collecting useful information from already existing biped locomotion robots.

This is a survey report for the turning of biped locomotion robot : the WL-10R designed and developed at Waseda University. This report includes the control method of turning, machine model and control system.

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

* Waseda University

目 次

1. はじめに	1
2. 機械モデル WL - 10R	2
2.1 機械モデルの構造	2
2.2 関節駆動部	2
2.3 状態検出部	3
3. 制御システム	10
3.1 制御システムの構成	10
3.2 Z8002メインシステム	11
3.3 Z8サブシステム	12
3.4 ROMボード	13
4. 歩行制御	17
4.1 面歩行の概念	17
4.2 転回制御則	17
4.3 制御方式	17
5. R.A.の特性試験	26
5.1 実験方法	26
5.2 実験結果	26
5.3 考 察	26
6. 歩行実験	30
6.1 実験目的	30
6.2 実験方法	30
6.3 実験結果	30
7. おわりに	34
謝 辞	34
参考文献	35
付 録	36

Contents

1. Introduction	1
2. Machine Model WL-10R	2
2.1 Structure of Machine Model	2
2.2 Joint Actuators	2
2.3 Sensors	3
3. Control System	10
3.1 Construction of Control System	10
3.2 Z8002 Main-system	11
3.3 Z8 Sub-system	12
3.4 ROM	13
4. Walking Control	17
4.1 Concept of Plane Walking	17
4.2 Control Low of Turning	17
4.3 Control Method	17
5. Characteristic Test of R.A.	26
5.1 Experimentation	26
5.2 Experimental Results	26
5.3 Consideration	26
6. Experiment	30
6.1 Aim of Experiment	30
6.2 Experimentation	30
6.3 Experimental Results	30
7. Concluding Remarks	34
Acknowledgements	34
References	35
Appendix	36

1 はじめに

方向転換動作が可能な2足歩行ロボットとしては、これまでに2例があるのみである。

1つは、われわれが1972年に開発したWL-5 (Waseda Leg-5) である。このロボットの歩行は、歩行周期中、常に静的安定を保つ静歩行であり、直進時の歩行速度は0.17[m/step], 40[s/step], 方向転換は腰の回転関節を回転させることにより行い、15[deg]の転換に40[s]を要した。

もう1つは、やはりわれわれが1983年に開発したWL-10R (Waseda Leg-10 Refined) である。このロボットは、転回用として大腿部に人間と同様の自由度をもち、合計12自由度を有する。制御方式としては歩行パターンを直線あるいは2次曲線により補間し出力するプログラム制御がもちいられた。その結果、準動直進歩行、静的転回、静的側方歩行及びこれらを総合した面歩行を実現し、前進時の歩行時間は4.4[s/step]であった。

本報告においては、より人間に近い自由度をもち、さらに高速な歩行を実現したロボットとしてWL-10Rをとりあげ、その方向転換動作について報告する。

2. 機械モデル W L - 1 0 R

2.1 機械モデルの構造

機械モデル W L - 1 0 R の自由度配置図を図 2.1 に示す。

本モデルの自由度構成は，片足につき足首 2（ピッチ，ロール），膝 1（ピッチ），大腿 1（ヨー），腰 2（ピッチ，ロール）自由度の，両足合計 12 自由度である。

各自由度駆動用のアクチュエータとしては，足首，膝，腰の 10 自由度については D C モータと R. S. A. (Rotary Servo Actuator) との組合せを，大腿部の転回用の 2 自由度については，サーボ弁と R. A. (Rotary Actuator) による，電気油圧サーボシステムを用いている。

構造部材は，軽量かつ高強度であることが望ましく，主としてカーボンファイバー (C. F. R. P.) をもちい，細部にはジュラルミンを用いている。

また，上部部には制御用コンピュータユニットを搭載している。

W L - 1 0 R の全体図を図 2.2 に，全体写真を写真 2.1 に示す。

総重量は 83.2 [kg]，全長 1443 [mm] である。

2.2 関節駆動部

大腿部のヨー軸以外の 10 自由度には，D C モータ + R. S. A. によって駆動するロータリー型アクチュエータを用いたダイレクトドライブ方式を採用している。

各 R. S. A. の仕様を付表 1 に示す。

機械モデルに転回機能を持たせるための大腿部ヨー軸方向の自由度に関しては，スペース的にかなり小さく，R. S. A. を用いた場合ここに組み込み難い。これは R. S. A. の構造として入力，出力の 2 軸があり，その入力軸を D C モータ等で駆動しなければならず，機構が複雑になるためである。

そこで，大腿部ヨー軸方向に関しては機構が簡単であるサーボ弁 + R. A. のシステムを用いている。転回用 R. A. システムの写真を写真 2.2 に，油圧回路図を図

2.3に、仕様を表2.1に示す。R.A.本体およびサーボ弁の仕様を付表2、付表3に、転回用大腿部の部品図、組立図を付図2～7に示す。

転回時に必要となるR.A.のおよその所要トルクTは図2.4に示すような簡略化したモデルを用いて求める。

重心位置が図に示すような安定領域内にあるとき所要トルクTは、

$$T = L M \sin \theta$$

ただし、L：重心位置と大腿部との距離

$$L = 130 \text{ [mm]}$$

M：WL-10Rの総重量より、片足大腿部から下の重量を差し引いた重量

$$M = 67.2 - 14.5 = 52.7 \text{ [kg]}$$

θ ：矢状面から見て、重心が安定領域内にあり、最大に傾いた角度

$$\theta = \sin^{-1}(140/661) = 12.2^\circ$$

よってTは、

$$\begin{aligned} T &= 130 \times 10^{-3} \times 52.7 \times \sin 12.2^\circ \\ &= \text{約} 1.45 \text{ [kgf}\cdot\text{m]} \end{aligned}$$

前出の転回用R.A.システムの仕様によれば、R.A.の最大トルクは5 [kgf·m]であるので、このシステムは必要な出力トルクを満たしているといえる。

2.3 状態検出部

WL-10Rはパルスエンコーダ、マイクロスイッチ、ポテンショメータを状態検出部としている。

(1) パルスエンコーダ

足首、膝、腰の10自由度のR.S.A.制御用のDCモータ軸に直結し、モータの出力角度（R.S.A.の入力角度）を検出している。

(2) マイクロスイッチ

接地情報を得るために、マイクロスイッチを足底部に、片足につき4点、両足で8点装着している。この8点のマイクロスイッチによって、8ビットの接地情報をZ8000メインシステムまで、直接送っている。

(3) ポテンショメータ

ポテンショメータは、各アクチュエータの出力軸に取り付けられ、その回転角度を検出する。

R.A.に用いたものは、R.A.の出力軸に直結され、回転角度を検出し、フィードバック制御に使用している。

R.S.A.に用いたものは、R.S.A.出力軸にタイミングベルトを介して接続され、データ監視用として用いている。

ポテンショメータの仕様を付表4に示す。

表 2.1 R.A. システムの仕様

項 目	諸 元
最大トルク (実トルク)	5 kgf·m
定常トルク	1 kgf·m
角 速 度	0.5 rad/s
可 動 角	± 45 deg
負荷流量	13.4 cm ³ /s
負荷圧力	3.7 kgf/cm ²
1 rad当りの流入量	26.8 cm ³ /rad
重 量	12.3 kg

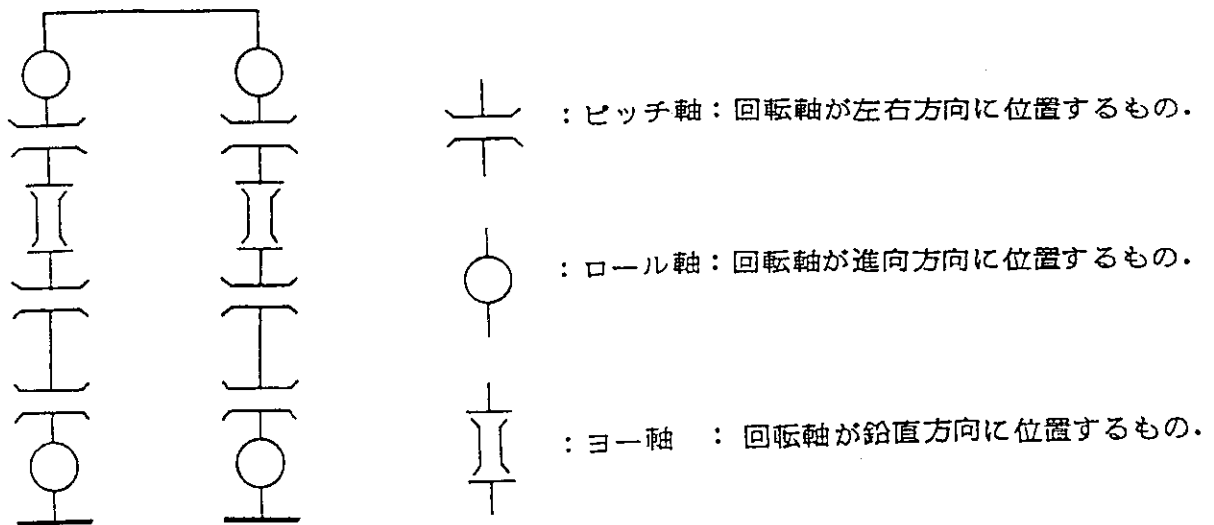


図 2.1 WL-10R 自由度配置図

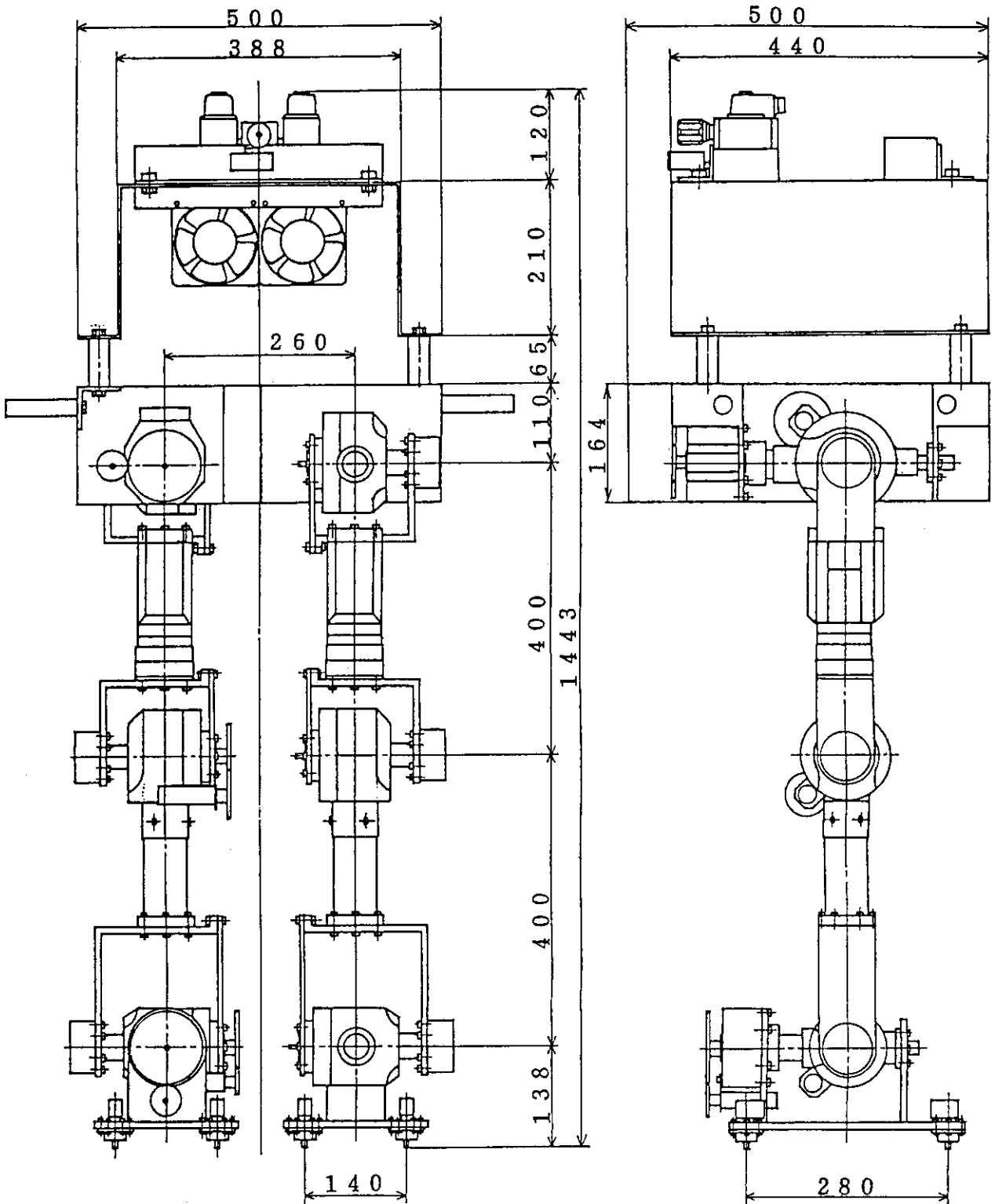


図 2.2 WL-10R 組立図

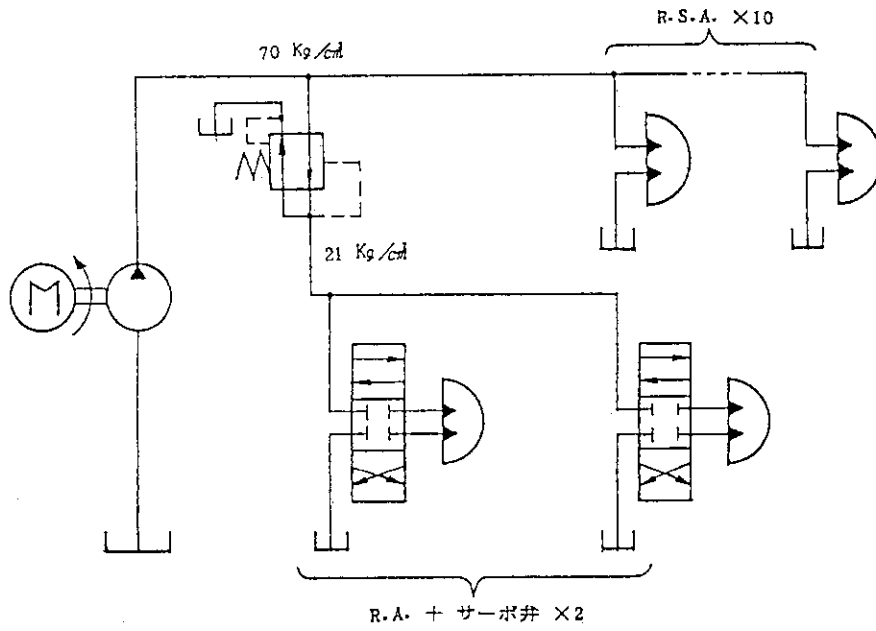


図 2.3 R. A. システム油圧回路図

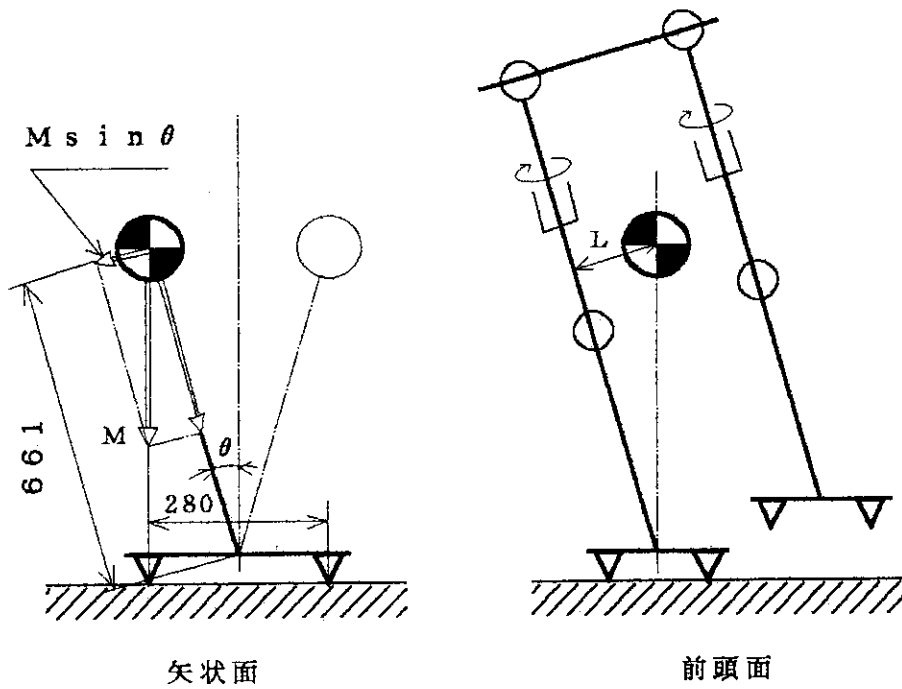
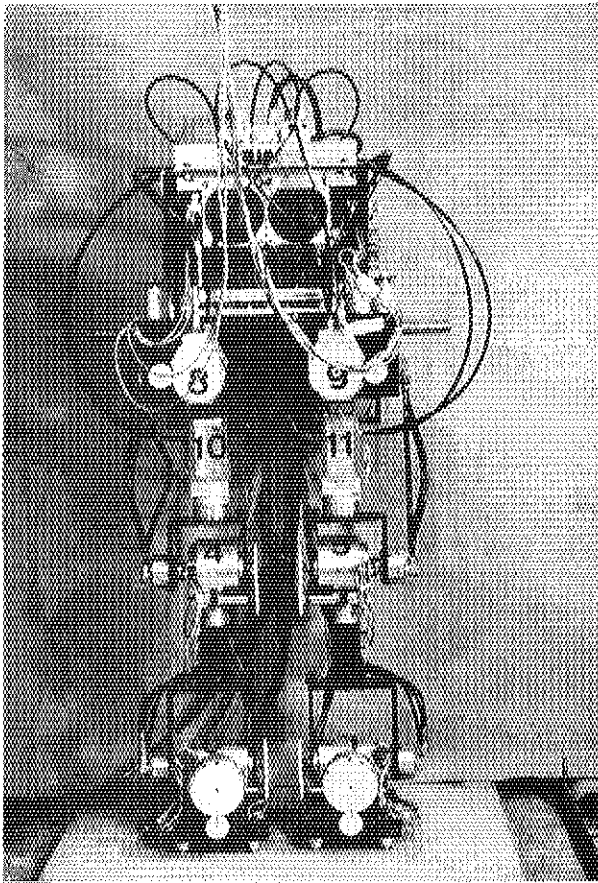
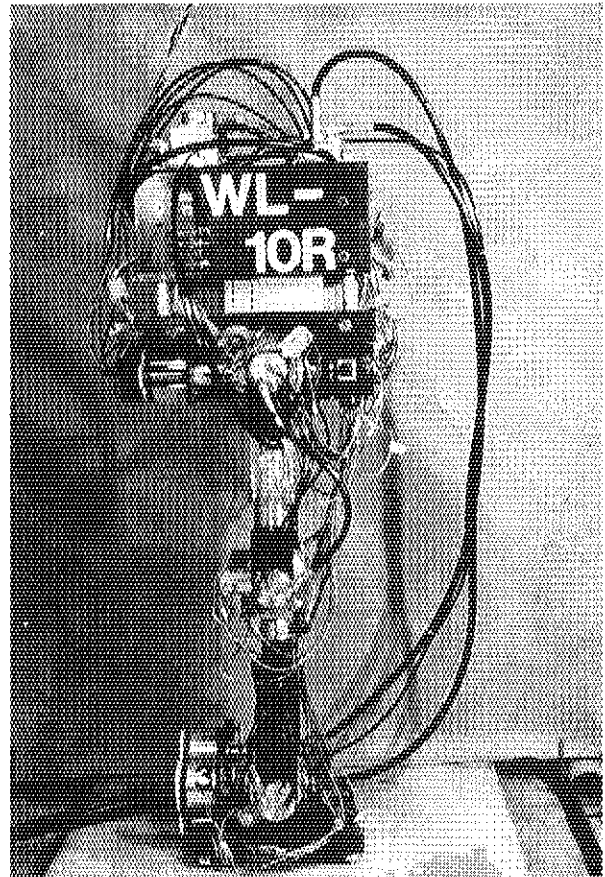


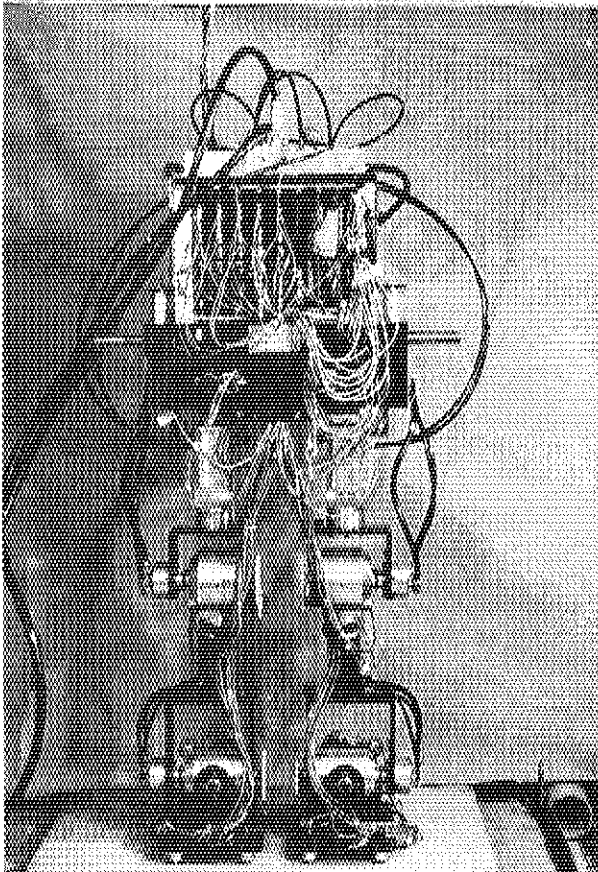
図 2.4 方向転換用 R. A. の所要トルク



(a) 正面図



(b) 側面図



(c) 背面図

写真 2.1 WL-10R 全体図

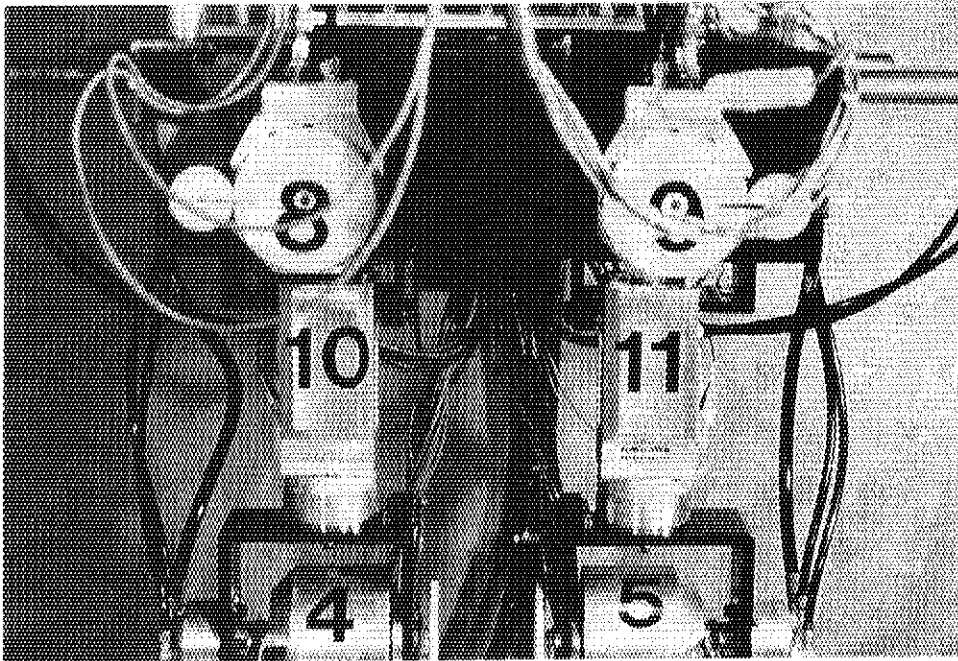


写真 2.2 転回用大腿部

3. 制御システム

3.1 制御システムの構成

本制御システムは、各自由度を個別に制御するZ8サブシステム6台と、その上位で全自由度を統括して制御するZ8002メインシステムにより階層的に構成されている。さらにプログラム開発時には、ホストコンピュータとしてZ8001UNIXシステムが接続される。

制御システムの構成図を図3.1に示す。

Z8001UNIXシステムは、Z8002メインシステムと光ファイバを介して通信可能となっている。このシステムは、プログラムや歩行パターンの開発時などに用いられる。

Z8002メインシステムは、歩行時には以下のことを行う。

- ① マイクロスイッチによって足底の接地情報を入力する。
- ② 非常停止スイッチの監視を行う。
- ③ ポテンショメータによって、R.S.A.およびR.A.の出力角度情報をデータ監視用として入力する。
- ④ 設定歩行パターン及びパラメータを基にZ8サブシステムをシリアルポートを介して制御する。

Z8サブシステムは、ピッチ軸及びロール軸のR.S.A.制御用（以下R.S.A.制御用）と、ヨー軸のR.A.制御用（以下R.A.制御用）の2種類に分かれる。

R.S.A.制御用Z8サブシステムは、R.S.A.入力軸駆動用DCモータのエンコーダ出力角度を入力情報にして、Z8002メインシステムより与えられる命令を基に、DCモータを制御する。

R.A.制御用Z8サブシステムは、R.A.の出力軸に直結されたポテンショメータ出力角度を入力情報にして、Z8002メインシステムより与えられる命令を基に、サーボ弁を制御する。

3.2 Z 8002メインシステム

機械モデル制御の中心的役割を演ずる Z 8002メインシステムは、歩行時には歩行パターンの選択および Z 8 サブシステムとのデータの入出力などを行い、非歩行時にはデータの修正・編集などを行う。

Z 8002メインシステムは、16ビットCPU Z 8002、シリアル通信用 Z 8030 SCC (Serial Communication Controller)、パラレル入出力およびタイミングカウント用 Z 8036 C I O (Counter / Timer Input Output) の Z 8000ファミリ L S I と、アナログ入出力用 H D A S -16 (データアキュイジションチップ)、およびメモリ MB8464・i2764から構成されている。

Z 8002メインシステムの仕様を表 3.1 に示す。

Z 8002CPUは、直交性の高い16個の16ビット汎用レジスタと8種類のアドレッシングモード、および110種類の命令セットを有する高性能マイクロプロセッサである。

メモリ部分は、RAM領域には64KビットのスタティックRAM・MB8464を8個(64Kバイト)、ROM領域には64KビットEPROM・i2764を2個(16Kバイト)使用しメモリチップ数の低減化を図っている。また、外部メモリとして256KバイトのROMボードを搭載することにより、制御プログラムや歩行パターンを高速でメインメモリ上にロードすることが可能になっている。

Z 8030 SCCは、1チップあたり2チャンネルの広範なシリアル通信機能を有するLSIであり、CRTターミナルおよびZ 8001UNIXシステムとはRS 232Cレベルで、またZ 8 サブシステムとはTTLレベルで非同期通信を行う。

Z 8036 C I Oは、1チップに3チャンネル(8ビット×2+4ビット)の汎用パラレルポートおよび3チャンネルのカウンタ/タイマを有するLSIである。パラレルポートは、足底部に取り付けられたマイクロスイッチからフォトカプラを介して接地情報を入力し、また非常停止スイッチのON/OFF状態を監視する。カウンタ/タイマは、時間の管理に使用され、これにより設定歩行パターンの出力タイミングなどが決定される。

H D A S -16 は、高性能の12ビットA/Dコンバータで、16チャンネルの

入力を有し、R.S.A.およびR.A.の出力軸に取り付けられたポテンショメータのアナログ信号電圧を12ビットの精度でデジタル信号に高速変換する。

また、本システムは、ロボット本体に搭載されるため、上記のLSI以外にはCMOS-ICを全面的に採用し消費電力の低減化を図っている。

3.3 Z8サブシステム

Z8サブシステムは、R.S.A.制御用Z8サブシステムと、R.A.制御用Z8サブシステムの2種類に分けられる。

本システムは、Z8MCU (Micro Computer Unit) を中心に構成されている。Z8MCUは、4つの汎用パラレルポート(8ビット×4)、2つのカウンタ/タイマおよび非同期のシリアルポートを有する8ビット1チップマイクロコンピュータである。

本システムも、Z8002メインシステム同様に、CMOS-ICを用いることにより、低電力消費なものとなっている。

3.3.1 R.S.A.制御用Z8サブシステム

R.S.A.制御用Z8サブシステムは、ロール軸およびピッチ軸の各R.S.A.を個別に制御する。

本システムは、Z8MCUを中心に、DCモータ駆動用PWM (Pulse Width Modulation) 回路、エンコーダ信号処理用ロジック回路により構成されており、1台で最大3自由度の制御が可能である。なお本研究においては1台で2自由度の制御を行っており、10自由度の制御を行うため合計5台使用している。

PWM回路は、Z8MCUからの7ビット制御信号をカウンタICによりパルス幅に変調するPWM信号発生部と、DCモータを十分なパワーで駆動するためにパワーダーリントランジスタを用いたスイッチング回路により構成されている。

エンコーダロジック回路は、エンコーダ内の2個のフォトランジスタの移相パルスを波形整形し、ロジック回路により、パルス数と回転方向の情報を割り込みを使用してZ8MCUに与える。

3.3.2 R.A.制御用Z8サブシステム

R.A.制御用Z8サブシステムは、ヨー軸の各R.A.を個別に制御する。本システムの回路図を図3.2に示す。

本システムでは、Z8MCUをZ8002メインシステムとのデータ入出力用に用いることにより、Z8002メインシステムによる各Z8サブシステムの制御形式を、R.S.A.制御用Z8サブシステムと同一にすることが可能である。しかし、本システムは、R.S.A.制御用Z8サブシステムのように、ソフトウェアサーボを行うのではなく、OPアンプを用いたアナログ回路によるハードウェア制御系を構成している。

本システムは、Z8MCUを中心に、8ビットデジタル信号をアナログ信号に変換するD/Aコンバータ・DAC-UP8、サーボ弁を駆動するサーボアンプ回路、ポテンショメータ角度情報を入力するA/Dコンバータ・ADC0808により構成されており、1台で2自由度の制御を行っている。

D/Aコンバータ・DAC-UP8は、入力レジスタ付きの8ビットモノリシックICで、Z8MCUからの8ビット制御信号をアナログ信号に変換する。

A/Dコンバータ・ADC0808は、8チャンネルのマルチプレクサを内蔵し、ポテンショメータからの角度情報を、8ビットの分解能でデジタル信号に変換する。

3.4 ROMボード

ROMボードは、機械モデルの上体部に搭載するため1ボードで構成されており、64KビットのEPROM・HM6264を32個使用して256Kバイトのメモリ空間を有する。また、Z8036C I/Oを通し、高速に大量のデータの読みだしが可能となっている。

表 3.1 Z 8002 メインシステムの仕様

項 目	型 名	詳 細
CPU	Z8002CPU	16ビット, 非セグメント型 クロック: 4MHz
メモリ RAM (64KB) ROM (16KB)	MB8464 i2764	64KビットCMOSスタティックRAM 64KビットnMOS UV・EPROM
パラレルI/O	Z8036CIO	8ch: 足底部接地情報 1ch: 緊急非常用停止スイッチ (TTLレベル入出力)
シリアルI/O	Z8030SCC	5ch: Z8サブシステム用 (TTLレベル入出力) 1ch: CRTコンソール 1ch: Z8001UNIX用 (RS232C規格)
A/D	HDAS-16 データアクイジ ションシステム	解像力: 12ビット コンバージョンタイム: 10 μ s/CHmax
インタラプト カウンタ	Z8036CIO	周期: 1ms

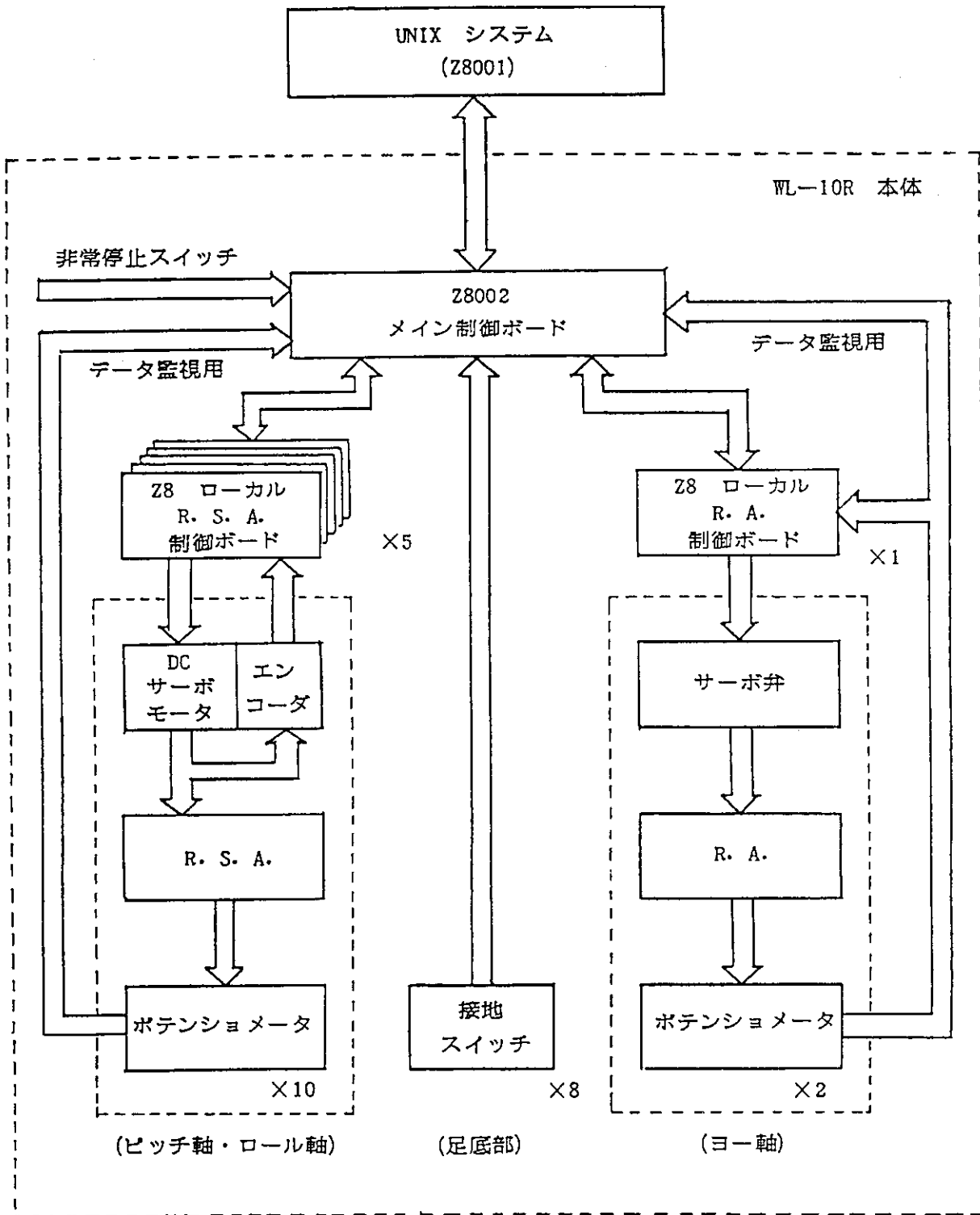


図 3.1 WL-10R システムブロック図

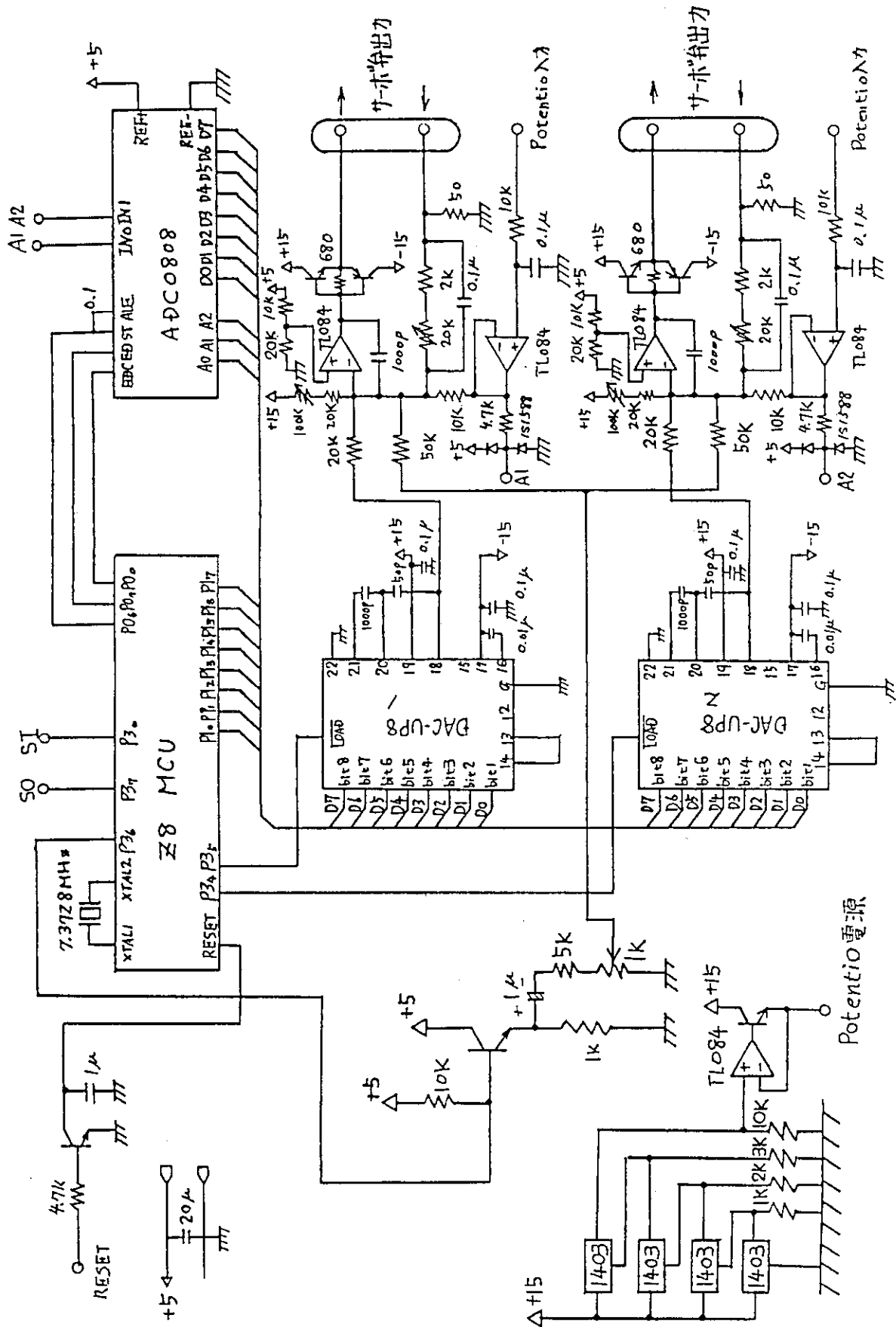


図 3.2 R.A.制御システム回路図

4 . 歩 行 制 御

本章では面歩行の概念および転回における制御則、制御方式について述べる。

4.1 面歩行の概念

面歩行とは、通常人間が行っている平面上の歩行である。2足歩行系を図4.1のように、鉛直方向をz軸、歩行体の正面方向をx軸、側面方向をy軸とし、x-z平面を矢状面(sagittal plane)、y-z平面を前頭面(lateral plane)、x-y平面を床面(floor plane)とする。

4.2 転回制御則

転回は、すべて静的な重心の釣合により歩行を行う静的完全歩行により実現する(図4.2参照)。

- (1) 1転回周期を単脚支持で回転を行う転回相と軸脚を切り換える重心移動相の2相に分割する。
- (2) 転回相では、設定回転角度に応じて軸脚のヨー軸の自由度を回転させる。このとき、回転による重心位置のずれを重心位置が足底の中心部に存在するように軸脚の足首ピッチおよびロールの両自由度で補正する。
- (3) 重心移動相では、転回用軸脚の足底の中心部まで重心を移動させ、遊脚の足底を浮上させる。
- (4) 両相において、歩行パターンの機械モデルへの出力は直線により補間する。

4.3 制御方式

転回が可能な2足歩行ロボットWL-10Rにおける制御方式は、あらかじめコンピュータシミュレーションにより作成した歩行パターンを出力時にリアルタイムで直線あるいは2次曲線により補間し適当な時間間隔で出力するプログラム制御である。

4.3.1 補間方法

WL-10RDでは、設定歩行パターンをコンピュータにストアし歩行時に直線あるいは2次曲線でリアルタイムで補間しながら出力する方法を採用している。補間点数は、通常16点としているが、立脚切替相での2次曲線補間時などには適当な点数を用いて、なめらかなものとしている。

4.3.2 転回パターンの作成

(1) 転回角をR. A. の可動角および機械モデルの制約から、転回のパターンを次の4つにする(図4.3参照)。

$$\text{I : } 0 < \theta \leq 20 [\text{deg}]$$

$$\text{II : } 20 < \theta \leq 40 [\text{deg}]$$

$$\text{III : } 40 < \theta \leq 80 [\text{deg}]$$

$$\text{IV : } 80 < \theta \leq 180 [\text{deg}]$$

(2) 転回の制御則に従い、転回相と重心移動相に分割し、基本パターンを作成する。基本パターンは上記の分類で

I・II : 右足ヨー軸自由度による動作パターン

III : 左・右ヨー軸自由度の $\theta/2$ 回転の動作パターン

IV : IIIの動作パターンを複数個組み合わせたパターン

とする。

I, II, IIIとも右軸足右転回を基本パターンとする。

IVでは、右転回を基本パターンとする。

(3) 基本パターンをもとに、軸脚・転回方向による修正を図4.4のように行う。

この転回パターン作成のフローチャートを図4.5に、作成した転回パターンの一例を図4.6に示す。

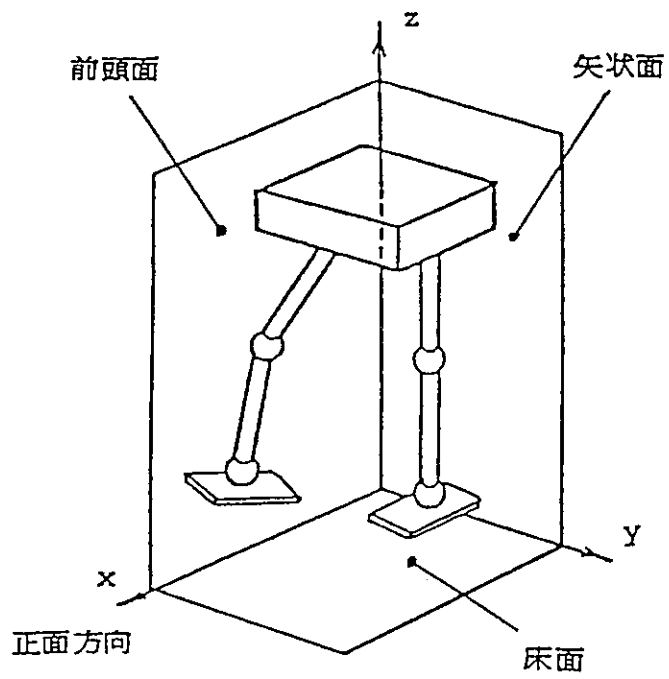
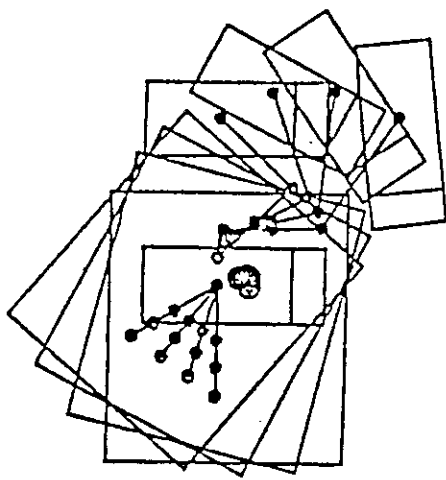
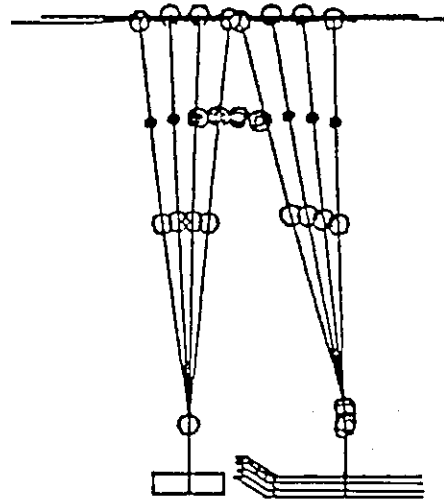


図4.1 歩行系の座標設定

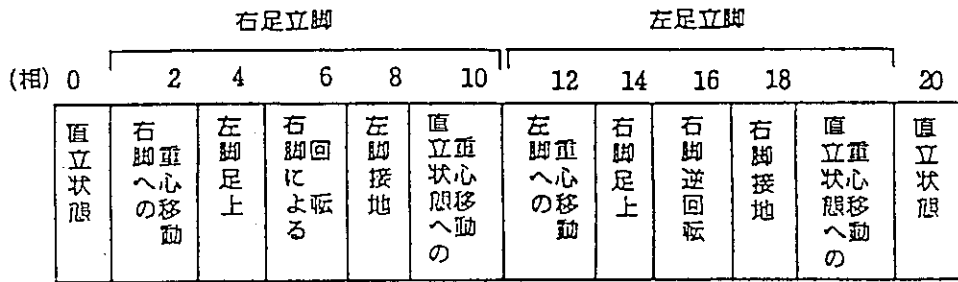


(a) 転回相

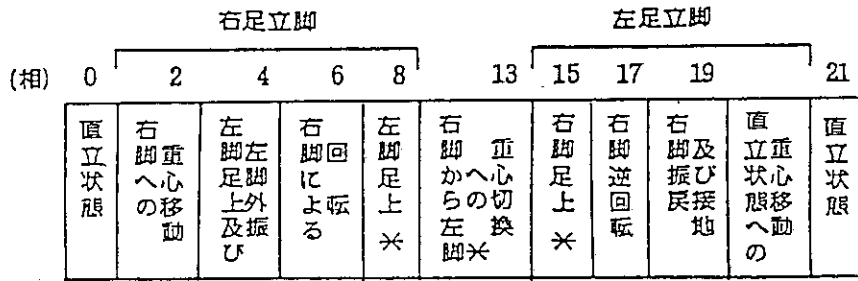


(b) 重心移動相

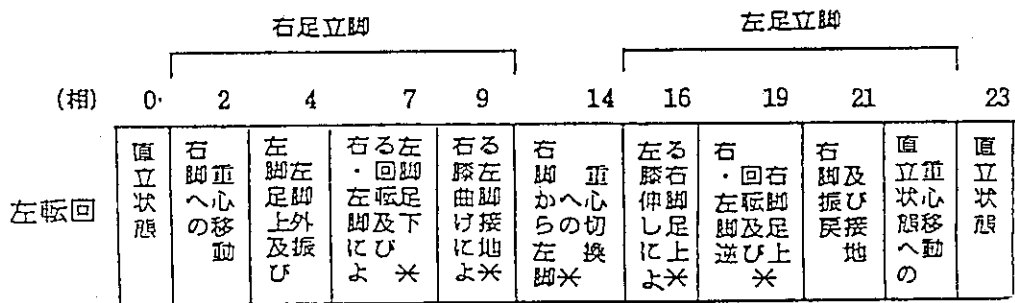
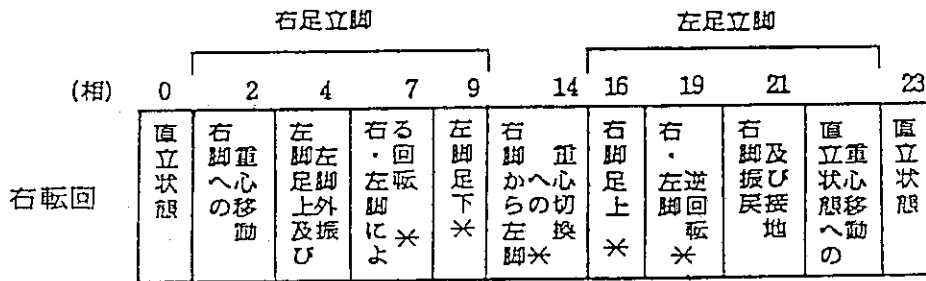
図4.2 転回



0 < |θ| ≤ 20 [deg] 転回パターン有限状態図



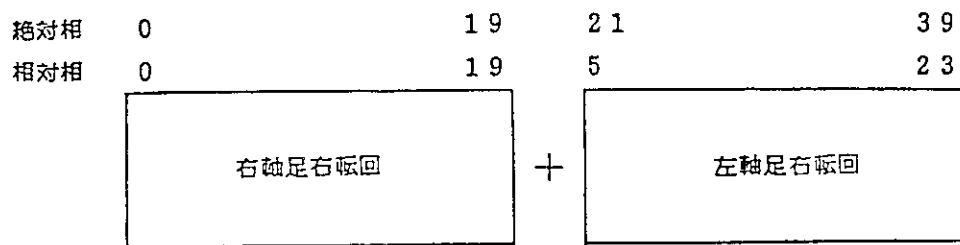
20 < |θ| ≤ 40 [deg] 転回パターン有限状態図



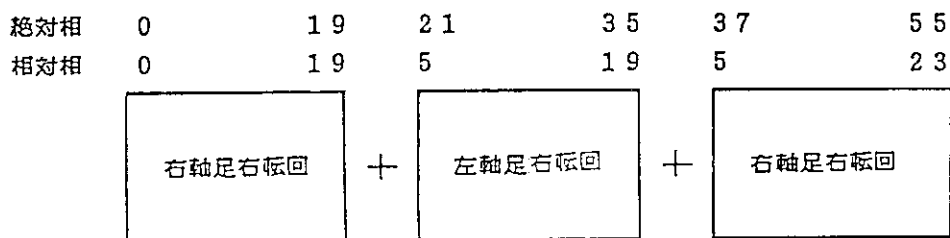
40 < |θ| ≤ 80 [deg] 転回パターン有限状態図

(* 重心補正を行う相)

図 4.3 転回パターン有限状態図 (その1)



80 < $\theta \leq 160$ [deg] 転回パターン有限状態図



160 < $\theta \leq 180$ [deg] 転回パターン有限状態図

図 4.3 転回パターン有限状態図 (その2)

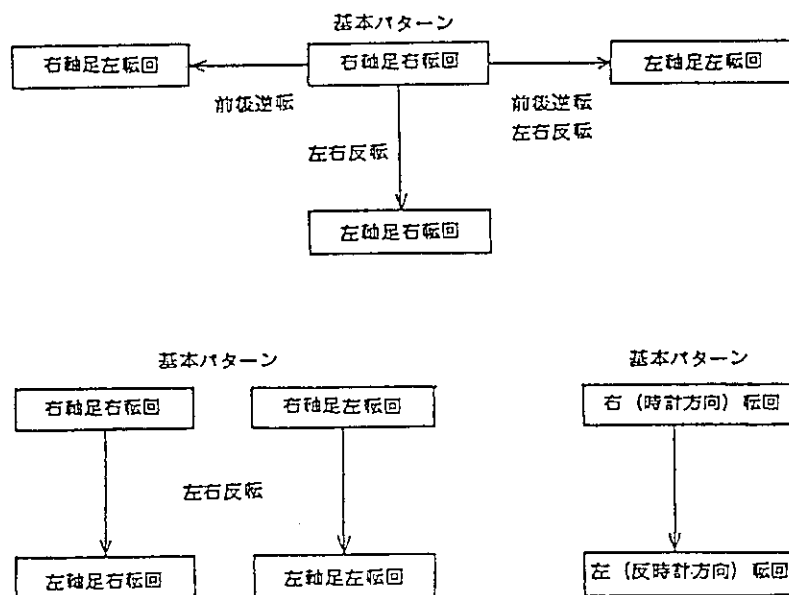


図 4.4 転回パターン生成図

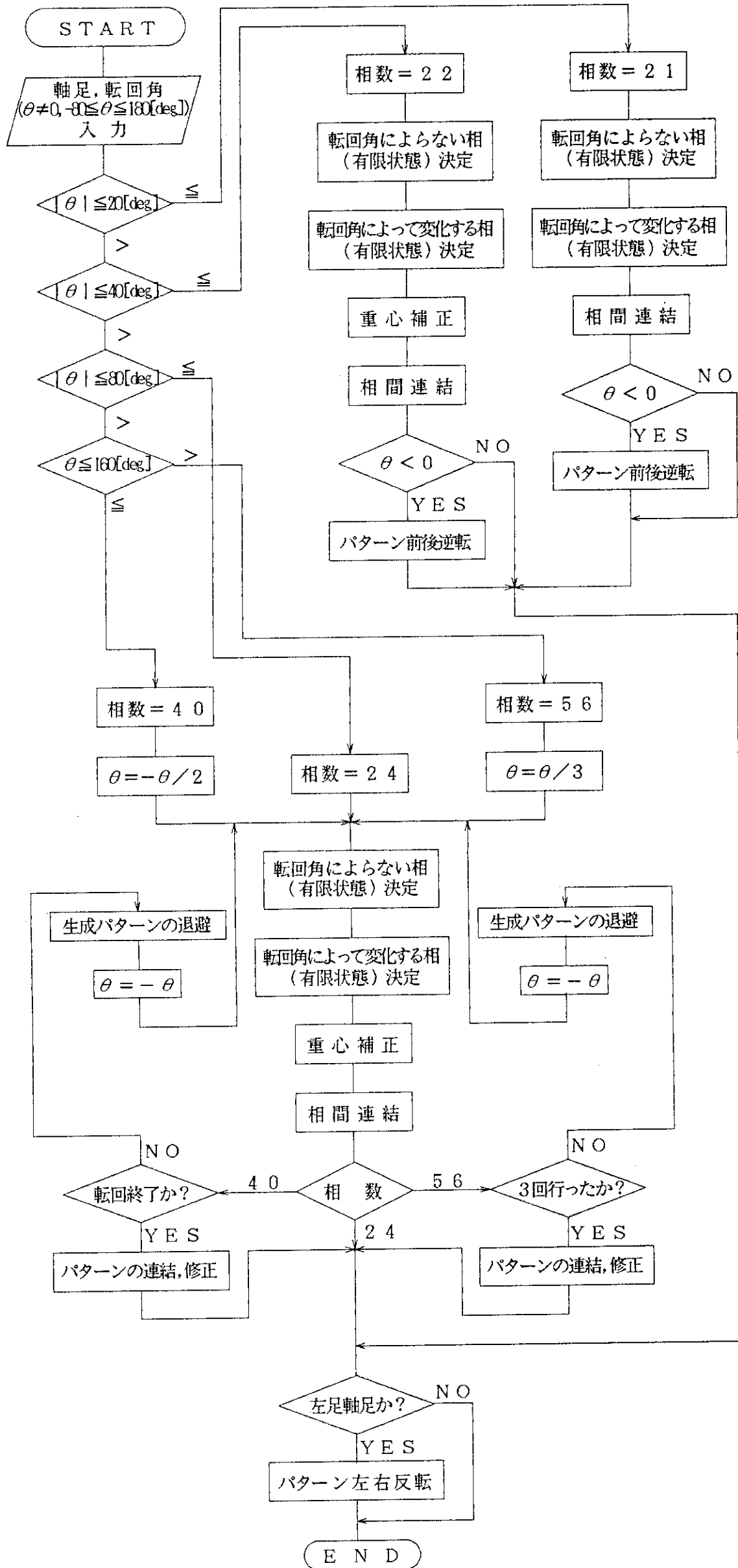


図 4.5 転回パターンの自動作成ルーチンフローチャート

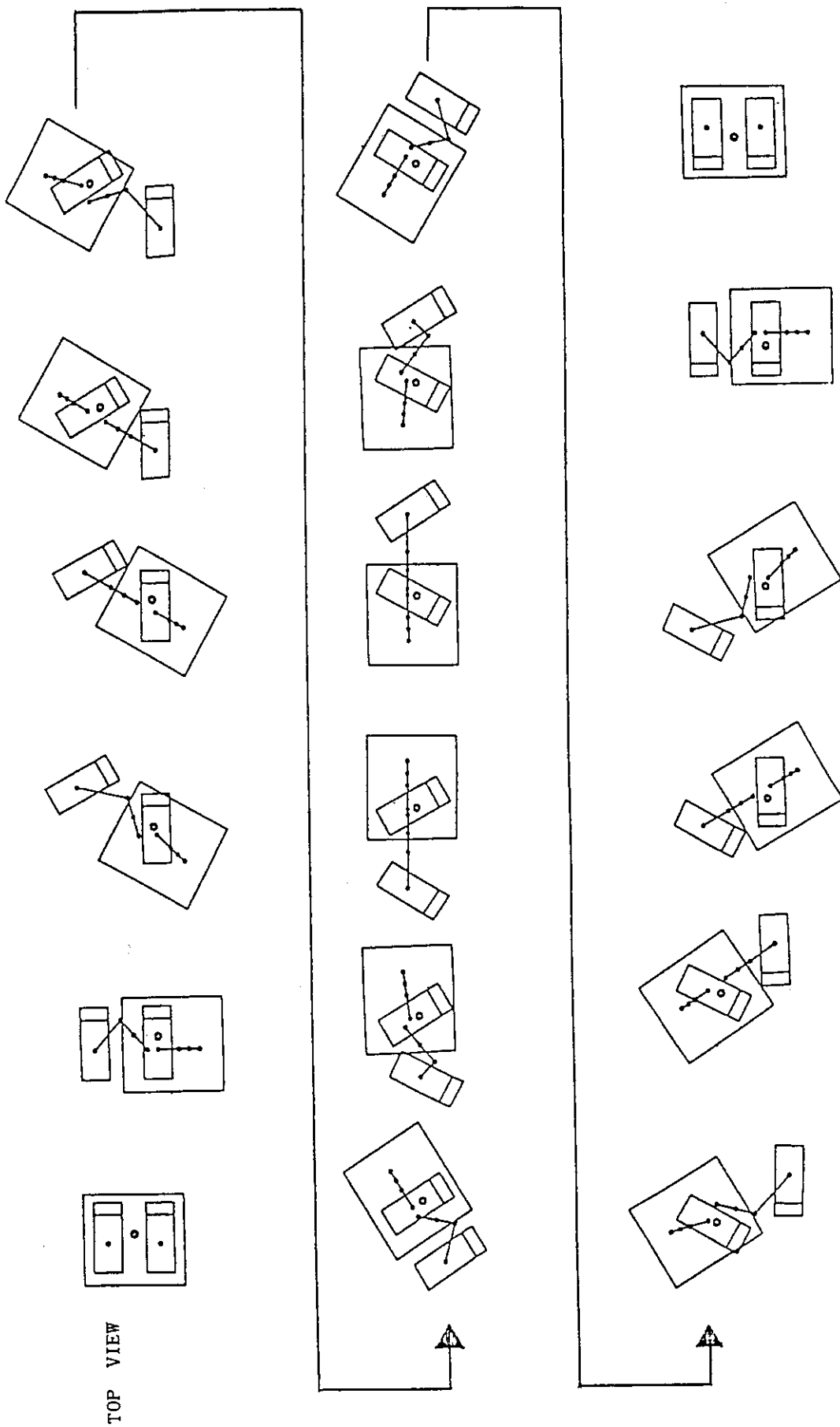


図 4.6 作成した転回パターン例 (右転回 180 (deg))

5. R. A. の特性試験

転回用 R. A. システムについて特性試験を行い、転回に必要な仕様を満たしていることを確認する。

5.1 実験方法

転回用 R. A. システムを用いて静負荷試験、ステップ応答試験、ランプ応答試験を行う。

R. A. の出力角度は、精度を上げるため 12 ビット長のデータとし、Z 8000 に取り込んだ。

5.2 実験結果

R. A. の各油圧における静特性を図 5.1 に、R. A. のステップ応答とランプ応答の試験結果をそれぞれ図 5.2、図 5.3 に示す。

ステップ応答の試験結果より、油圧 40 [kgf/cm²] における最大角速度 83 [deg/s] (1.45 [rad/s]) を得た。

また、ランプ応答試験結果より、この R. A. は油圧 40 [kgf/cm²] において角速度 30 [deg/s] の目標値にほぼ追従することがわかった。

5.3 考察

この R. A. システムは 20 ~ 50 [kgf/cm²] のいずれの油圧においても駆動することが可能であった。図 5.1 に示すこれらの各油圧における静特性を見ると、油圧が低くなるに従って角度偏差が大きくなる傾向があることがわかる。

ここでこの R. A. システムにおける最適の油圧について考えてみる。

実際の転回時には、2.2 で示したように表 2.1 の仕様中の最大トルク 5 [kgf/cm²] 以上は加わることはないと考えられ、この実用域においては図 5.1

に示すように、油圧40 [kgf/cm²]と50 [kgf/cm²]のデータはほぼ同じ角度偏差を示しているといえる。

以上の試験結果と、R.A.システムの耐圧を考慮に入れることにより、用いる油圧を40 [kgf/cm²]とした。

図5.2のステップ応答試験結果が示すように、このR.A.システムの最大角速度は83 [deg/s] (1.45 [rad/s])であり、設計仕様を満足するものである。

ランプ応答は図5.3に示すように若干のオーバーシュートを生じているものの、角速度30 [deg/s]の目標値にほぼ追従しており、良好な応答性を示している。実際の転回時には最大でもこの目標値以下の角速度を見込んでいるので、追従性及びこの試験で現れた若干のオーバーシュートも、転回に差し支えないものと考えられる。

本研究で作成した転回の設定歩行パターン中の最大角速度は、40 [deg] 転回するときで、この40 [deg]を3相(カウンター35 [ms],補間数16)で動かしている。よって最大角速度は23.8 [deg/s]であり、ランプ応答の目標値以下の角速度であった。

以上より、このR.A.システムは転回に必要な十分な性能を有しているものと考えられる。

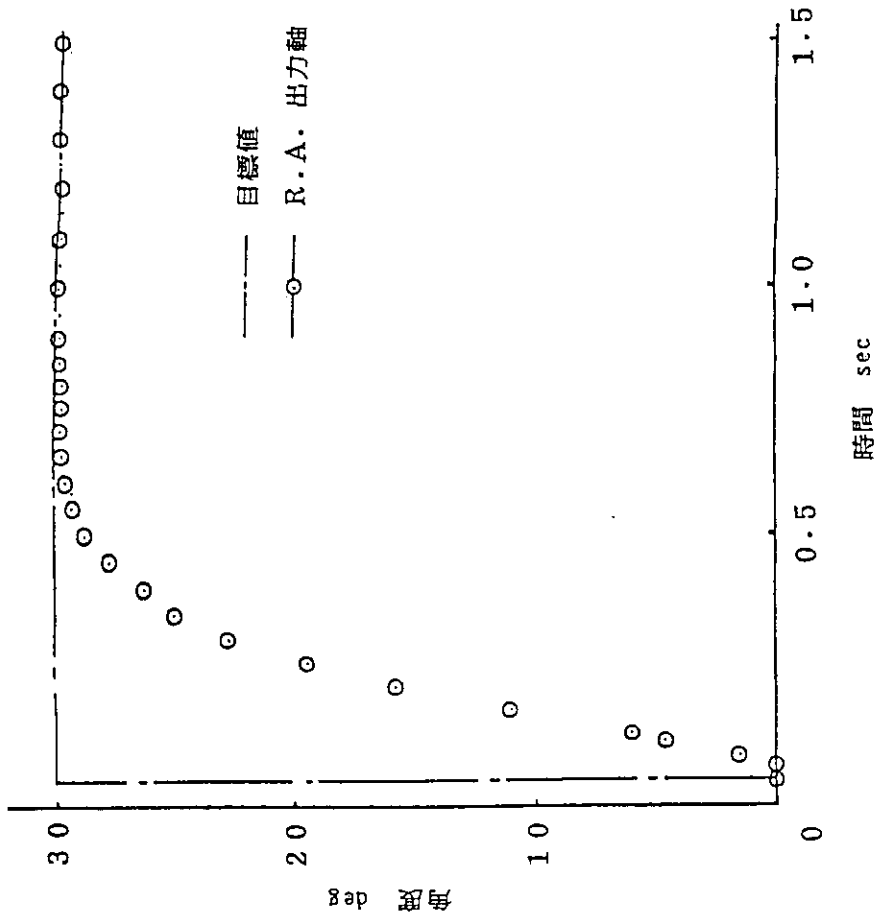


図 5.2 ステップ応答試験結果
($P = 40$ [kg/cm²], $I = 0$ [kg·m²])

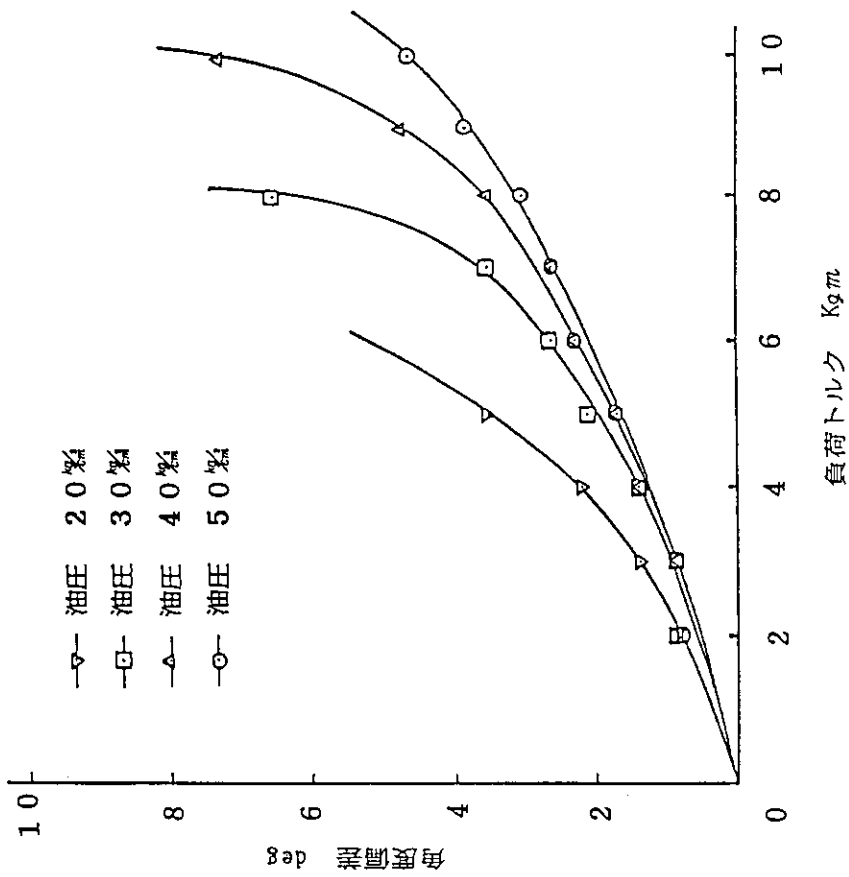


図 5.1 R.A.の静特性

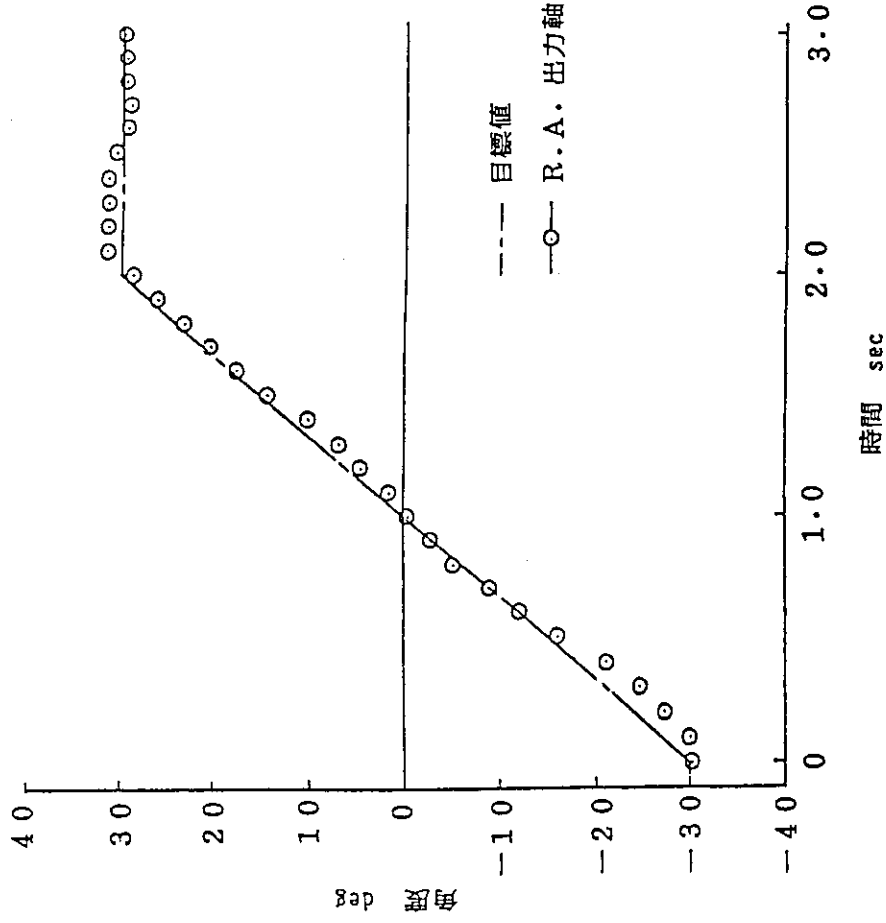


図 5.3 R.A. ランプ応答試験結果 (その 2)
($P = 40 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$, $I = 2.61 \text{ [kg}\cdot\text{m}^2\text{]}$)

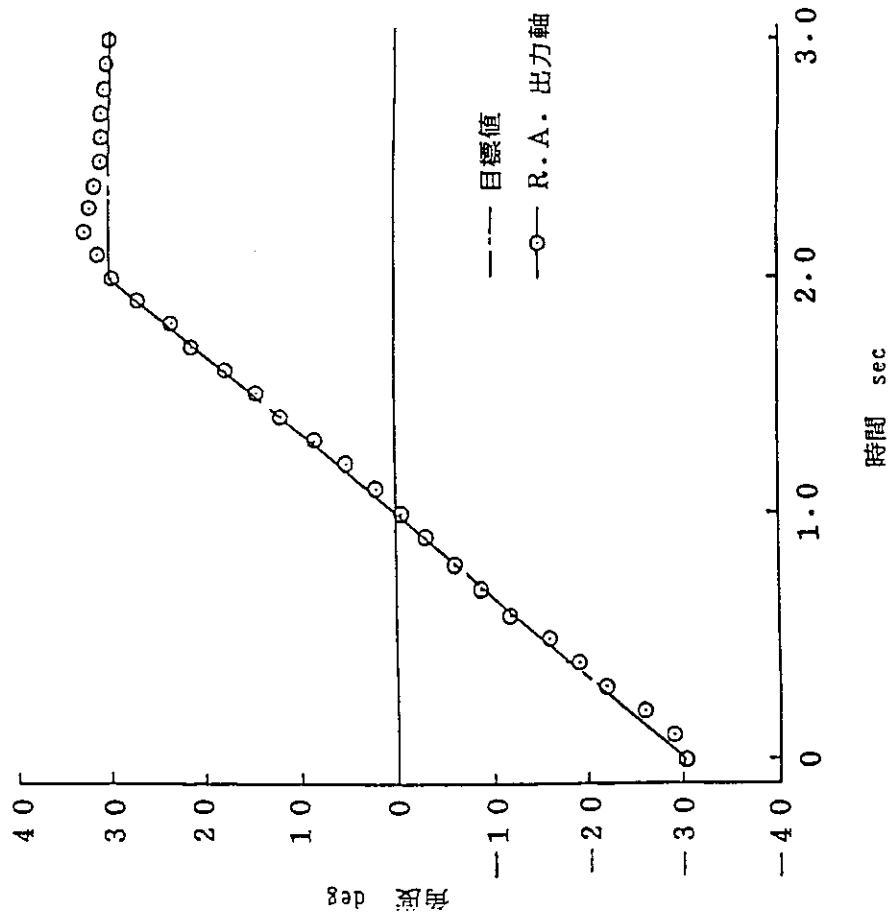


図 5.3 R.A. ランプ応答試験結果 (その 1)
($P = 40 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$, $I = 0 \text{ [kg}\cdot\text{m}^2\text{]}$)

6. 歩行実験

作成した転回パターンを2足歩行ロボットWL-10Rに出力し、歩行実験を行い、システムの評価を行った。

6.1 実験目的

作成した転回パターンをWL-10Rに出力することにより転回動作の実現を目的とする。また転回動作を行わせることにより作成した転回パターンの評価を行う。

6.2 実験方法

歩行実験は、転回パターンを作成し、それを機械モデルに出力し転回動作を行わせることにより行う。

6.3 実験結果

歩行実験により、機械モデルに再現性のある安定な0~360[deg]の静的転回を実現した。実現した転回の転回角、歩行時間を表6.1に示す。また、右軸脚右転回の転回角度80[deg]の様子を写真6.1に示す。

表6.1 実現した転回の転回角と歩行時間

歩 容	転回角 θ deg	歩行時間(1歩) sec
転 回	$0 < \theta \leq 20$ [deg]	1 0. 1
	$20 < \theta \leq 40$ [deg]	1 0. 6
	$40 < \theta \leq 80$ [deg]	1 1. 5
	$80 < \theta \leq 160$ [deg]	1 9. 2
	$160 < \theta \leq 180$ [deg]	2 6. 9

補間数16点, カウンタ25 [msec]

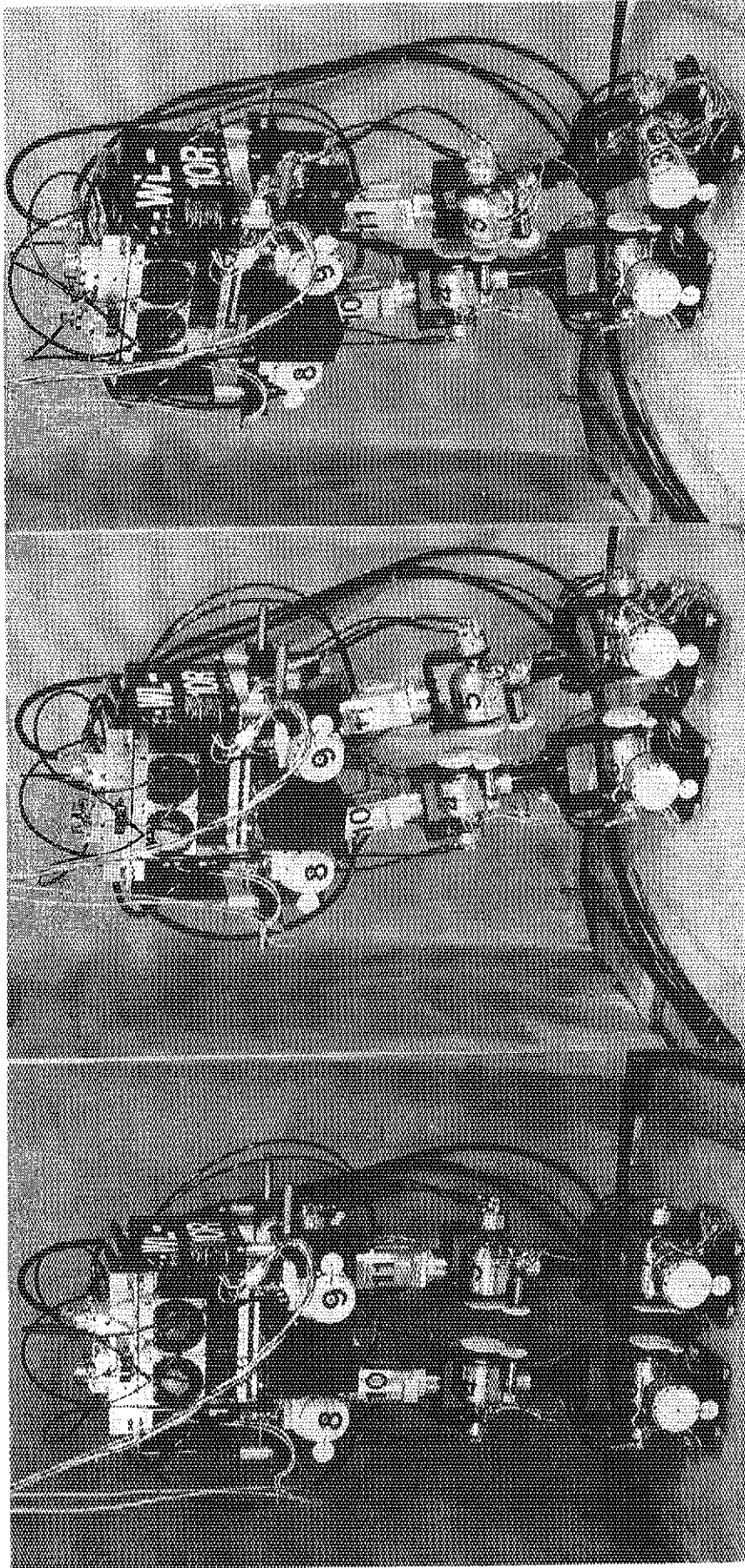


写真6.1 実現した転回 (80 [deg]) (その1)

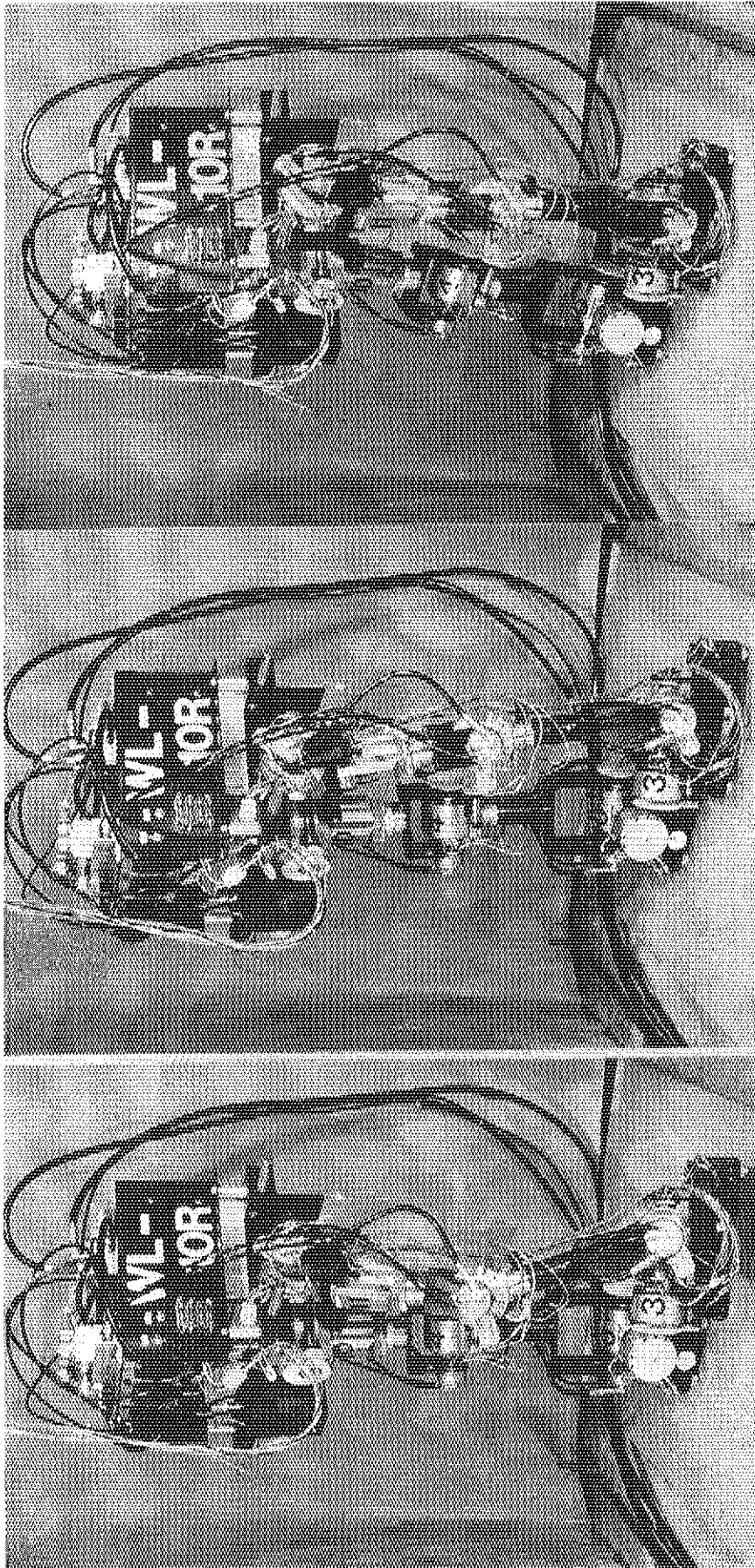


写真6.1 実現した転回 (80 [deg]) (その2)

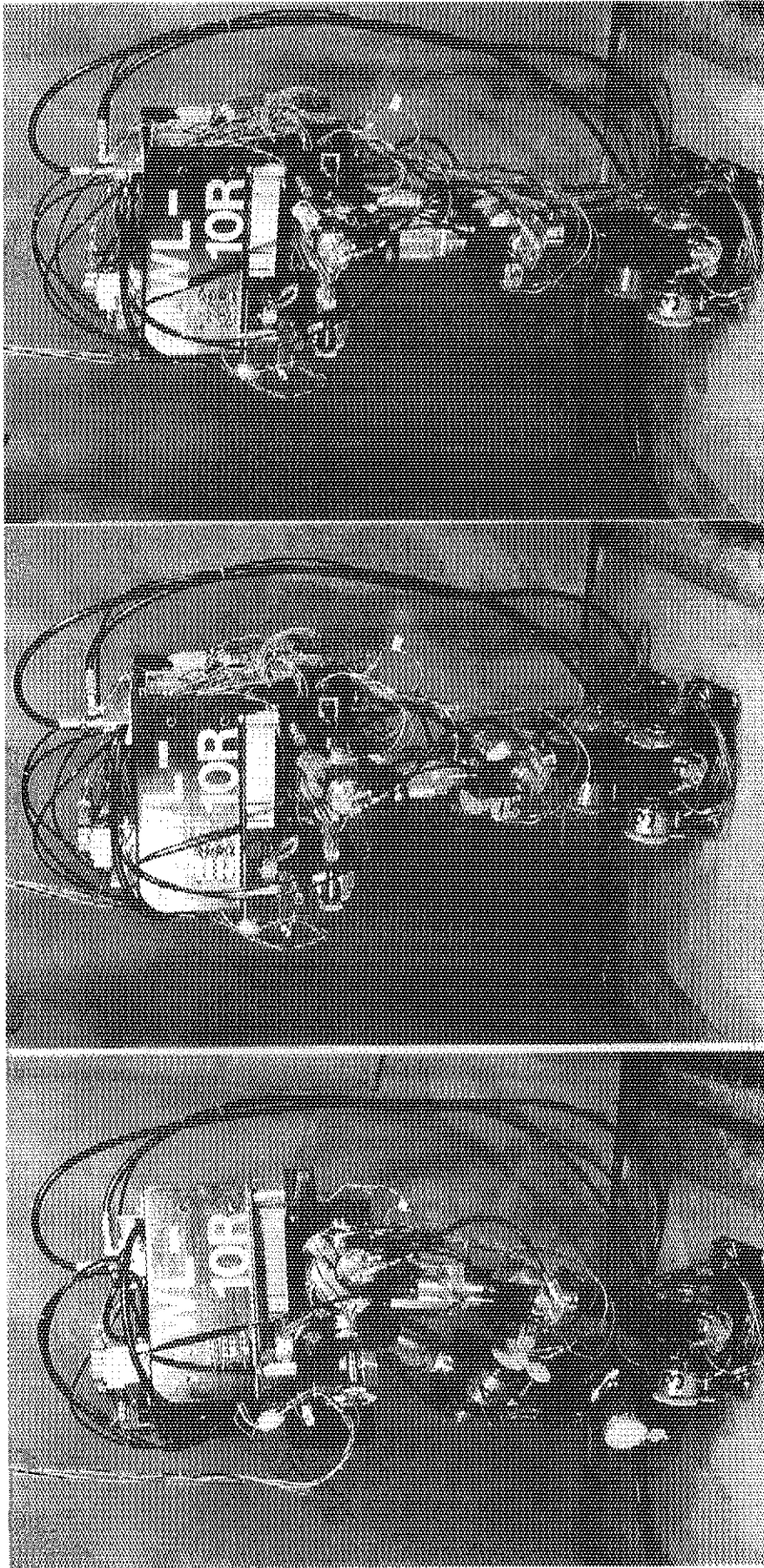


写真6.1 実現した転回 (80 [deg]) (その3)

7. おわりに

本報告は、方向転換動作が可能な2足歩行ロボットの機械モデル及び制御システムの構成とその方向転換技術について、早稲田大学で開発した2足歩行ロボットWL-10Rに対する調査結果である。

WL-10Rは下肢機構部よりなる片足6自由度の上体機構部を持たない2足歩行ロボットモデルで、プログラム制御により準動直進歩行、静的転回、静的側方歩行を実現している。機械モデルについては、その構造、転回用アクチュエータの静的な所要トルクの算出法、歩行制御に用いたセンサについて、制御システムでは、その階層的なシステム構成とそれらを構成するメインシステム及びサブシステムの概要について述べた。また、転回時における制御則、制御方法について記述し、実際の機械モデルを用いた実験により、再現性のある安定な静的転回を実現した結果について述べた。

この調査結果は、原子力知能化システム技術の研究における2足歩行ロボット研究の推進に非常に有用なものである。

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、本報告書を書く機械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。

7. おわりに

本報告は、方向転換動作が可能な2足歩行ロボットの機械モデル及び制御システムの構成とその方向転換技術について、早稲田大学で開発した2足歩行ロボットWL-10Rに対する調査結果である。

WL-10Rは下肢機構部よりなる片足6自由度の上体機構部を持たない2足歩行ロボットモデルで、プログラム制御により準動直進歩行、静的転回、静的側方歩行を実現している。機械モデルについては、その構造、転回用アクチュエータの静的な所要トルクの算出法、歩行制御に用いたセンサについて、制御システムでは、その階層的なシステム構成とそれらを構成するメインシステム及びサブシステムの概要について述べた。また、転回時における制御則、制御方法について記述し、実際の機械モデルを用いた実験により、再現性のある安定な静的転回を実現した結果について述べた。

この調査結果は、原子力知能化システム技術の研究における2足歩行ロボット研究の推進に非常に有用なものである。

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、本報告書を書く機械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) 加藤高明, 榊和敏: 油圧式2足歩行機械による準動歩行の研究, 昭和53年度早稲田大学卒業論文.
- (2) 加藤高明: 2足歩行機械システムの開発, 昭和55年度早稲田大学修士論文.
- (3) 高西淳夫: 2足歩行機械の開発 - 足首部にトルク制御機構を付加した2足歩行機械による準動歩行の研究 -, 昭和56年早稲田大学修士論文.
- (4) 内藤原平, 他: 2足歩行機械システムの開発 - 足首部にトルク制御システムを付加した2足歩行機械による準動歩行の研究 -, 昭和56年度早稲田大学卒業論文.
- (5) D.C.Witt: The 'Duckling' Lower-Limb Prothesis, University of Oxford, Report NO 1049/72/10, (1972).
- (6) 加藤一郎, 他: 2足歩行ロボット (W A B O T - 1) の開発, バイオメカニズム2, 東大出版会, 173/84, (1973).
- (7) D.C.Witt: The Development of an Automatically Stabilized Powered Walking Device.
- (8) M.Vukobratovic (加藤, 山下訳): 歩行ロボットと人工の足, 日刊工業新聞社, (1975).
- (9) 高橋利衛: 基礎工学セミナー, 現代数学社, 141-142, (1976).
- (10) B.W.Kemighan, D.M.Ritchie (石田晴久訳): プログラミング言語C, 共立出版, (1981).
- (11) 石川浩: 動歩行可能な2足歩行機械システムの開発, 昭和57年度早稲田大学修士論文.
- (12) 石田昌巳, 他: 動歩行可能な2足歩行機械システムの開発, 昭和57年度早稲田大学卒業論文.
- (13) 高西淳夫: 2足歩行ロボットによる準動歩行, 日本ロボット学会, (1983).
- (14) Ichiro Kato, Atsuo Takanishi, et al.: The Realization of Plane Walking by The Biped Walking Robot WL-10R, Ro.man.sy, (1984).

付 録

付表1 各自由度 R. S. A. の仕様

諸 元	足首ピッチ	足首ロール	膝	股ピッチ	股ロール
最大静トルク kgf・m	12	5	18	9	16
実用トルク kgf・m	30	20	30	20	30
パワー kgf・m/sec	20.1	2.33	11.3	5.82	3.49
流量 l/min	2.01	0.233	1.13	0.582	0.349
可動角 deg	90	60	90	90	60
理論排油量 cc/rad	48.75	33.60	50.37	33.75	51.07
ベーンタイプ	ダブル	トリプル	ダブル	ダブル	トリプル
重量 kg	3.72	1.95	4.28	4.45	3.20
外形* A×B mm	108×120	108×63	130×100	140×88	108×74
最大速度 rad/sec	2	2	2	2	2
使用圧力 kgf/cm ²	60	60	60	60	60
入力軸直径 mm	8	8	8	8	8
出力軸直径 mm	35	35	35	35	35

*外形は付図1参照

付表2 転回用大腿部ピッチ軸 R. A. の仕様

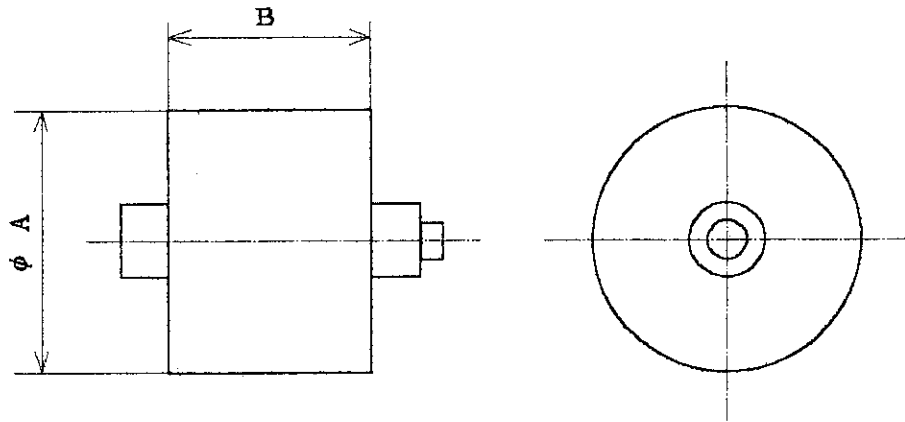
項 目	諸 元
型 番	S250-2V-22
最高使用圧力	21 kgf/cm ²
最大揺動角度	90 deg
流入量 (於最大揺動角度)	41.8 cm ³
1 rad当りの流入量	26.8 cm ³ /rad
最低作動圧力	3.0 kgf/cm ²
重 量	1.13 kg
製 造	油研工業(株)

付表3 サーボ弁の仕様

項 目	諸 元
形 式	J077-032
流 量	0.98 l/min
圧力損失(於上記流量)	21 kgf/cm ²
分 解 能	0.5%
圧力ゲイン	定格流量の1.0% で使用圧力の30%
ヒステリシス	3%
定格流量精度	±10%
流量対称性	10%
温度変化による中立点移動	2%
圧力変化による中立点移動	2%
内部漏洩量	0.12 l/min以内
耐 圧	供給圧力の150%
リターンポート耐圧	供給圧力の100%
使用温度範囲	-40~135°C
定格電流	5 mA
コイル抵抗	500 Ω
1コイル	1000 Ω
周波数特性	100 Hz
重 量	約0.9 kg
使用圧力範囲	14~207 kgf/cm ²
製 造	ムーグ社

付表4 ポテンショメータの仕様

項 目	諸 元
型 番	CPP-35
全 抵 抗	5 kΩ
分 解 度	無限小
直 線 度	±0.2%
有効電気角	340°
全抵抗偏差	±20%
定格電力	2 W/70°C
耐 電 圧	AC1000V 1分間
絶縁抵抗	DC1000V 100MΩ以上
機 械 角	360° エンドレス
回転トルク	約5g·cm
重 量	40 g
製 造	緑測器株式会社

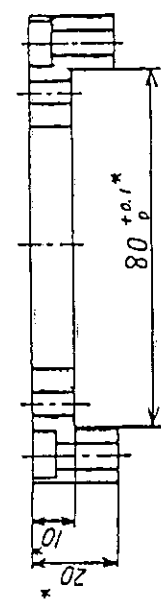
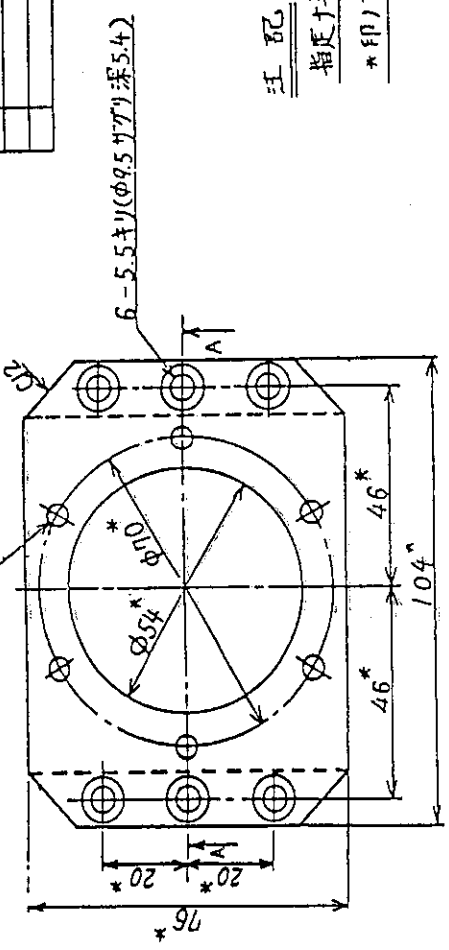


付図1 R.S.A.の外形

記号	原	尺	年月日訂正	原尺	年月日訂正	作	機
	号	寸					



22	11	31	7
435	000	50	7



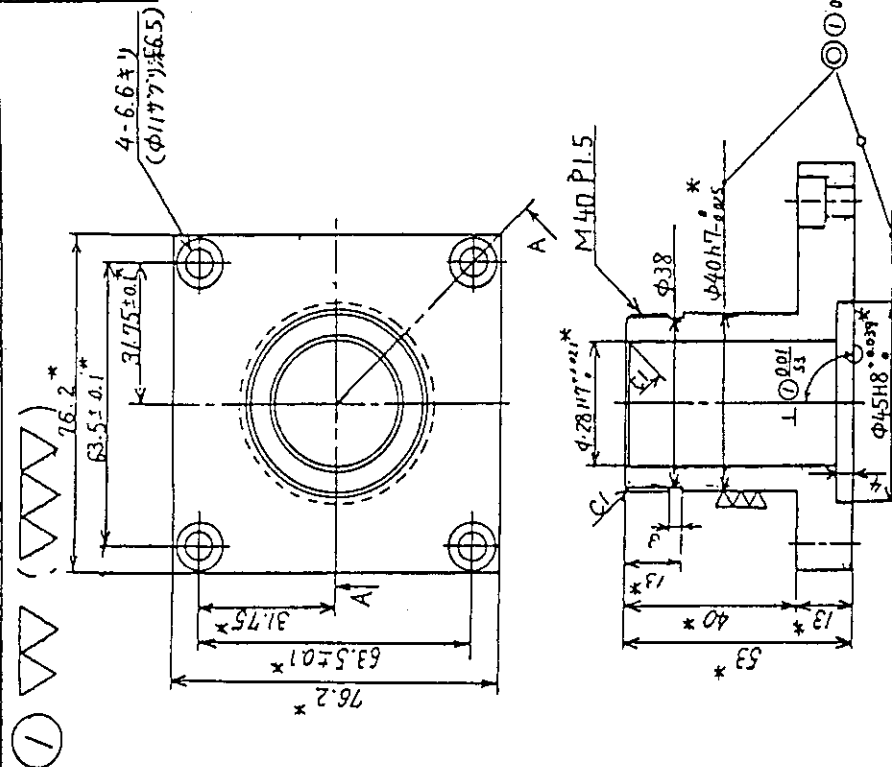
断面 A A

注記
 指定キカド部ハ糸面取リトスル
 *印ヲ凡ルハハ寸法記録ノコト

1	分	部	名	PL	付	図	2	原	尺	寸	法	PL	7L-1	IOS 376-179
X	材	種	名	PL	付	図	2	原	尺	寸	法	PL	7L-1	IOS 376-179
	材	種	名	PL	付	図	2	原	尺	寸	法	PL	7L-1	IOS 376-179
	材	種	名	PL	付	図	2	原	尺	寸	法	PL	7L-1	IOS 376-179
	材	種	名	PL	付	図	2	原	尺	寸	法	PL	7L-1	IOS 376-179
	材	種	名	PL	付	図	2	原	尺	寸	法	PL	7L-1	IOS 376-179
	材	種	名	PL	付	図	2	原	尺	寸	法	PL	7L-1	IOS 376-179
	材	種	名	PL	付	図	2	原	尺	寸	法	PL	7L-1	IOS 376-179
	材	種	名	PL	付	図	2	原	尺	寸	法	PL	7L-1	IOS 376-179
	材	種	名	PL	付	図	2	原	尺	寸	法	PL	7L-1	IOS 376-179
	材	種	名	PL	付	図	2	原	尺	寸	法	PL	7L-1	IOS 376-179

記号	規格	年月日訂正	番号	図号	729 AMF	作	者
	手入 3-3=30V	92.1.24					

注記
 指定キカド部ハ糸面取リトスル
 *印ノ寸法ハハ寸法記録ノコト



材料	A3032DE	材料仕上	0.25
加工	1130	材料コード	
GTコード	4	三角法	
付図	付図 4	原図縮尺	1
品名	SHAFT	コード	
図番		SHAFT	
製図		シャフト	
承認			
変更			
承認			

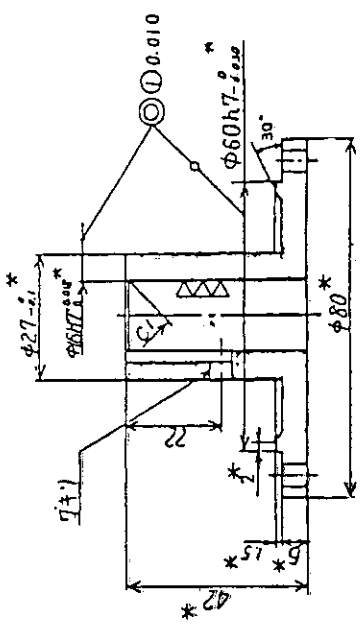
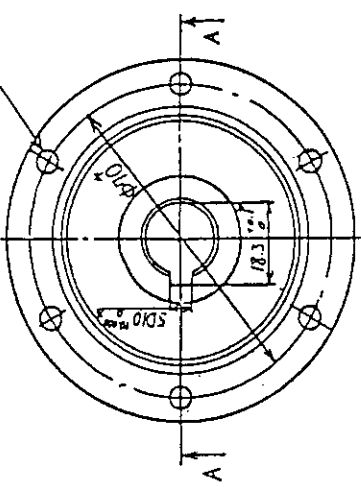
10S976-181

SIZE 181

断面 A A

記号	来	区	年月日	訂正	補充	配図	729 AMF	作	番
	早大D研	1-4-20	21-6-27						

① 6-5H7/6-5H7/0.012/1-3



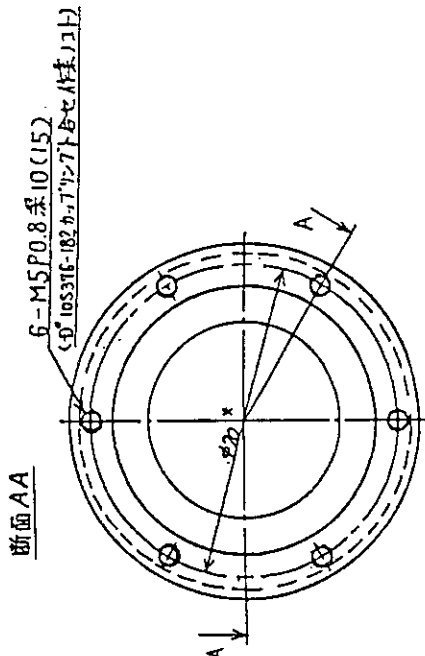
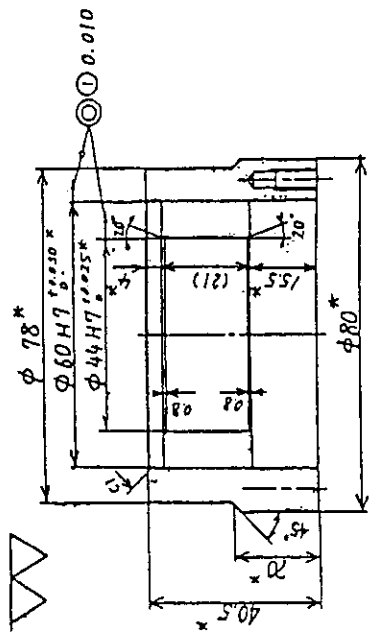
断面 AA

注記
 指定寸法カド部ハ糸面取りトスル
 *印ノ了ルモノハ寸法記載ナシト

1	X	SPRING	GTコード	7230	AS2BE	φ12
1		付図 5				
C.P.E.N-G						10S376-182
カ、7、1、2、7						
原図						原図縮尺
縮尺						
材質						原図縮尺
加工						
公差						原図縮尺
表面						
その他						原図縮尺
備考						
日付						原図縮尺
承認						
作成						原図縮尺
検査						
工程						原図縮尺
組立						
完成						原図縮尺
納品						
その他						原図縮尺
備考						

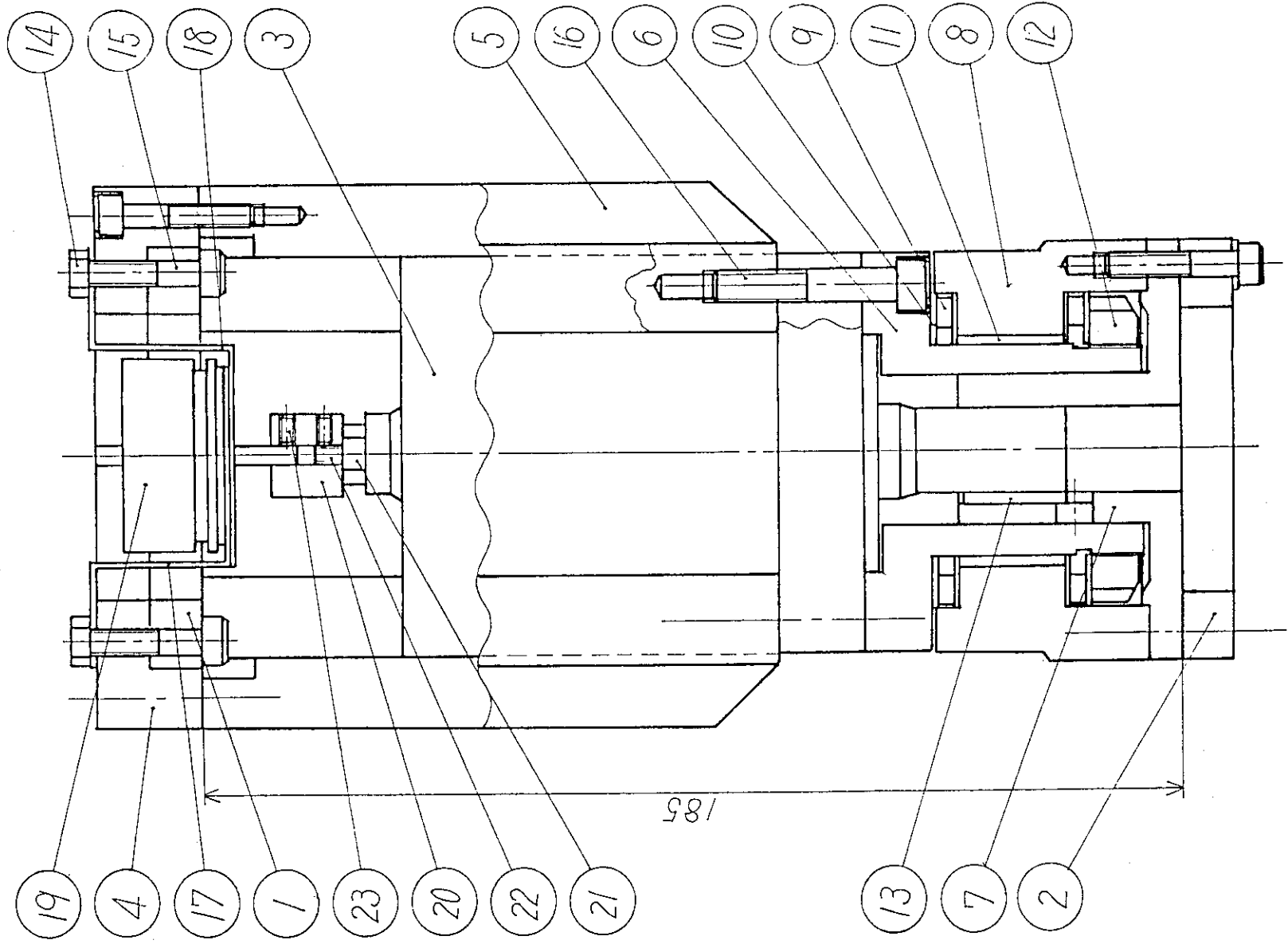
記号	東	年月日訂正	検査	品名	製作
	東	82.0.1-6ニヨル			

注記
 指定ナキカド部ハ糸面取りスル
 *印ノアルモハ寸法記録ノコト



6-M5P0.8 糸 10 (15)
 (0' 10S316-182 k7-17) 寸法ニ依リテ

X		CYL	17230	A 50S2DE	0.28
新	旧	品名	GT コード	材料	単位
品	品	名	材	名	量
名	名	付	付	付	付
名	名	名	名	名	名
名	名	名	名	名	名
付図 6			原寸	原寸	原寸
CYL			17230	A 50S2DE	0.28
シリ>9-			IOS 376-184		



品番	品名	材	質	個数	備考
23	六角穴付止めねじ	市販		2	M3×5 ²
22	六角穴付止めねじ	市販		1	M4×10 ²
21	出力軸取付ボルト	市販		1	M6×12 ²
20	軸継ぎ	ジュラルミン		1	
19	ポテンショメータ	市販		1	緑測器 CPP-35
18	ポテンショ取付板	アルミ		1	
17	ポテンショ取付板	アルミ		1	
16	六角穴付ボルト	市販		4	M6×35 ²
15	六角穴付ボルト	市販		18	M5×0.8×25 ²
14	六角ナット2種 M5	市販		6	
13	平行キ-	市販		1	5×5×20 ²
12	転がり軸受用ナット	市販		1	AN08
11	ドライブアソング	市販		1	大同X51L DB4020
10	スラストワッシャ	市販		4	IKDタイプ AS4060
9	スラストニードルベアリング	市販		2	IKDタイプ NB40603
8	シリンダ-	ジュラルミン		1	
7	カップリング	S45C		1	
6	シャフト	ジュラルミン		1	
5	ブラケット	ジュラルミン		2	
4	プレート	ジュラルミン		1	
3	ロータリーアークエータ	市販		1	油研工業 S250-2V-22
2	膝部L形部材	C.F.R.P.		1	
1	腰部L形部材	C.F.R.P.		1	

図名 転回用大腿部組立図

付図 7