

気 238

— 学位論文 —

実時間二足歩行機械 Biped Walker に関する研究

南方 英明

東京大学大学院 工学系研究科 電気工学専攻

指導教官：堀 洋一 助教授

— 1996年12月 —

# 目次

<b>第1章</b>	<b>緒言</b>	<b>1</b>
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目標	2
1.3	論文の構成	3
<b>第2章</b>	<b>二足歩行機械の現状</b>	<b>5</b>
2.1	脚式移動の魅力	5
2.1.1	脚式移動機械の特性	5
2.1.2	脚式移動機械の問題点	7
2.1.3	脚式移動機械の研究について	7
2.1.4	研究課題	12
2.1.5	動物の歩き方	13
2.1.6	生物への回帰	16
2.2	人間の歩行の研究	16
2.2.1	脳の働き	16
2.2.2	人間とロボットの差異	16
2.3	ロボットの歩行とその分類	22
2.3.1	総括	22
2.3.2	代表的なロボット	21
2.4	歩行の解析	23
2.4.1	運動方程式	23
2.4.2	ZMP規範	24
2.4.3	角運動量規範	27
<b>第3章</b>	<b>仮想倒立振子法の提案</b>	<b>30</b>
3.1	実時間システムの重要性	30
3.1.1	従来手法との差異	30
3.1.2	実時間軌道生成の方針	30
3.2	制御の階層化・役割分担	32
3.2.1	歩行の階層制御	32

	3.2.2	制御指針	33
3.3		中位レベル制御	34
	3.3.1	歩行パラメータの設定	34
	3.3.2	仮想倒立振子法	35
	3.3.3	加減速制御	37
	3.3.4	仮想倒立振子モデルへの拘束	38
3.4		下位レベル制御	39
	3.4.1	軌道設計	39
	3.4.2	遊脚軌道の選択	41
	3.4.3	ZMP安定規範による歩行安定性の検証	43
	3.4.4	ロバストサーボの採用	44
<b>第4章</b>		<b>Ostrich-Iの開発</b>	<b>47</b>
4.1		システム構成	47
	4.1.1	ハードウェア	47
	4.1.2	ソフトウェア	49
4.2		Ostrich-Iによる歩行実験	50
	4.2.1	実時間可変速歩行の実現	50
	4.2.2	外乱に対するロバスト性の検証	55
4.3		ガイドレールを外した場合	56
	4.3.1	歩行実験	56
	4.3.2	ガイドの有無による比較	63
	4.3.3	ガイド無し歩行に関する検討	63
4.4		まとめ	64
<b>第5章</b>		<b>仮想倒立振子法の拡張</b>	<b>65</b>
5.1		受動的矢状面拘束とその限界	65
	5.1.1	足の裏で拘束する場合	65
	5.1.2	上半身の相互作用で保証する場合	65
5.2		能動的前額面運動の制御	69
	5.2.1	下半身運動による前額面運動制御	69
5.3		仮想倒立振子法の3次元への拡張	69
	5.3.1	前額面における倒立振子の導入	69
	5.3.2	定常歩行時における矢状面・前額面運動の同期	70
	5.3.3	加減速時における矢状面・前額面運動の同期	72

5.4	シミュレーション	74
5.4.1	ZMP安定規範による歩行安定性解析	74
5.4.2	ハードウェアに関する制約と実現可能性	76
<b>第6章</b>	<b>Ostrich-II の開発</b>	<b>78</b>
6.1	システム構成	78
6.1.1	ハードウェア	78
6.1.2	ソフトウェア	80
6.2	Ostrich-II による歩行実験	81
6.2.1	定常歩行と安定歩行領域	81
6.2.2	実時間可変速歩行の実現	89
6.2.3	歩行パラメータ推移に関する考察	94
6.2.4	鳥型・人間型歩行の比較	96
6.3	まとめ	99
<b>第7章</b>	<b>結言</b>	<b>100</b>
	謝辞	102
	研究業績	103
	参考文献	105
<b>付録 A</b>	<b>二足歩行機械の設計</b>	<b>109</b>
A.1	二足歩行機械の製作	109
A.2	Ostrich-Iの設計図	110
A.3	Ostrich-IIの設計図	110

# 第1章

## 緒言

### 1.1 研究の背景

二足歩行は、高齢化社会を睨んだ医療用、看護用ロボットの移動手段として注目すべきポテンシャルをもっている。しかしその実用化に関してはいくつかの課題が残されている。人間と同様に動的なバランスをとりながら歩行を実現する研究については、動力学的な安定規範をもとに適切な関節軌道を求め、実現するもの[20],[23]、歩行持続性に着目し、足首周りの角運動量を補償しながら歩行を行うもの[16],[17]、倒立振子モードへの拘束制御を行い、歩行の全エネルギーを見通し良く扱うもの[18]、などにより解決されてきた。環境への適応性についてみると、路面形状の変化に実時間で対応する研究[46]もなされている。

しかしながら、状況に応じて「歩容（歩行の仕方）そのもの」を変化させ、柔軟に対応することに着目した研究は始まったばかりである[47]。文献[47]は着地位置に着目したものであるが、アクチュエータトルクのより効果的な利用の余地があると思われる。

更にネットワーク技術の発達によりロボットの活用範囲を大きく拡大することが期待されている。例えば、現在通産省において将来のロボット大型プロジェクトの準備段階として Realtime Remote Robotics（実時間遠隔制御ロボット技術）「アールキューブ」が進められている（図1.1）[48]。遠隔操作の技術は、宇宙や海中、原子力発電所などの極限環境において、人間と同等以上の作業能力を実現するために研究が進められており、平滑面でない複雑な環境を移動することを想定して脚式移動にかかる期待も大きい。しかしその要素技術としては、脚式移動はマニピュレーション機能などと比較して立ち遅れていることは明白である。特に、実時間性の観点から操作性をみると、以下に挙げるように脚式移動は非常に困難な問題を抱えている。

- ・放っておけば転倒するような、もともと不安定な対象であること
- ・局所的な安定性の概念、例えば関節軌道が安定であろうとも、それが歩行そのものの安定性には必ずしもつながらないこと
- ・視覚情報の取得は歩行安定性の獲得に重要な寄与をはたすと思われるが、この分野の研究はまだ発展途上であること

すなわち、動作の安定性に対する評価を実時間で得ることが非常に困難であり、実時間の歩容変更などは実現が非常に困難である。

実時間性を要求されないような場合であれば、動作パターンをいくつも用意してプログラムを切り替えながら対処することも考えられる。しかし定められた環境、定められた作業パターンを行うのであれば、人間を介在した操作システムなど必要ない。よって動作パターンは無数に、あるいは実時間で作成できるのでなければ意味をなさない。

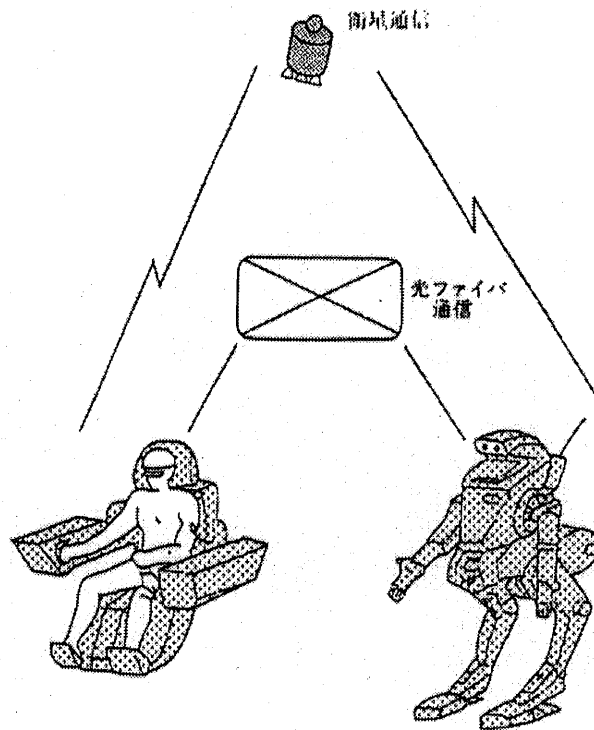


図 1.1: アールキューブ概念図[48]

ここで、問題を見通しよくするために身近なものを例にしたい。ラジオコントロールカーやラジオコントロールヘリコプターなどは、操作者が遠隔操縦で動きを実時間で自在に操ることができるものである。このようなものの歩行機械バージョンが、我々の必要とする脚式移動機構のプロトタイプではなからうか？

## 1.2 研究の目標

本論文の目的は、ラジコンカーやラジコンヘリコプターのように操縦者が遠隔操作で動きを実時間で操ることができるような二足歩行機械の構築を目指すことである。スレーブとなる歩行機械は単体で安定歩行するような若干のインテリジェンスが必要となる。そして、人間がナビゲーションなどの大局的な判断を行い、それらがうまく統合されなければならない。このような歩行機械を **Biped Walker** と呼びた

い。これは筆者による造語で、「二足で歩くもの」という意味である。あえて二足歩行ロボットという言葉は使っていない。これはロボットという言葉に囚われずに、歩行システムという移動手段を我々人間がツールとして使いこなすことを積極的に提案したいためである。

本論文では、操作者が歩行パラメータを指示し、歩行機械がそれに応じて歩き方を変えるものを提案する。アプリケーションとしては、義足やリモートブレインタイプの実験用ロボット、極限作業用の移動機構（搭乗用、およびスレーブマシン）などを想定している（図1.2）。

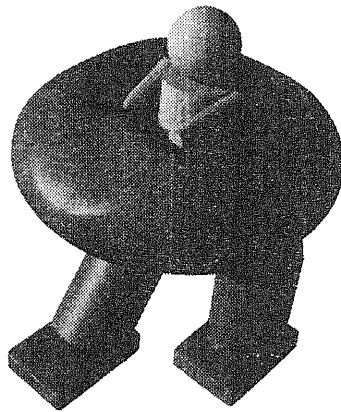


図 1.2: 搭乗型二足歩行機械 Biped Bike の概念

目標とする動作は「直線歩行において、実時間で歩行速度を変更する」こととした。これは未だ実現されていないことであり、その完成のもたらす価値は高い。さらにその制御方策を構築することは、動物の歩行の研究に対する機械側からの知見を与えることが期待できる。

一方、ロボット制御の立場で見れば、歩行機械の制御は階層制御の必要性・有効性を実証する意味で適していると思われる。下位レベルの制御として歩行機械の安定化を考え、中位レベルの制御として歩容を操ること、そして上位レベルでナビゲーションを対処するという考え方は、階層制御の典型例であり、機械と人間が役割分担しながら目的を達するという点からみても非常に有意義と考えられる。

### 1.3 論文の構成

以上に述べた研究の背景と目標を踏まえ、目標を達成すべく進めた内容を以下に記す。

まず、第2章では従来の二足歩行ロボットに関する研究がどのように行われてきた

かを、人間の歩行の研究などを取り混ぜて説明し、二足歩行をどのように解析すればよいかについて述べる。

第3章では実時間で歩行速度制御を実現する手法として「仮想倒立振子法」を提案する。この手法は、歩行パターンをあらかじめ求めて、プログラムに貯えておくといった従来手法とはまったく異なり、実時間で軌道作成から実現までを行うものであり、リモートコントロールによる加減速を可能とするものである。なお、この章では矢状面（進行方向に対して平行な平面）における運動を扱うものとする。

第4章では試作した1号機”Ostrich-I”における実機実験を示す。”Ostrich-I”は矢状面に6自由度を持ち、前額面（進行方向に垂直な面）の運動は腰部に装備したボールトランスと外部のガイドレールにより拘束している。

第5章では「仮想倒立振子法」を3次元歩行へと拡張する。これは矢状面、前額面、2つの平面での運動を考慮したものであり、ガイド等を必要としない完全な自立型の二足歩行における歩行速度の変更の手法の提案をおこなう。

第6章では試作した2号機”Ostrich-II”における実機実験を示す。”Ostrich-II”は矢状面に6自由度、前額面に4自由度を持ち、左右のバランスをとりながらの加減速を実現する。

第7章で研究結果についてまとめる。



## 第2章

## 二足歩行機械の現状

## 2.1 脚式移動の魅力

二足歩行に関する研究に触れる前に、準備として脚式移動全般について、その魅力、および研究動向に触れたいと思う。

## 2.1.1 脚式移動機械の特性

脚式移動機械の実用性は以下の6点に分類できると考えられる。

## ・地表支持点の任意選択性

車輪、クローラは荒れ地をタイヤあるいは覆帯で平滑化して移動するが、脚式機械は脚支持点を適応的に選択し、凹凸の激しい不整地を滑らかに移動できる。

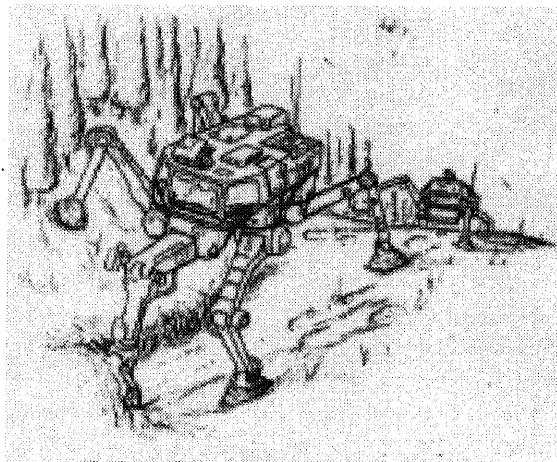


図 2.1: 山岳地の瓦礫の山を登る歩行機械[33]

## ・離散的な支持点を構成する機能

車輪、クローラは連続的な軌を残すが、脚式機械は脚支持点が離散的となる。ゆえに配管環境のまたぎ越えなどの移動運動を容易に実現できる。また、地雷除去ロボットのように接地点を正確に選択しなければならない用途に必要とされている。

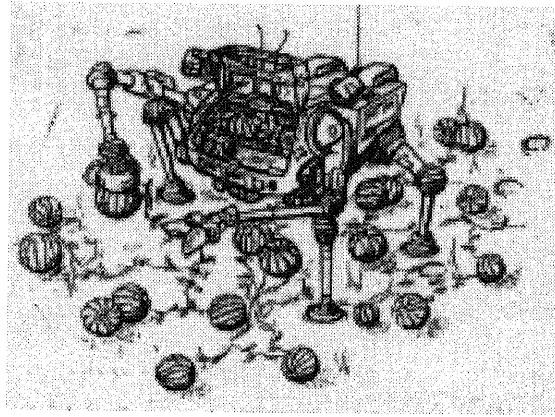


図 2.2: スイカ収穫用歩行機械[33]

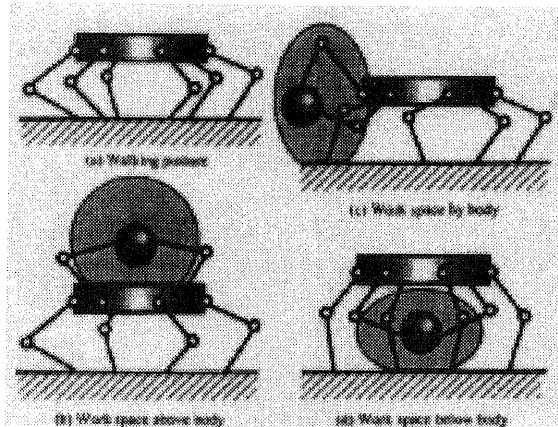


図 2.3: リム・メカニズムの応用[34]

- ・接地面圧の低減化機能

足首の受動・能動的自由度によって、足裏を地表形状に従って支持できる。

- ・無スリップ方向転換機能

自然環境の破壊を最小限に抑えることが必要な土木機械、畳や板の間などの傷つきやすい環境を動きまわらなければならないホームロボットなどには必要となる。

- ・能動的支持機能

作業時において、車両型は安定支持のためにアウトトリガーを利用するが、同様のことが脚によって実現できる。さらに、アウトトリガーとしての接地位置を能動的に環境に適応して設定できる。

- ・マニピュレーション機能

状況に応じて脚を腕のように用いることが可能である。また、腕・脚の使い分けをすることが可能である。例えば、軽いものをハンドリングする際は腕で、重いも

のは腕を固定して脚力で、という人間のまねが可能となる。

文献[34]においては、マニピュレーションと移動機構を胴体と環境との力学作用として統一的に扱う概念を提示しており、移動機構の範疇を越えた展開が期待される(図2.3)。

### 2.1.2 脚式移動機械の問題点

現在の脚式ロボットが抱える問題点を列記すると以下のようなになるであろう。

- ・鈍い(制御が複雑)
- ・重心が高い(脚式ならば当然か)
- ・移動速度が遅い
- ・パワー不足(筋肉型アクチュエータが欲しい)

改善するには？

移動速度に関しては、もともと平等な評価とはいえない。車輪型は平坦面を高速に移動すべくできたものであり、そのために我々は環境を平坦化してきた経緯がある。ゆえに、多少の凸凹道で勝負するとしよう。「走る」という手段により、良い勝負になるかもしれない。しかし、「ロボットを走らせる」のは容易なことではない。

パワーの面については、小型、強力な筋肉型アクチュエータの登場に期待したい。ただし、現在提案されている静電型のフィルムアクチュエータのようなものは、高電圧を必要とするなど、小型化・自律化に向けての障害はまだまだ大きい。

制御の面については、各種脚移動様式について、どのような研究が行われてきたかに触れた後に言及したい。

### 2.1.3 脚式移動機械の研究について

脚移動方式には歩行と走行があるが、現在走行を行えるロボット(機械)は存在しない。ゆえに本節ではいままで行われてきた脚式の歩行および跳躍ロボット研究に焦点をあてる。

用語

- ・支持脚, 遊脚

地面に足底が接地している脚を「支持脚」、接地していない脚を「遊脚」と呼ぶ。

- ・デューティー比

一歩行周期における支持脚相の比率をデューティー比と呼ぶ。すべての脚のデューティー比が同一であるときレギュラーな歩容（歩き方）と呼ぶ。レギュラーな歩容におけるデューティー比を $\beta$ で表す。

- ・支持多角形

支持脚の接地点を凸上に張った辺で構成される凸多角形を水平面上に投影したもの。

- ・安定余裕

重心の支持面への鉛直投影点と支持多角形の辺までの最短距離を安定余裕と呼ぶ。

- ・静歩行，動歩行

安定余裕を常に保ちながら行う歩行を静歩行，安定余裕が保たれない状態を続けながらの歩行を動歩行と呼ぶ。

## 二足歩行

二足歩行は哺乳類の中でも人間に特有の移動形式である。ゆえに，二足歩行ロボットも基本的には人間の下肢機構を近似あるいは模擬した形態でつくられている。なお，鳥も二足歩行をするので，検討対象となるだろう。

## 多足歩行

一般に多足歩行と呼ぶ場合，四脚あるいは六脚を指す。これは静止時の安定性は三脚以上で十分なことと，制御および機構の複雑さを考慮すると六脚以上は無意味なことが多いためである。また，国内では四脚の研究が，海外では六脚の研究が盛んである。多脚の歩き方については，四脚の議論で大抵のことが説明できるので，ここでは四脚を主にとりあげる。

## 歩き方

四足歩行は二足歩行と異なり，デューティー比や支持位相の様々な組み合わせを選ぶことができる。図2.4は四足動物の歩行パターンの例である [39]。このなかで代表的なものを若干視覚化したものが図2.5である [40]。

クロールは爬虫類，両生類など低速歩行する四足動物に主に使われる。すべての時間にわたって必ず3本以上の脚が接地し，静的安定度が最大となる歩行である。

歩行速度が増すにつれて，同時に支持する脚の数が減少し，ペースでは同側の脚が，トロットでは対角の脚が組になって交互に接地する。

さらに速くなってギャロップになると，すべての脚が地面から離れる期間があら

われるとともに、背中が屈伸するようになる。ギャロップは最も速い移動パターンで、対角に脚の接地が移っていくトランスバース・ギャロップと、回転方向に脚の接地が移っていくローテートリー・ギャロップの2種類がある。

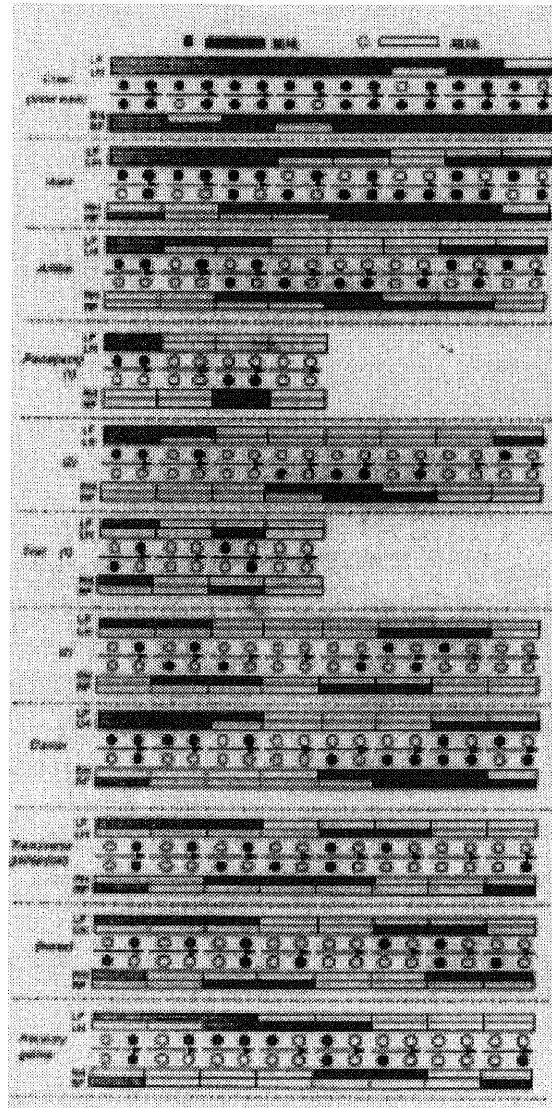


図 2.4: 四足動物の歩行パターン[39]

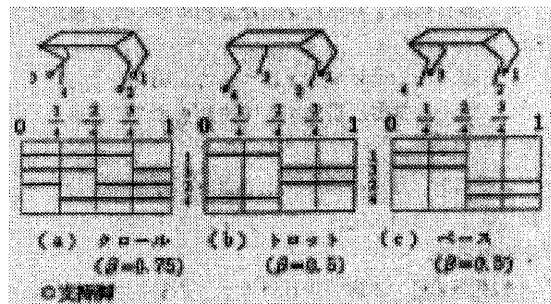


図 2.5: 代表的な四足歩行パターン[40]

## 国内の研究動向

クロール歩行をベースとした四足歩行については、配管のまたぎ越えや階段の昇降など歩行ならではの移動能力が実用段階に入っている。図2.6は原子力施設点検用ロボットである[41]。

研究室レベルにおいては、もっとも速く歩くパターンとしてのトロットをいかにうまく実現できるかに焦点が当たっている。

小型の歩行ロボットについても研究が進められている。図2.7はフレキシブルマイクロアクチュエータ (FMA) を用いたロボットである。特徴としては、水に強く、クリーンなことが挙げられており、マイクロロボットへの応用が見込まれている [42]。

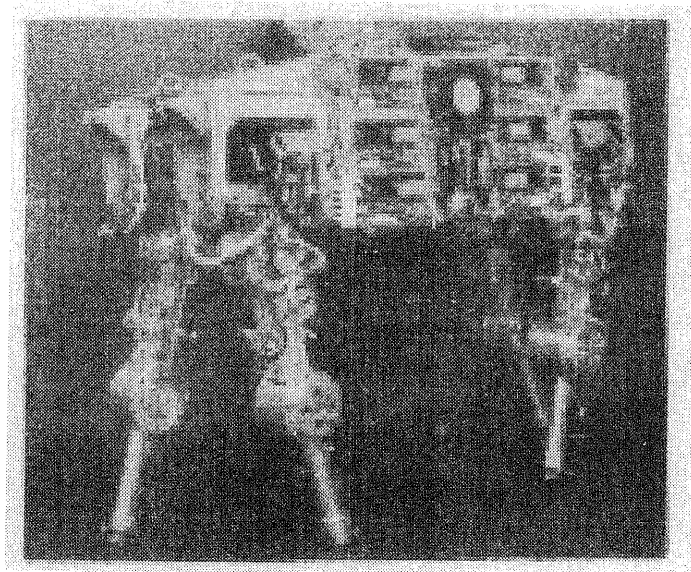


図 2.6: 原子力施設点検用ロボット[41]

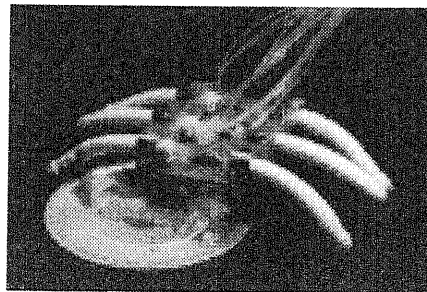


図 2.7: FMA を用いたロボット[42]

## 海外の動向[43]

海外の多足研究は六脚のものが多く、応用分野が惑星無人探査や、林業の機械化などのように、大型のものを想定しているため、移動速度よりも頑丈さや安定度などが考慮されているためだろうか。

## ・ ASV(OSU)

米国オハイオ州立大学で実施された世界最初の完全「自立型」歩行ロボットプロジェクト（図2.8）。

## ・ Ambler(CMU)

米国カーネギーメロン研究所で行われた火星無人探査ロボット計画のプラットフォームとして提案された。昆虫型に囚われない脚の運び方に特徴がある（図2.9）。

## ・ MECANT-I

フィンランドのヘルシンキ工科大学で、林業の機械化の切り札として研究されている自立型六足歩行ロボット。遠隔操作に重点をおいている。

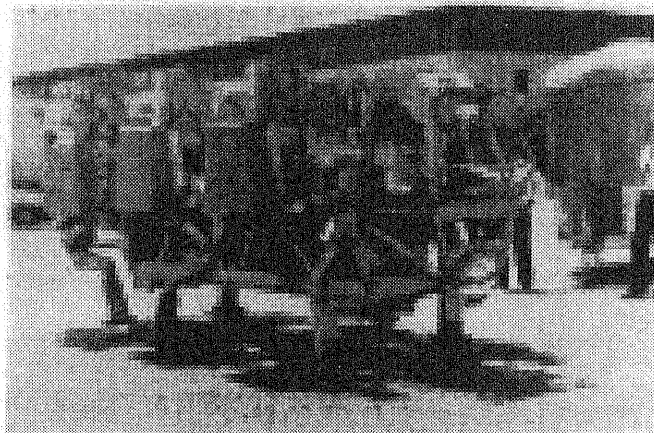


図 2.8: ASV[43]



図 2.9: Ambler[43]

## 跳躍ロボット

動物は歩行から走行へと自然に移行できるが、現在のロボットは残念ながらその段階に達していない。走る（駆ける）のみのロボットというものも、実現できてはいない。「走る」のうち、跳躍部分を取り出した跳躍ロボットが実現されているのが現状である。

## ホッピングロボット

図2.10は Raibert らによるホッピングロボットである。跳躍高さや横方向の移動速度などが制御できる。

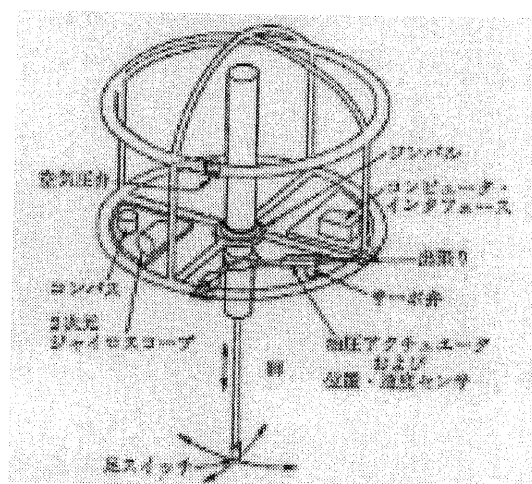


図 2.10: 3次元ホッピングロボット[1]

### 2.1.4 研究課題

これからの研究課題はどのようなものであるか以下で触れる。

#### 環境への対応

脚式移動の最大の利点である悪路踏破性に関しては、実時間の応答性能に非常に大きな問題を抱えている。センシングに関しては、足裏からどれだけの情報が取り出せるようになるかが鍵となっている。また制御の面からは実時間での姿勢復帰の方策を検討していかなければならない。

#### 歩容の適切な選択

二足、多足などは現在のところ自由に旋回できるとはいいがたい。また、二足の場合は状況に応じてゆっくり歩いたり、速く歩いたり、また走ったりといった使い



の場合は状況に応じてゆっくり歩いたり、速く歩いたり、また走ったりといった使い分けを実現できない。多足に関しては、クロールからトロットへの変更といったような歩容変更を滑らかに行うことは非常に困難である。また、安定してギャロップを行えるロボットもない。

以上のように、脚式移動は歩き方を自在に選べるのがメリットであるはずなのに、現状ではそれを自由に行えるものはない。この問題は、歩き方を変更する根拠、制御システムの研究が不十分なことが理由として考えられるだろう。そこで動物の歩容変更についての研究動向を見てみたい。

### 2.1.5 動物の歩き方

ここでは動物がどのような理由で歩き方を変更しているのかを検討する。

#### エネルギーの観点

・フルード数  $\frac{v^2}{gL}$

支持脚足首周りの胴体運動に対して、遠心力  $m \frac{v^2}{L}$  と、重力  $mg$  が働く。この比をフルード数と呼ぶ。

様々な大きさの動物において、トロットからギャロップへの移行は、フルード数が0.5のところで行われている、という調査結果がある。ゆえに、例えばラクダと猫を例にとると、ラクダの足の長さは猫の9倍あり、ゆえにトロットからギャロップへの切り替えは猫が切り替える速度の3倍の時である、となる。実際の観測結果もほぼ追従している。この理由がエネルギー消費の観点から説明できないか、というのが文献[44]である。

#### 二脚

二脚に関しては、人間が歩く際のデータをとることにより、非常に興味深い結果が提示されている。図2.11は成人男性が様々な速度で歩いたり走ったりしたときの、地面との接触力の垂直成分である。この時間波形をフーリエ変換すると、ほぼ2項で表現できる。

$$F = A (\cos(\pi t / T) - q \cos(3\pi t / T)) \quad (2.1)$$

ここで  $q$  は shape factor と呼ばれるが、面白いことに走っている場合は負の値を、歩いている場合は正の値を、そして速く歩けば歩くほど、より大きな正の値になる

ことがわかっている。

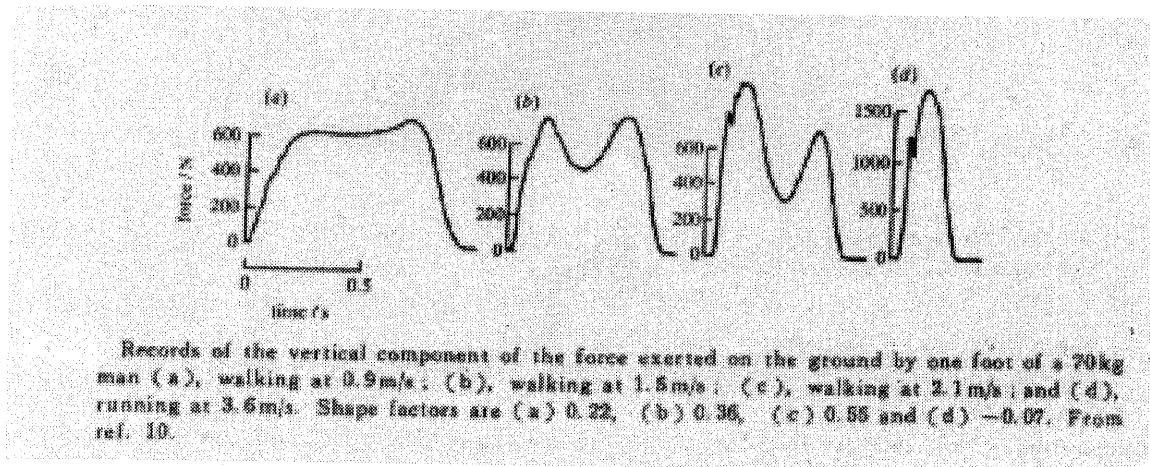


図 2.11: 成人男性が様々な速度で歩行, 走行した場合の床面との垂直抗力

### 走るか歩くか?

人間が普通に歩く時は, 運動エネルギーと位置エネルギーを交換しながらエネルギーをあまり失うことはない。それでは走る時はどうであろうか。この場合は着地時に運動エネルギーと位置エネルギーとも極小状態になるので, エネルギーをばね要素にため込んでいるらしい, というのが解答である。

では, 走るか歩くかは何が基準となっているのだろうか。カンガルーおよび人間について調査してみると, 走り方の位相がまったく違うのに (カンガルーは両足を揃えて跳躍する) フルド数0.5のところではやはり切り替わる。これをエネルギー消費の観点から眺めてみよう。

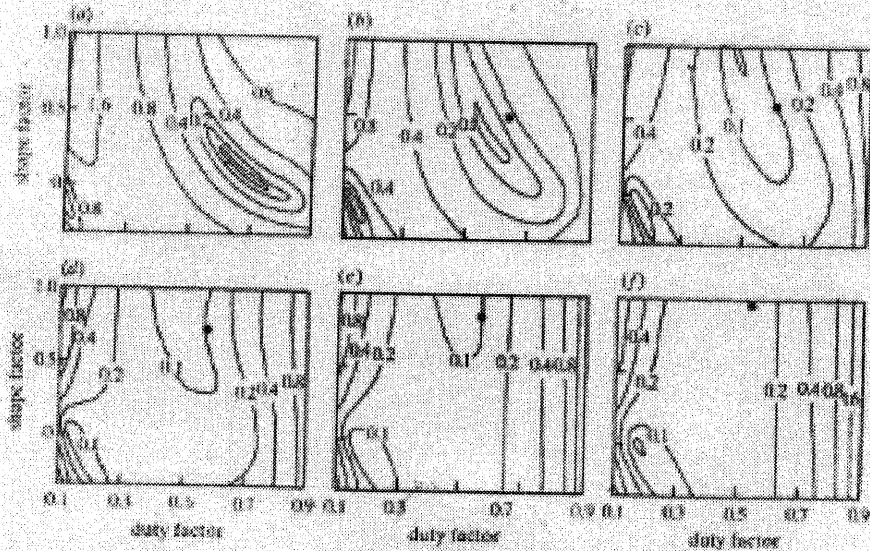
図2.12は, ばね要素を考慮した二脚の数値モデルが様々な歩き方 (走り方) のもとでエネルギーをどの程度消費するかをシミュレーションしたものである。

ゆっくり歩く (走る) 時には, shape factor が小さめで両足支持期間が少し長めの低速歩行のところに極小値が存在する。また, 非常にデューティー比の低い (跳躍期間の長い) 走行も極小値となっている。しかし, エネルギー消費量は明らかに低速歩行が有利との結果になっている。(図2.12 (a) & (b))

速度が上昇するにつれて, 最適な歩行状態が消滅し, 最適値は走行のみとなる。また, 図2.12中における最適状態の歩幅を, 人間の歩幅の傾向を調査した次式[37]と比較しても, ほぼ同じとなっている。

$$S/L = 1.5 (v^2 / gL)^{0.3} \quad (2.2)$$

ここで $S$ は歩幅,  $L$ は足の長さ,  $v$ は歩行速度,  $g$ は重力加速度である。歩行速度が上昇するにつれて, 歩幅が増えていくことを示している。



Work done by the actuators of a model biped in different gaits. Each graph shows duty factor (horizontal axis) and shape factor (vertical axis) with contours showing work per unit distance (arbitrary units). Graph (a) corresponds to a speed (for a biped of adult human size) of 0.4 m/s, (b) to 0.8 m/s, (c) to 1.2 m/s, (d) to 1.6 m/s, (e) to 2.0 m/s and (f) to 2.4 m/s. From ref. 10.

図 2.12: 様々な速度で歩行・走行した場合の消費エネルギーのシミュレーション結果

## 四脚

### クロールからトロットへ

四脚においても、エネルギー消費の観点から歩行状態の変更の理由を説明できるものがある。四脚が低速歩行するときは、クロールと呼ばれる歩容をとる。これは3脚を支持とし、1脚を遊脚とする静歩行である。デューティー比を小さくしていき、歩行速度をあげていくと対角の足を同時に動かすトロットという歩容になる。このクロールからトロットへの変更はフルード数0.5で行われるが、これは前小節の延長で考えることができる。

トロットは前足と後ろ足をつなぐ胴体部分のばねをほとんど利用しない歩き方である。すなわち、二脚が干渉せず前後につながった形とみることができる。ゆえに、脚部のばね要素だけを考慮したモデルで十分であり、二脚と同様の結果が導ける。

### トロットからギャロップへ

トロットからギャロップへの変更は、胴体分のばね要素を考慮しなければ説明で

きない。文献中では詳しく載っていなかったが、結論としてフルード数2.5で切り替わること、観測値もこれに近いことが述べられている。

### 2.1.6 生物への回帰

脚式ロボットの動向をみるにつけ、生物がいかに高度な動作を行っているかを見せ付けられた気がする。ロボットの応用分野が医療用や家庭用に広がるにつれ、「生物への回帰」が進んでいくと考えられる。何気ない動物の動作ひとつひとつにロボット工学の新たな一頁への手がかりが隠されているのかもしれない。以下では二足歩行研究について触れたいと思うが、こういった背景から人間の歩行研究がどのように進んできたかから触れたいと思う。

## 2.2 人間の歩行の研究

人間の歩行の研究は、生理学・運動学的見地、制御工学的見地およびロボット工学的見地から行われている。このうち、生理学・運動学的見地から行われている研究においては、人間の歩行をテレビカメラや筋電図、足底圧計測センサなどを用いて計測し、関節トルクの推定や、生体内における制御機構を解明しようとするものがある。また、義肢の開発を目的としたものもある。これらの研究が与えてくれるものは、ロボットの設計をどのように行えばよいか、また、どのような歩き方がエネルギー消費が少ないのか等、多岐にわたる。逆にロボットの制御から、人間の制御機構に対してヒントになるものが得られるかもしれない。

### 2.2.1 脳の働き

ネコを用いた実験により、基本的な歩行運動の生成には大脳は関与しておらず、運動の開始や速度の調整などは中脳レベルで、実際の運動生成はさらに下位のレベルで行われていることがわかっている。また、歩行のリズムを生成する神経回路網は脊髄にあることもわかっている[3]。

ゆえに、生理学的見地からみた二足歩行の研究は、大脳の問題よりも、中脳や小脳、もしくはさらなる下位のレベルに注目したものが最近は登場している。例えば、鶴岡等の研究では[4]、運動歴のある人とない人の歩行を比較している。これによると、運動歴のある人の方が、体重心の変動や歩行エネルギーの消費のむらが少なく、持久性のある動きをしている(図2.13)。

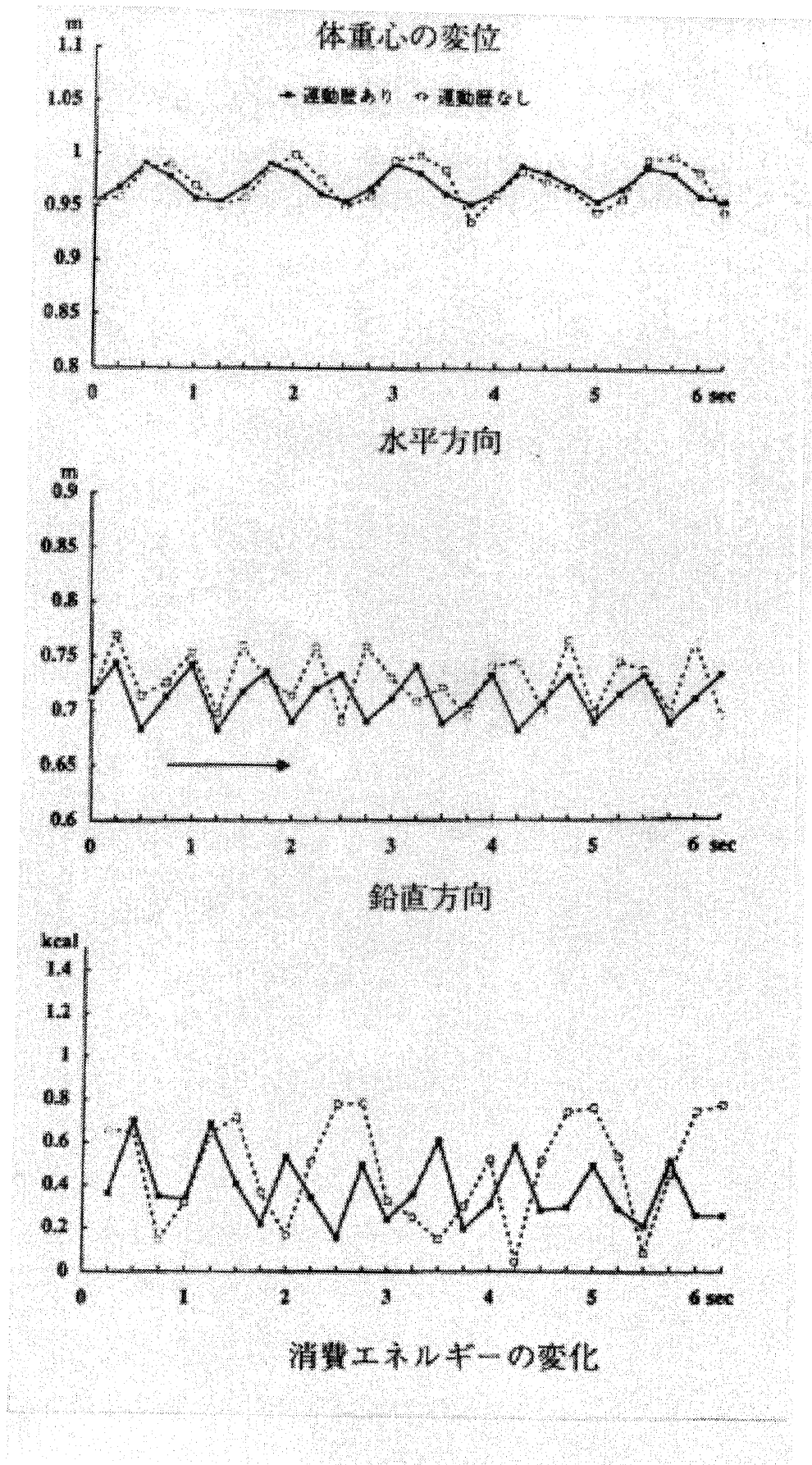


図 2.13: 運動歴のある人とない人の歩行の差

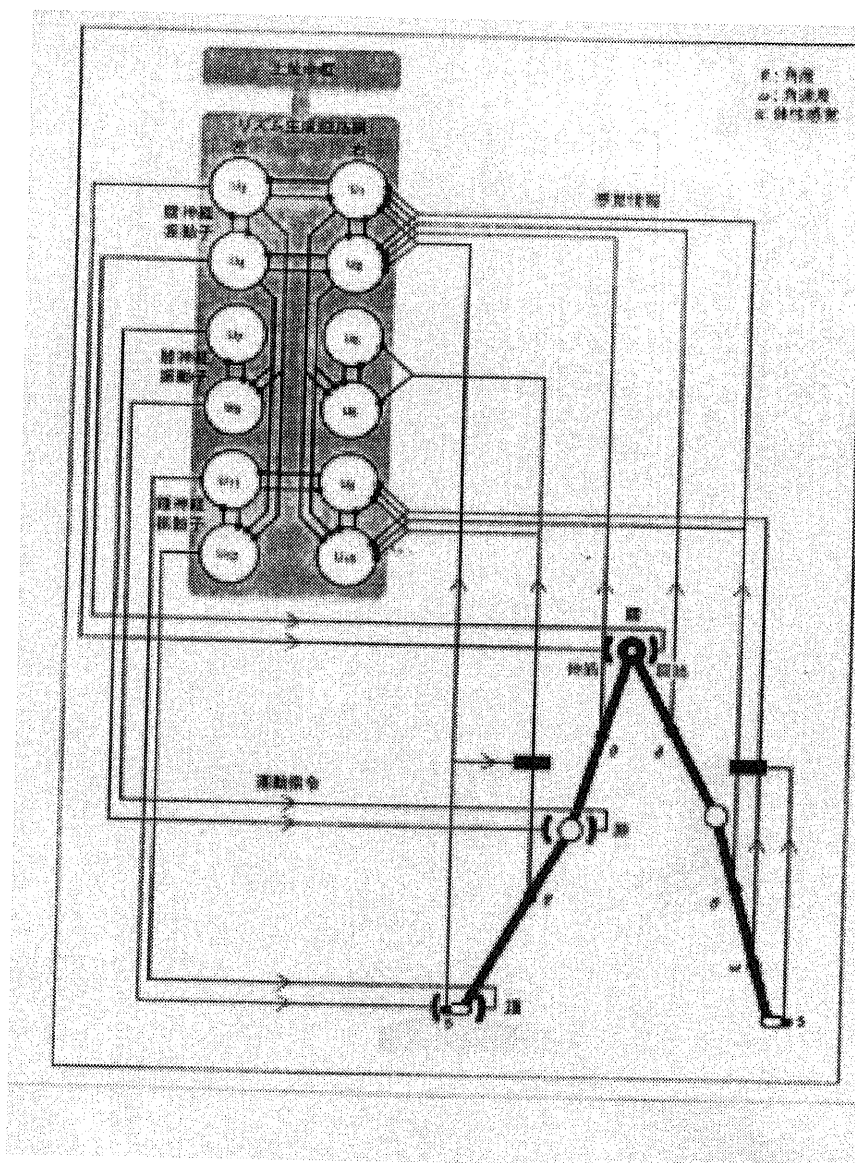


図 2.14: 神経振動子を利用した歩行の概略

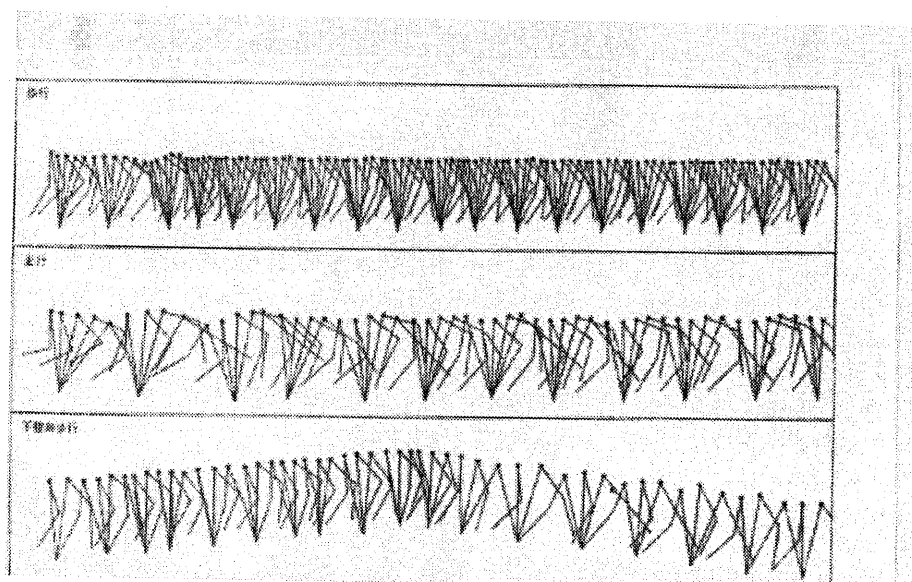


図 2.15: 神経振動子を利用したさまざまな歩行形態

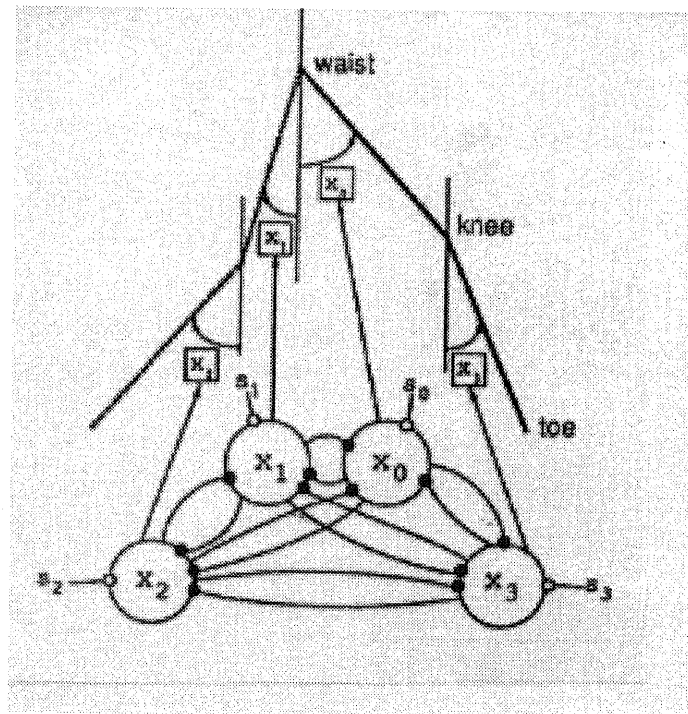


図 2.16: 神経振動子が4つのモデル

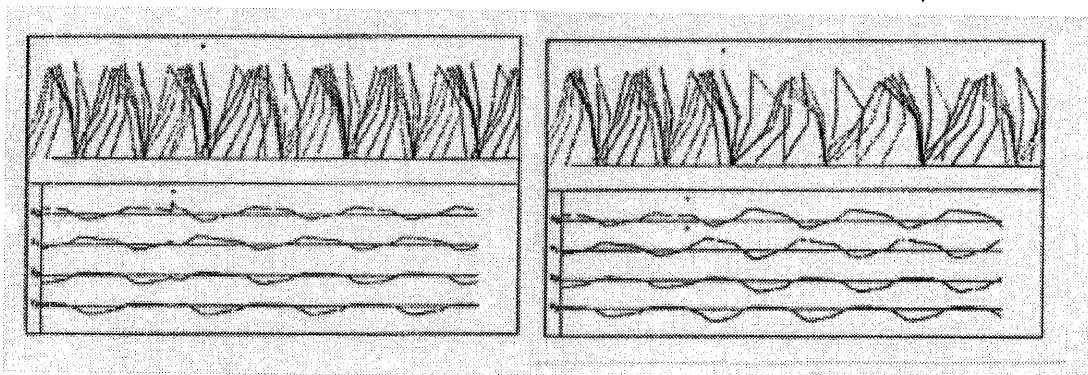


図 2.17: 神経振動子を用いた歩行における，スティック線図と神経振動子の応答

また，神経振動子を利用した研究というものが進められており [5]，これは各関節の角度そのものを神経振動子の出力で表現する（図2.14）。この神経振動子の上位レベルの制御は，歩行速度を指定する「興奮度パラメータ」を与えるだけなので，歩行速度はかなり自由に変更が可能である。さらに，この興奮度パラメータを大きくすると，図2.15にあるように走行のパターンが現れている。また，不整地の歩行も，登りと下りで歩幅を変えるなど，人間の歩行と比較してもかなり妥当なものとなっている。

神経振動子の数を4つにまで減らしたものでも [6],[21]，平面歩行のパターンを生成できることが発表されており，任意のタイミングで歩幅を変えたり，後ろから胴体を押すというような外乱からの復帰も行うことができる。この様子を，図2.16，図2.17に載せる。

以上のように、歩行環境が整地された平面である限り、歩行を制御する時にあまり高度な知能を用いているとは考えにくい。すなわち、反射的にパラメータを変化するようなものであって、大脳レベルで歩行計画そのものを立て直すようなことはしていないと考えられる。よって、実時間可変速歩行の制御において、プログラム切り替えのような手段を使わないものを目指すことは妥当だと考えられる。

なお、上に挙げてきた研究は必ずしもロボットに対する適用を前提としているものではない。このため、実際にロボットに適用する際には、より大きな出力を持ったアクチュエータを必要とする場合が多い。現状では、重量比との兼ね合いから、各関節には十分な出力のアクチュエータが用いられているわけではないので、将来筋肉型の軽量かつ高出力のアクチュエータが登場すれば、神経振動子を用いた方法をそのままロボットに適用できるようになるであろう。

### 2.2.2 人間とロボットの差異

二足歩行の制御に関する理論的研究は、ユーゴスラビアのVukobratovicらによって、1960年代後半から盛んに行われた[7],[8],[9]。これらの研究においては、自由度の高い、人間に近いモデルを用いて解析が行われ、ゼロモーメント点 (ZMP) の概念が打ち出された[7],[8],[9],[20],[23]。

二足歩行ロボットを実際に製作して歩行の制御を行う研究は、1970年ころに始まった。日本では特に多くの研究が行われ、ロボットも多数製作されている。これらのロボットを人間と比較すると、以下の点が異なっている。

1. 上体部の質量が人間に比べて小さい。脚部の質量を無視できない。
2. 上体部に左右のバランスをとる機構を、出力との兼ね合いからつけられないロボットが多い。
3. 足の裏の自由度が、0のロボットが多いが、人間は1、ないし2自由度を有している。

これらの点を改善し、人間の形に近づけようと研究が進められている。例えば、加藤、高西等のロボットは、上体部に大きな質量を持ち、かつ上半身で左右のバランスを十分に取れるものとなっている [20],[23]。また、古荘、佐野等のロボットは足の裏に自由度を擁し、意図的に爪先で蹴りを行うことができる [16],[17]。上に挙げた問題を解決することは、機構学的にはそれ程困難ではないが、アクチュエータ性能がネックになっている。大半のロボットはDCモータを減速して用いているが、重量と出力の比を考えると、さらに高出力なものが必要になる。現状では油圧サーボ系がその解決策であるが、その取り扱いが容易でないためにそれ程多く使われてはいない。

もっとも、歩行に際して必ずしも大トルクが必要とは言い切れない。McGeerらの研究によると [14]、アクチュエータを持たないリンク機構でも、足の振り出しを適



当に与えてやれば、坂道を歩行しながら降りていくというロボットが実現されている（これをPassive Dynamic Walkingと呼ぶ）。ゆえに、左右のバランスのとり方等の研究が進み、ノウハウが蓄積されていけば、小さなアクチュエータでも重力をうまく利用した歩行が行われるようになるであろう。

表 2.1: 二足歩行ロボットと制御方式

研究グループ	ロボット, 自由度	制御方式, アクチュエータ, その他
加藤・高西 (早大)	1972 WL-5 (P:6, R:2, Y:2, 胴体:1) 1984 WL-10RD (P:6, R:4, Y:2) 1987 WL-12 (P:6, 胴体:3)	立脚切り替え相における 機械インピーダンス制御, 電気・油圧サーボ 上体補償型動歩行
三浦・下山 (東大)	1980 Biper-3 (P:1, R:2) 1981 Biper-4 (P:5, R:2)	3次元竹馬形歩行
伊藤・成清・武市 (名大)	1984 歩 (P:6)	両足支持期の制御に関する実験 高ゲインフィードバックによる動歩行
船橋 (東工大)	1982 MEG-2 (脚:1, 胴体:1)	複雑なリンク機構と1台のモータに よる脚軌道の生成
美多 (千葉大)	1980 CW-1 (P:6) 1983 CW-2 (P:6) 1984 CW-3D (P:6, R:4, 胴体:1)	最適レギュレータを用いた歩行制御 蹴り動作のある歩行
加藤 (九工大) ・ 森 (東工大)	1979 BIPMAN (P:2, 脚長可変形)	ファン・デル・ポル方程式による 歩行パターンの発生
佐藤 (芝浦工大)	1985 ASSHY-15 (腕:12, 胴:2, 脚:12)	油圧アクチュエータ, 多自由度
有本・宮崎・ 川村 (阪大)	1982 イダテン-2 (P:6, 胴体:1)	低次モデルの提案, 階層制御 学習制御
増淵・古荘 (阪大)	1981 健脚 1 型 (P:4)	局所高ゲインフィードバック低次元化
古荘・佐野 (電通大)	1984 健脚 2 型 (P:6) 1987 BLR-G1 (P:6, R:2, 胴体:1) 1988 BLR-G2 (P:6,R:2)	蹴り動作のある歩行 足底厚, 速度, 足首トルク, 傾斜角 などのセンサ情報を用いた動歩行 歩行システムの角運動量の制御
橋本 (電通大)	1983 SMA-LEGS (P:6)	形状記憶合金を用いたアクチュエータ
北村・呉松 (神大)	1984 9 リンク (P:6, R:2)	軌道計画へのニューロ コンピューティングの応用
川路 (熊大)	1983 Strider-2 (P:6)	逆運動学を用いた目標軌道発生
梶田・谷 (機技研)	1987 5 リンク (P:4)	位置エネルギーを規範とした制御
M.H.Raibert(MIT)	1985 5 リンク (P:2, 脚長可変形)	跳躍歩行, 油圧アクチュエータ

## 2.3 従来の二足歩行ロボットとその制御

### 2.3.1 総括

表2.1に各研究グループの歩行ロボットおよび歩行制御へのアプローチの方法についてまとめる。また、代表的なロボットについては、その制御方式について、次小節で述べていく。表2.1に載せたものは、軌道を予め生成しておき、軌道を再生するかたちによって歩行が行われる。このため、速度変化や歩幅の変更などは前もって想定して軌道計画に埋めこまれたものしか実現できない。ゆえに、実時間での変速を考えるためには、従来の歩行とはまったく異なる立場の制御を行う必要がある。すなわち、「実時間軌道生成、実時間実現」である。本研究は「実時間軌道生成、実時間実現」を可能とする二足歩行を目標にするもので、従来のものとは異なる。

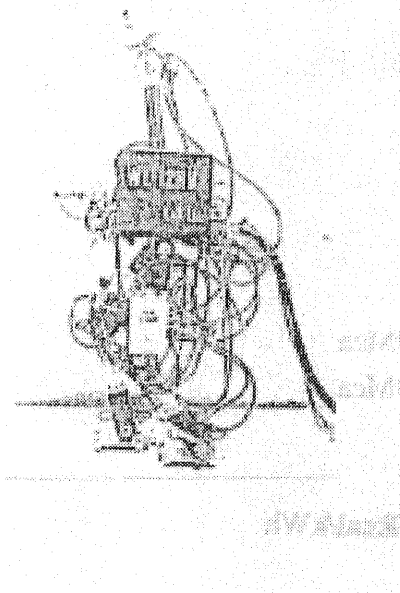


図 2.18: WL-12[23]

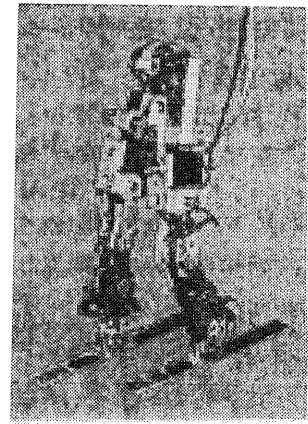
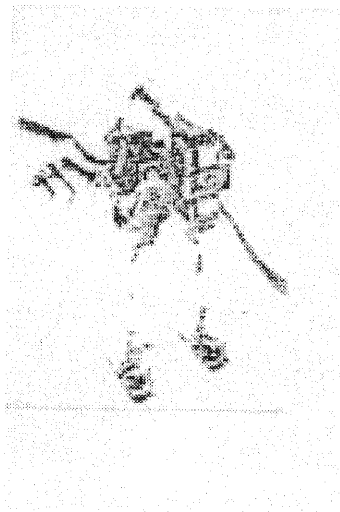


図 2.19: Biper-3 (左) と Biper-4 (右) [12]

### 2.3.2 代表的なロボット

**WL-10RD, WL-12**[20],[23] 早大のグループによるもので上半身に十分な質量がある。WL-12からは上半身をモーメント発生機として用いている。歩行制御は ZMP 規範をもとにする (図2.18)。

**Biper-3, Biper-4**[12] 東大の三浦, 下山等によるもので、足の裏を持たない竹馬型の歩行を行う。人間の歩行の特徴をよく捉えたものになっている (図2.19)。

**CW-1**[13] 千葉大の美多らによるもの。最適レギュレータを構成して目標姿勢に

追従するようにした歩行を行う（図2.20）。

**BLR-G2**[16],[17] 電通大の古荘，佐野らによるもの。各種のセンサ情報を用いて，足首周りの角運動量を制御することにより，動歩行を実現する（図2.21）。

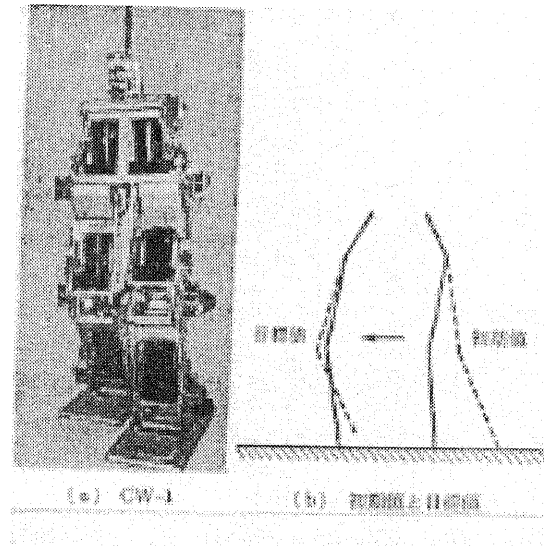


図 2.20: CW-1 とその制御[13]

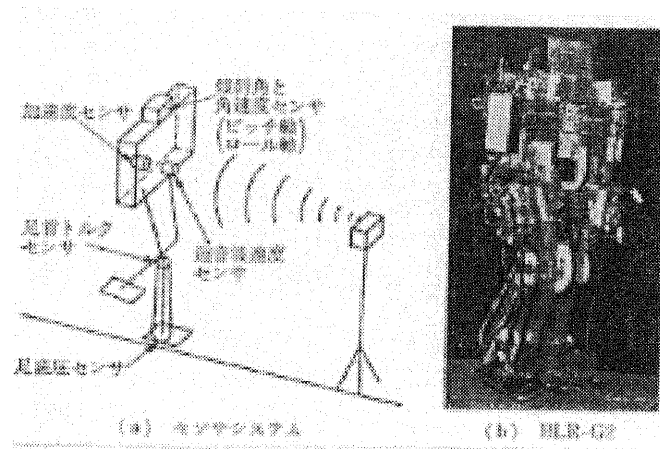


図 2.21: BLR-G2 とセンサ構成

## 2.4 歩行の解析

### 2.4.1 運動方程式

二足歩行を解析するにあたって，進行方向に対し垂直な平面を前額面 (Lateral Plane)，進行方向を含む平面を矢状面(Sagittal Plane)と呼ぶ。二足歩行機構を矢状面に限ると，図2.22のような多リンク機構を出発点として，絶対関節座標  $\theta$  に関して以下のような運動方程式が導かれる。

$$A(\theta) \ddot{\theta} + B(\theta) \dot{h}(\dot{\theta}) + C g(\theta) = D T \tag{2.1}$$

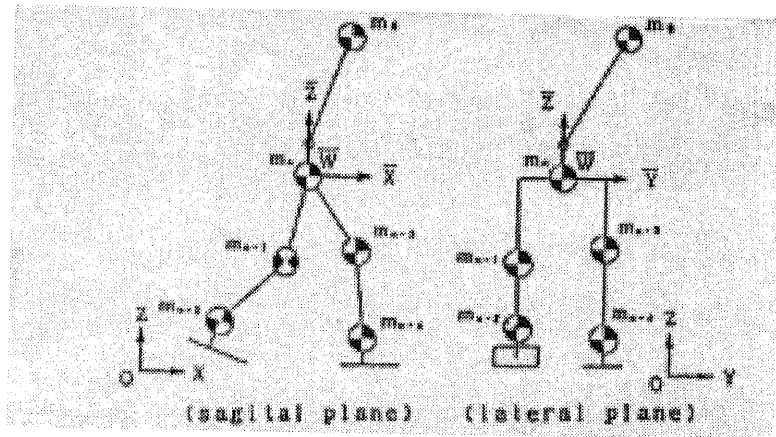


図 2.22: 二足歩行機械の解析面と質点構成

両脚支持期には各関節の拘束条件を  $q(\theta) = 0$  と与えるとする、拘束力  $\Gamma$  を導入して次のようになる。

$$A(\theta) \ddot{\theta} + B(\theta) \dot{h}(\dot{\theta}) + C g(\theta) = \left( \frac{\partial q}{\partial \theta} \right)^T \Gamma + D T \tag{2.2}$$

ここで  $A, B, C, D$  は  $n \times n$  行列であり ( $n$  は矢状面・前額面の自由度の合計),  $\theta, h(\dot{\theta}), g(\theta), T$  は  $n$  次ベクトルである。(ただし, 損失項を無視している。) 左辺第一項が慣性項であり, 第二項は遠心力項, 第三項が重力項である。この式の詳細は付録に載せる。式(2.1)および式(2.2)は一般のマニピュレータの運動方程式と同じであるが, 二足歩行の場合固定されたリンクを持たないため, このままでは見通しが非常によくはない。特にある時点でのリンク角度  $\theta$  が与えられたとしても, それが安定な歩行中のある一姿勢なのか, それとも転んでいる最中の一姿勢なのかわからない。ゆえに従来から歩行安定性の判別や歩行持続性といったものの見通しの良い解析法が提案されてきている。ここでは安定性判別の代表例として通用しているZMP規範[7],[8],[9],[20],[23]と, 歩行持続性や停止可能性の指標として一般に受け入れられている角運動量規範[16],[17]について取り挙げる。

#### 2.4.2 ZMP規範 [7],[8],[9],[20],[23]

ZMP(Zero Moment Point) とは, 床反力によるモーメントが0になる床面上の点の

ことである。物理的にいえばその点周りの回転モーメントがロボットとの干渉により丁度打ち消される点である。ゆえにこの点がロボットの足の裏で構成される支持多角形の内側（足の裏の内部）にあればロボットは安定に歩行する。これがZMP規範の考え方である。図2.22のような質点系の絶対座標におけるZMPは次のように表される。

$$X_{zmp} = \frac{\left\{ \sum_{i=0}^n m_i \left[ (\ddot{z}_i + g_z) x_i - (\ddot{x}_i + g_x) z_i \right] + \sum_j M_{y_j} + \sum_k (S_{zk} F_{xk} - S_{xk} F_{zk}) \right\}}{\left\{ \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z) - \sum_k F_{zk} \right\}} \quad (2.3)$$

$$Y_{zmp} = \frac{\left\{ \sum_{i=0}^n m_i \left[ (\ddot{z}_i + g_z) y_i - (\ddot{y}_i + g_y) z_i \right] + \sum_j M_{x_j} + \sum_k (S_{zk} F_{yk} - S_{yk} F_{zk}) \right\}}{\left\{ \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z) - \sum_k F_{zk} \right\}}$$

ここで、 $(g_x, g_y, g_z)$  は重力加速度、 $(M_{x_j}, M_{y_j}, M_{z_j})$  は  $j$  番目の外力モーメント、 $(F_{xk}, F_{yk}, F_{zk})$  は  $k$  番目の外力、 $(S_{xk}, S_{yk}, S_{zk})$  は  $k$  番目の外力を受ける座標である。

式(2.3)から明らかなように、ZMPを求めるためには各質点系の加速度情報まで必要であり、これは上記の非線形微分方程式を（十分な精度が得られるように）解く必要がある。すなわち、厳密性を追求しているために、安定性には格段の信頼がおけるが、モデルの低次元化などにはまったく対処できない。すなわち、運動方程式を逐一解く必要があり、計算コストが非常に大きい。その代わりに前額面における安定性もまったく同様に議論できる。ところが、ZMP規範そのものは歩行運動の発生については何ら指針とはならないので、この考え方に基づいたロボットの制御法は以下のような構成を採ることになる。

1. 歩行運動に適したと思われる足軌道をあらかじめ作成する。
2. 作成された軌道から ZMP を算出し、支持多角形内に納まるか調べる。
3. 納まらなければ軌道を修正し 2 に戻る。
4. 求められた軌道を指令としたプログラム位置制御を行う。

この手順を見ても明らかなように、制御の基本はオフラインの軌道生成にある。このためリアルタイム処理は望むべくもないのが実情である。ゆえに歩行途中に歩幅を変えたり急停止したりするためには前もって歩行パターンを生成しておき、プログラムを切り替えることで対処せざるをえない。そのかわり、上半身に十分な自

由度を持ったモーメント発生機を取り付ければ、イメージした下半身軌道がZMP規範を満たしていなくても、上部部で補償することにより歩行が実現可能である。ゆえに（モーメント発生機となる上部部があれば）低速から高速まで、滑らかなからギクシャクまで任意の歩行を安定化することが可能である。

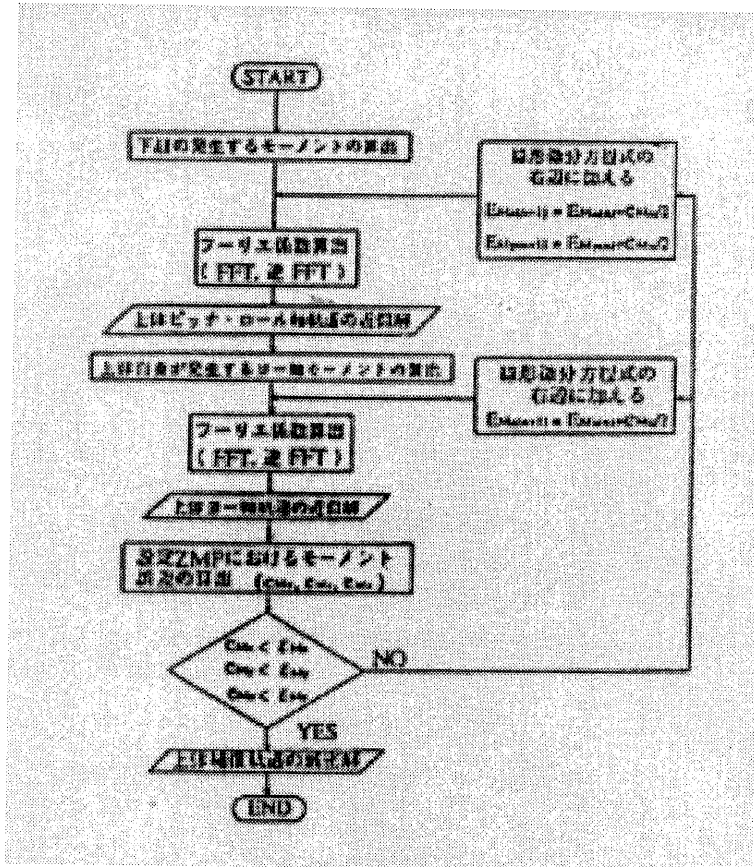


図 2.23: ZMP規範に基づいた歩行における上部補償フローチャート[20]

図2.23に上部部の軌道を求めるフローチャートをのせる。まず最初に下肢の発生するモーメントの算出をするために、運動方程式を解き、さらに上部部の軌道を繰り返し計算で求めていることがわかる。このため非常に計算コストの大きく、歩行は機動パターン再生型となるが、非常に滑らかな動きを実現している。

ただし、現実には人間がWL-12のように上半身で大きなモーメントを発生させているかといえは必ずしもそうとはいえない。段ボール箱を抱えて歩く際には腕を振ることもままならないのだから、足だけでも十分歩く能力があるはずである。ここでロボットは必ずしも人間のまねをする必要はないとの意見もあるだろうが、現実には移動ロボットを利用する際は、上半身は荷台や電源、制御部をおくスペースであって、振り回せるとは限らない。ただ、将来的に腕を取り付けてモーメントの補償をすることの第一段階として、非常に興味深い研究である。

ZMP規範は歩行生成については特に指針も与えてくれるものではないが、歩行の安定性に関しての必要条件を明らかにしたという点で、歩行ロボットの解析に多大

大な貢献をしている。

### 2.4.3 角運動量規範 [16],[17]

前出のZMPは歩行安定性の厳密なる指標となることがわかるが、では歩行速度や歩幅、あるいはリアルタイムでの歩行停止などの可能性についての見通しの良い指標となるものはないのであろうか。この問題に対する解答が、支持脚足首回りの角運動量である。

考え方の出発点は、運動方程式の低次元化である。鉛直付近での線型化モデルを用いる方法[18]、特異摂動法によって分解された系の主モードを利用する方法[11]、ローカルフィードバックによって得られる低次元化モデルを利用する方法等[16],[17]、経緯は異なるように見受けられるが、出てくる答えはほとんど変わらない。すなわち、二足歩行の究極の近似は「倒立振り子」である。図2.24を見れば明らかかなように、単脚支持期においてロボットを足首で二つに分けると、その一方は足先の質量を無視して、重心のある足本体が足首でピンジョイントされた(変形する)剛体である。ニュートンの角運動量保存則から明らかかなように、この大きな剛体の角運動量は内力モーメントには影響を受けない。すなわち、影響を及ぼすことができるのは足首トルクと重力のみである。ゆえに足首回りの角運動量を $L$ として式(2.4)を得る。

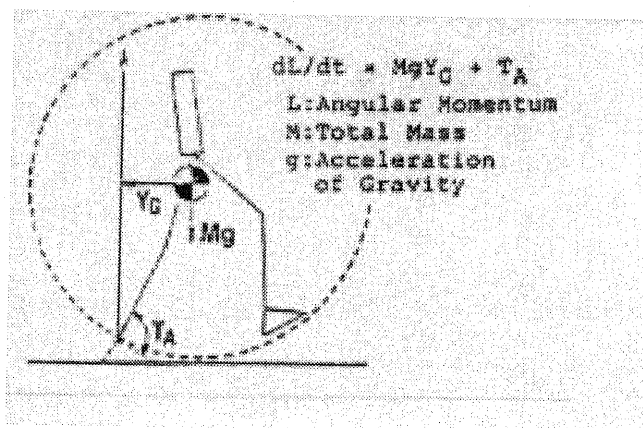


図 2.24: 倒立振り子近似と足首周りの角運動量[16]

$$\frac{dL}{dt} = M g Y_G + T_A \quad (2.4)$$

ここで足が十分に軽く、上半身が非常に重い人間型の質量比を仮定すると、大きな剛体は上半身(重心)に質量が集中したおもりにみえる。すなわち「倒立振り子」になっている。ゆえに鉛直付近で線形化すれば、角運動量が求まる。ここで足首トルクを0とした、重力に逆らわない自然な歩行を考えると、図2.25のような懸垂曲線

の形をした角運動量の時間変化が得られる。ゆえに最少角運動量が0より大きければ歩行は持続し、かつ同一の角運動量になった時点で支持脚を切り替えれば、次の一歩も同じ様な角運動量変化が期待できる。参考までに上部部の速度が一緒に載せてあるが、角運動量と胴体速度がほぼ同様の変化をすることが見てとれる。ただし、足首トルクを使っていないため、図2.25のように角運動量よりも複雑な時間変化を示している。これはモデル化の誤差等が微妙に現れてきていることを示している。例えば遊脚の姿勢変化での重心位置のモデルとずれや、摩擦によるエネルギーの損失があげられる。ゆえに重心の位置（速度）はマクロな指標として有効であるが、摩擦や重心の移動等の未知外乱を受けにくい制御量としては、足首回りの角運動量の方が見通しが立てやすい。

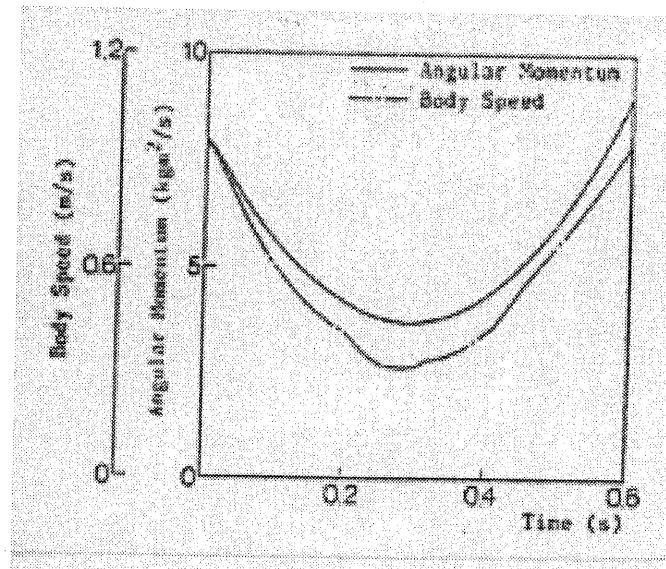


図 2.25: 足首周りの角運動量と胴体速度[17]

なお、足首回りの角運動量を規範とすれば、歩幅や歩行周期は以下のように決められる。定常歩行を続けるためには、周期の最初と最後で角運動量が等しければよい。このとき、足首トルクを与えなければ振子のモデルにより角運動量は定数項を除いて一意に決まり、かつ懸垂曲線の形をしているので、同一角運動量を持つ時点は一意に定まる。ゆえにこれが歩行周期を与える。また、歩幅は鉛直とのなす角度が同一になるように足首を着地するだけのことであり、これも一意に定まってしまふ。また、周期のリアルタイム変更は、支持脚切り替えタイミングの調節により実現できる。さらに、足首のトルクを使えば最低角運動量を操作することも可能で、歩行速度の変化も可能である。

以上から足首回りの角運動量は歩行のマクロな判断には最適な制御量であることがわかる。特に、リアルタイムでの歩行パターンの変更には絶大な効果を発揮するものと期待できる。反面、歩行自体の安定性に関しては厳密な指標にはなっていない。すなわち「倒立振子と同じ様な角運動量変化を持つような関節軌跡ならば、歩くだろう」と。また、前額面での歩行安定性については矢状面での安定性と分けて



考えなければならない。ところが矢状面での運動は前額面での運動に大きく干渉する。(遊脚を持ち上げることは体を左右に揺らせることになる。) すなわち歩行運動を3次元に拡張した際に前額面の解析は非常に複雑になる。

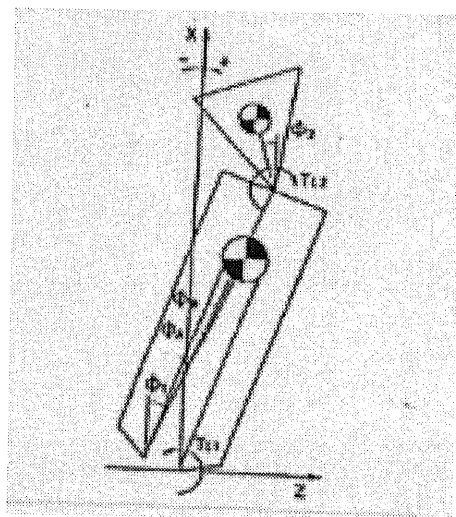


図 2.26: 前額面における二重倒立振子近似

通常は、図2.26に示すように、前額面の運動の解析を二重倒立振子モデルを用いて行う場合が多い。これは、もちろん上半身に左右のバランスをとる機構をつけたロボットの場合であり、上半身を持たない場合は一重倒立振子がモデルとなる。上半身を持たないロボットの場合は、遊脚を用いた蹴り動作によって、この倒立振子を間接的に制御する。ところが蹴りによるモーメントの投入量などは、解析的にはあまり正確に求められないために、このようなロボットでは実験を繰り返しながら、蹴りの度合を試行錯誤で求めていく。上半身に左右のバランスを持つロボットは、意図的に蹴りを行わなくともバランスが取れるので、自由な歩行周期や歩幅を実現できるが、出力対重量比の面であまり重い上半身をつけられないために、実際には上半身を付加するのは簡単ではない。

なお、最初から前額面の制御はあきらめて、コの字形の足の裏にしたロボットも多い[18]。このような足の構成では、前額面の重心を支えることができるが、足同士がぶつからないようにするためには、歩幅の選定には制約を生じる。

## 第3章

### 仮想倒立振子法の提案

#### 3.1 実時間システムの重要性

歩行移動の最大のメリットは状況に応じて移動形態を動的に変化させられる点にある。しかしながら、このメリットを生かすためには歩行制御手法そのものを状況に応じて動的に対処できるものにしなければならない。

##### 3.1.1 従来手法との差異

歩容（歩き方）を決定するパラメータは多数存在するが、平坦面での動歩行を想定すると代表的なパラメータは数個程度に絞り込むことが可能である。例えば

歩幅・歩行速度・歩行周期

などである。

軌道パターンをあらかじめ作っておくような手法においては、上記パラメータは固定値であったり、また前もって歩行中に取りうる値を決めてあったりするものが大半である。歩行中に歩行運動の連続性を考慮してある程度自由にパラメータを変化させられるわけではない。

そこで本論文では上記パラメータのうち歩行速度について、外部からの指令例えば操縦者からの信号によって歩行速度そのものを実時間で変化させる手法について提案する。このためには指示に応じて関節軌道を実時間で生成するシステムが必要となる。すなわち、従来オフラインで行っていた適切な軌道パターン作成をオンラインで行う、というブレークスルーが必要となる。

##### 3.1.2 実時間軌道生成の方針

実時間で歩容を変更するためには、現在の歩行状態を実時間で把握し、実時間で制御方策を立てなければならない。ここで重要となるのはいかにして実時間で歩行に適した運動パターンを生成していくか？ということである。これに対するアプローチとしては、第2章でとりあげた以下のような方法がヒントとなると思われる。

- ・非線形方程式や神経振動子，ニューラルコンピューティングなどを利用し，純粹に数学的な問題として軌道パターン生成を捉える方法 ([3], [5], [6])
- ・角運動量規範のような物理モデルの振る舞いによる必然として軌道パターン生成を捉える方法 ([16], [17], [18])

前者は第2章で触れたように数値列のパターンとして歩行を捉えるものであり，斜面に対応した軌道パターンや駆け足なども発生させられる。しかしながら物理的根拠を持たないため，実際の歩行機械での歩行安定性の議論は困難であり，またその実機での実現可能性にも疑問が残る。また，各々のパラメータが具体的な物理量と対応していないため歩行状態を捉えることが困難であり，歩行状態を動的に変化させるための方針が立てにくい。

後者は運動量やエネルギーなどの観点に立って軌道パターンを導出しようというものであり，物理的根拠との整合性も良いが，実際の歩行機械の運動方程式は複雑な非線形方程式であり，歩行状態の見通しをたてるのが困難である。しかしながら，低次元化モデルを用いることで改善は可能と思われる。本論文では後者の視点に立って，歩行速度を実時間で変更する二足歩行を実現する。

第2章でとりあげたように，歩行速度というパラメータは歩行持続性という観点から捉えることが直感的に理解しやすいと考えられる。支持脚足首周りの角運動量は歩行持続性の直接の指標であると同時に，支持点周りの胴体運動の様子を示す状態量ともいえる。

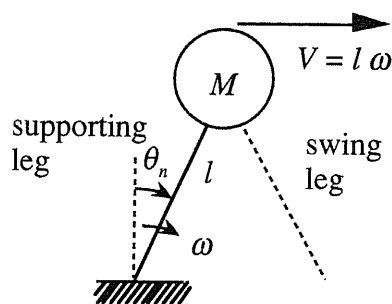


図3.1: ロボットの構造と物理量の対応

脚質量が胴体質量に比較して十分に小さく，また支持脚の曲げ伸ばし幅があまり大きくない場合を想定すると，

$$L = M_n l^2 \omega \quad (3.1)$$

が成立する。ここで $L$ ,  $M_n$ ,  $l$ ,  $\omega$  はそれぞれ、足首周りの角運動量、胴体質量、支持脚長、胴体の支持脚周りの角速度、を表している（図3.1）。

鉛直直立時の胴体進行速度を歩行速度 $V$ と定義すれば、

$$V = l \omega \quad (3.2)$$

となる。よって、支持脚足首周りの角速度に着目することで、「歩行持続性＝角運動量」と「歩行速度」という具体的な物理量を観測できることになる。

## 3.2 制御の階層化・役割分担

歩行制御の難しさとして以下のようなことが挙げられる。

- ・放っておけば転倒するような、もともと不安定な対象であること
- ・局所的な安定性の概念、例えば関節軌道が安定であろうともそれが歩行そのものの安定性には必ずしもつながらないこと
- ・視覚情報の取得は歩行安定性の獲得に重要な寄与をはたすと思われるが、この分野の研究はまだ発展途上であること

歩行機械の制御は様々な技術の統合によって成り立っていることに注目すべきであろう。これを見通し良く整理し、問題を解決するためには制御の階層化、役割分担の明確化が必要と考えられる。

### 3.2.1 歩行の階層制御

実時間性の観点から図3.2に示すような歩行の階層制御が必要であると考えられる。図3.2において、上位レベルはナビゲーションを司り、歩行状態を指示するパラメータを中位レベルに送る。中位レベルは歩行現象の制御を司る。すなわち、歩行持続性や安定性、歩行速度や歩幅などのグローバル状態変数を制御する。下位レベルは実際の関節動作の制御を司る。ここで注目すべきは中位レベル制御である。従来行われてきたような軌道パターンをあらかじめ作っておくような手法においては、上記パラメータは固定であったり、また前もって歩行中に取りうる値を決めてあったりするものが大半である。歩行中に歩行運動の連続性などを考慮してある程度自由にパラメータを変化させられるわけではない。

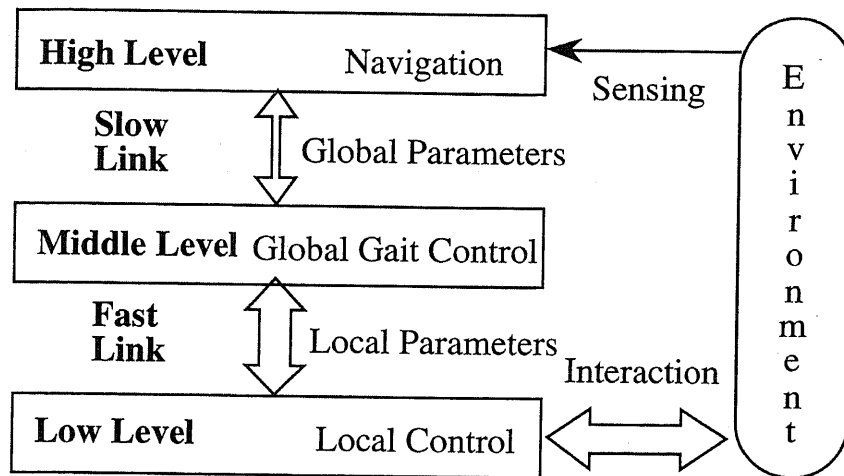


図3.2: 歩行の階層制御

### 3.2.2 制御指針

本論文では上記パラメータのうち歩行速度について、外部からの指令、例えば操縦者からの信号によって歩行速度そのものを実時間で変化させる手法について提案する。なお、環境は平坦面と仮定し、対象は二足直線歩行である。以下にその制御指針についてまとめる。

- ・上位レベル制御については、操縦者がこれを行うこととし、実際の装置においてはリモコンスイッチ（ポテンショメータからの歩行速度指令）によって歩行速度指令を与えるものとした。
- ・中位レベル制御については「仮想倒立振子法」を用いる。これは仮想モデル追従法と呼べるもので、定常歩行の際はノミナルな倒立振子への拘束、加減速のような過渡状態においては非ノミナルな倒立振子への拘束を行うことにより、定常歩行、加減速を統一的に制御する手法となっている。
- ・下位レベル制御は以下のように構成する。
  - ・各関節の指令値は中位レベルから送られてくる参照状態量から機械的に計算されるものを利用する。
  - ・関節の軌道制御は外乱オブザーバを利用した（[24], [25], [26], [27]）強靱な位置制御によって行う。

ここでは下位レベル制御に関しては上記のような簡単な方法としており、衝撃制御などの安定化はとくに考慮していない。これは歩幅、歩行速度の変化に対して汎用的な安定化が非常に困難と思われるため、ベースケースとしてとくに考慮しないものを採用している。しかし、プロセッサの高速化により歩行パラメータ変動に対してロバストな安定化手法も実装可能になっていくと考えられ、下位レベル制御の構成についてはなお検討の余地がある。

### 3.3 中位レベル制御

本節では、中位レベル制御方針として矢状面運動のみを考慮した場合の仮想倒立振子法についての説明を行う。これは、いきなり3次元歩行を目指すのではなく、段階的に実時間3次元歩行制御を実現しようと考えたからである。

#### 3.3.1 歩行パラメータの設定

中位レベルは歩行状態のグローバルな制御を司る。ここでは、歩行現象を以下のようにとらえるものとする。

- ・ 胴体の移動速度が、指示速度にほぼ追従する
- ・ 胴体が支持点から一定角度前方に倒れこんだら支持脚を切り替える
- ・ 支持脚交換時に胴体は支持点から一定角度後方に倒れこんでいる
- ・ 支持脚切り替えは瞬時に行われる

これを、胴体と支持点となす倒れこみ角度  $\theta_s$ 、歩行速度パラメータ  $w$ 、歩幅パラメータ  $\theta_{\max p}$ 、 $\theta_{\max n}$ 、ロボットの脚長  $L$  等を用いて説明すると、以下ようになる。

$$\cdot w \doteq \dot{\theta}_s L \quad (3.3)$$

$$\cdot -\theta_{\max p} \leq \theta_s \leq \theta_{\max n} \quad (3.4)$$

- ・ 支持脚切り替え時に  $\theta_s = \theta_{\max n}$  から  $\theta_s = -\theta_{\max p}$  への置き換えが行われる

中位レベルは上位レベルから  $w$  を受け取り、 $\theta_s$ 、 $\theta_{\max p}$ 、 $\theta_{\max n}$  を下位レベルに送る。なお、簡単のため本論文では歩行周期がほぼ一定となるように歩幅パラメータは歩行速度に比例する形（比例係数  $\gamma$ ）で与える（式(3.5)）。

$$\theta_{\max n} = \gamma w, \quad \theta_{\max p} = \theta_{\max n} \quad (3.5)$$

なお、急激な加減速は安定性やアクチュエータ性能から実現不可能なことも考えられるので、上位レベルから受け取った  $w$  に適当な制限とフィルタリングを行うのも中位レベルの仕事である。例えば、急激な加速も数歩に分割すれば実現できる可能性があるため、速度指令に対する加速度リミタのようなものを用意すればよい。

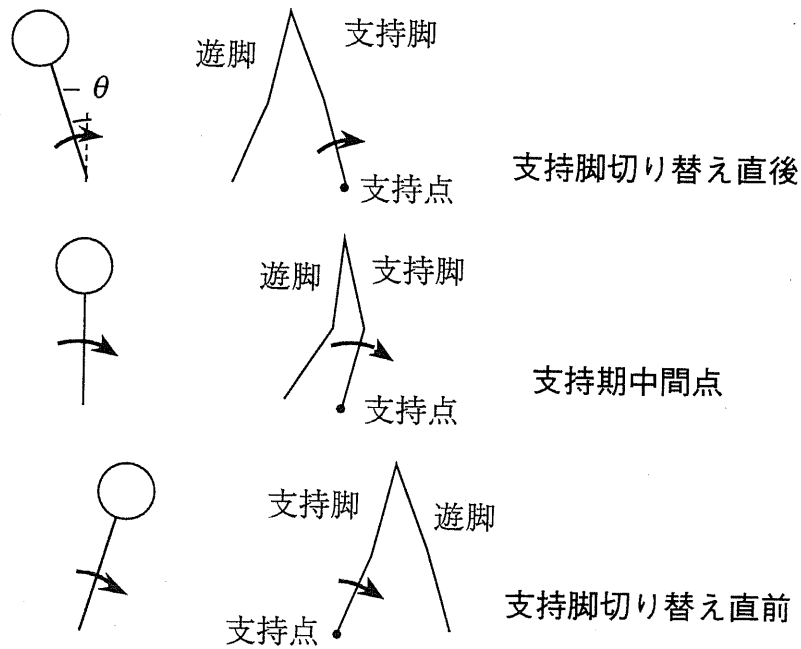


図3.3: 倒立振子の動きと対応するスティック線図

### 3.3.2 仮想倒立振子法

$\theta_s$ を、胴体部に質量を集中させた倒立振子モデルの運動で与えようというのが、仮想倒立振子法である。仮想と呼ぶ理由は以下の二つによる。

- ・歩行機械とは独立に計算機内で仮想的に動かされるモデルであるため
- ・歩行状態に応じて、振子モデルのパラメータを適宜変更するが、その際実機の近似としてふさわしくない値も採用するため

理想的な倒立振子の運動方程式を鉛直近傍で線形近似したものは以下のようになる。

$$M l^2 \ddot{\theta} = M g l \theta \tag{3.6}$$

これを解いて、式(3.7)を得る。

$$\theta_s = \frac{\omega_0}{\alpha} \sinh(\alpha t) \quad \text{where } \alpha = \sqrt{\frac{g}{l}} \tag{3.7}$$

ここで、 $l$ は振子の長さであり、 $g$ は重力加速度、 $\omega_0$ は振子の鉛直時の角速度である。便宜上矢状面において、質点が支持点の真上にくる時刻を $t=0$ とする。図3.3は倒立振子の運動と、それに対応したロボットの歩行運動のスティック線図である。

振子の倒れ込み角速度は式(3.8)で与えられる。sinh, cosh関数の性質を利用すると、式(3.7,8)より位相軌跡が双曲線を描くことがわかる (式(3.9))。

$$\omega = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_0 \cosh(\alpha t) \quad (3.8)$$

$$\omega^2 - (\alpha \theta_s)^2 = \omega_0^2 \quad (3.9)$$

図3.4は式(3.7)で記述される倒立振子の位相軌跡である。横軸は倒れこみ角度、縦軸は角速度である。振子の足の長さを固定してしまえば、パラメータ  $\omega_0$  によって位相軌跡は一意に定められる。そして、それぞれが交わることはない。

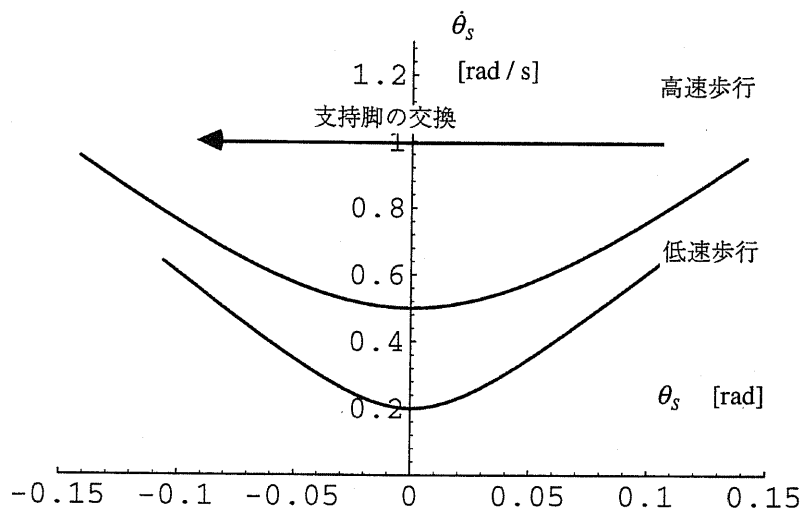


図3.4: 倒立振子の位相軌跡

(下は  $\omega_0 = 0.2 \text{ rad/s}$ , 上は  $\omega_0 = 0.5 \text{ rad/s}$ ,  $l = 0.3 \text{ m}$ )

軌跡は左端を始点とし、振子が起き上がるにつれ角速度を失いながら直立し、以後また重力により角速度を増加させながら倒れていく。軌跡の右端で支持脚の交換をし、次の単脚支持期に移行する。理想的な倒立振子の場合、足首周りの角運動量は角速度に比例するので、この軌跡の縦軸は歩行持続性の直接的な指標となっている。支持脚交換時の角運動量損失を考慮しなければ、右端の角速度が次の単脚支持期に継続される。

胴体運動を振子モードに従わせようという観点は、文献 [18]と同様であるが、本論文ではこれを拡張し、振子の足の長さを状況に応じて変化させようという点に特徴がある。具体的には、加減速指令に応じてモデルとなる振子の足の長さをノミナル値と異なる値に設定し、加減速を実現する。



## 3.3.3 加減速制御

ここでは加速を「下側の軌跡（低速歩行）から上側の軌跡（高速歩行）へ移行する」こと、と定義する。これには足首トルクを利用する方法、しない方法の2通りが考えられる。エネルギー消費の点では後者のほうが有利と思われるが、振子を鉛直から大きく前に傾けることは、着地時の衝撃などを考慮するとあまり好ましくない。また、通常は姿勢制御用に足首にもアクチュエータを付加することが多いので、本論文では前者を用いることにする。

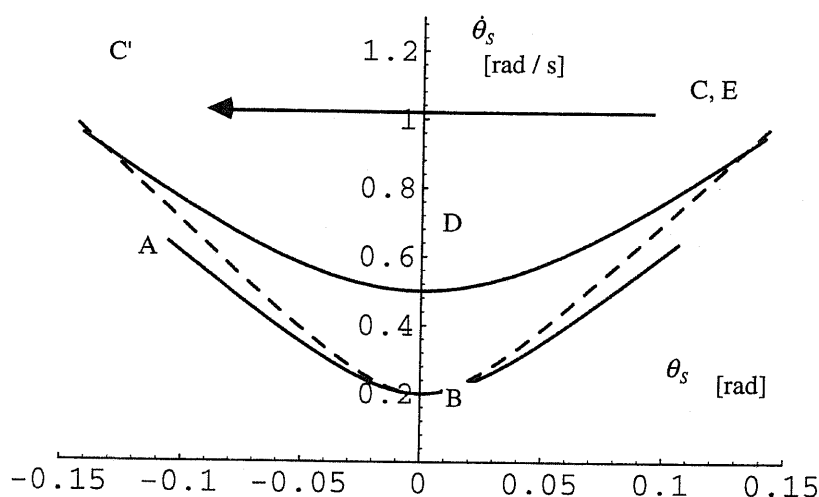


図3.5: 加速の手順

(A→B→C, 支持脚切り替えでC'に飛び, C'→D→E.)

振子に対する入力として、重力以外に足首トルクの使用を認めれば、図3.5の点線のような軌跡を得ることができる。B→Cの場合は、前向きのトルクを入力すればよい。この後、上の軌跡にぶつかった時点で支持脚の交換をすることにより、次の一步は上の軌跡を通ることができる。しかし、どの程度のトルクを入力すればよいかは逆問題となり、容易には解けない。そこで、仮想倒立振子法では、モデルとなる振子の足の長さを変化させ、そのノミナルでない振る舞いにロボットを追従させることにより、加減速する方法を提供する。すなわち、図3.5の点線は、振子が通常より短足の場合の軌跡と同じである。トルクを明示的に入力するのではなく、短足のモデルを規範とした位置指令に追従させてやれば、点線の軌跡は得られるのである。よって、

- ・ A→B: ノミナルな振子モデルへの追従
- ・ B→C: 短足なモデルへの追従

・ C'→D→E: ノミナルな振子モデルへの追従

のみで加速が実現できる。B点をモード切り替え点とすることにより、歩行持続性の指標である足首まわりの角運動量の連続性（1階微分についても）を考慮した加速法になっている。

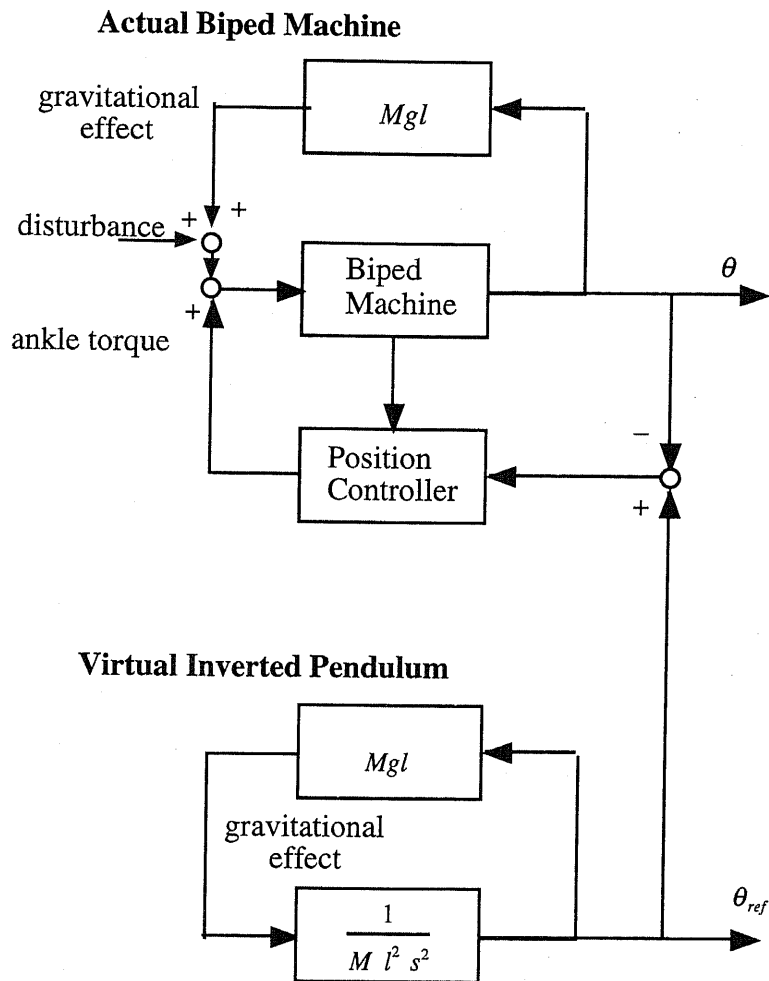


図3.6: 拘束制御のブロック図

### 3.3.4 仮想倒立振子モデルへの拘束

胴体運動をモデルに追従させるために、図3.6で示す拘束制御を行う。下半分がモデルであり、上半分が実際の歩行機械である。荷重変動や外乱入力が存在しない理想的な状況では、規範モデルと実際の歩行機械の倒れこみは一致し、足首トルクは発生しない。このためロボットの運動は重力をうまく使ったなめらかなものとなる。実際には荷重変動や遊脚運動の影響で外乱が発生するが、それは出力の誤差として検出され、ロバストな位置制御によって足首トルクの入力という形で補正される。

加速フェイズにおいては、規範モデルの方を短足に設定することにより、モデルとロボットの倒れこみに誤差が生じる。モデルの方が早く倒れようとするので、それに追従するために位置制御が働いた結果、足首トルクが入力されモデルに追従して早く倒れようとする。すなわち、加速させるのに望ましいトルクを自動発生させるシステムになっている。

なお、モデルの足の長さは以下のように決定する。加速時の位相軌跡と、高速歩行時の位相軌跡から式(3.10)が導かれる。ここで、 $\theta_{high}$  は、加速時および高速歩行時の歩幅を決めるパラメータで、着地時に $\theta_s = \theta_{high}$ である。 $\theta_{low}$  は、低速時のものである。 $\omega_{low}$  と  $\omega_{high}$  は歩行速度を決めるパラメータで、それぞれ低速歩行と高速歩行時のものとする。 $t_{acc}$  および  $t_{high}$  は、加速時および高速歩行時の着地時刻である。 $\alpha_{Sacc}$  は、加速時用いるパラメータであり、定常歩行時にはノミナル値  $\alpha_n$  を用いる。

$$\theta_{high} = \frac{\omega_{low}}{\alpha_{Sacc}} \sinh(\alpha_{Sacc} t_{acc}) = \frac{\omega_{high}}{\alpha_n} \sinh(\alpha_n t_{high}) \quad (3.10)$$

詳細は省略するが、双曲線関数の性質などを利用することによって、最終的に加速時に用いる  $\alpha$  の値（モデルとなる振子の足の長さによって決定される）を求めることができる。

$$\alpha_{Sacc}^2 = \alpha_n^2 + \frac{\omega_{high}^2 - \omega_{low}^2}{\theta_{high}^2} \quad (3.11)$$

式(3.11)などで明らかのように、 $\alpha$  の値は加減速の度合いが大きければ大きいほどノミナル値からずれることになる。これは、「もっと加速したければもっと短足のふりをしろ」ということであり、非常に直感的である。

## 3.4 下位レベル制御

### 3.4.1 軌道設計

仮想倒立振子法は胴体位置をあるモード（具体的には理想的な倒立振子モード）に追従させようという指針を与えているだけであり、この条件を満たすならば各関節軌道パターンの選び方に自由度が残されている。この自由度を使って着地時の衝撃力低減化や歩行安定性の向上などが見込める。

しかしながらこの自由度の有効な活用は困難である。なぜならば、歩幅や歩行周期、歩行速度といったパラメータが実時間で変更できることを想定しているため、衝撃力低減化や安定性向上が、様々な歩行パラメータ下で汎用的に保証されない限り逆効果となる可能性が出てくるためである。

ゆえに現状としては関節軌道パターンは以下に示すような基準を元に、ベースケースとして常識的なものを選ぶことにする。

- ・胴体運動はなるべくモデルと合致させる
- ・ZMPが支持多角形をなるべくはみ出さない

各関節の軌道指令値は、中位レベルから送られてくる  $\theta_s$ ,  $\theta_{\max p}$ ,  $\theta_{\max n}$  をもとに作成される。本論文では式(3.12)を採用した。

$$\theta = \frac{-2\beta}{\theta_{\max n} + \theta_{\max p}} (\theta_n + \theta_{\max p})(\theta_n - \theta_{\max n})$$

$$\theta' = 2\theta$$

(3.12)

$$q_1 = \theta_n$$

$$q_2 = 0$$

$$q_3 = -\theta_n$$

$$q_4 = \theta_n + \theta$$

$$q_5 = \theta'$$

$$q_6 = \theta_n + \theta - \theta'$$

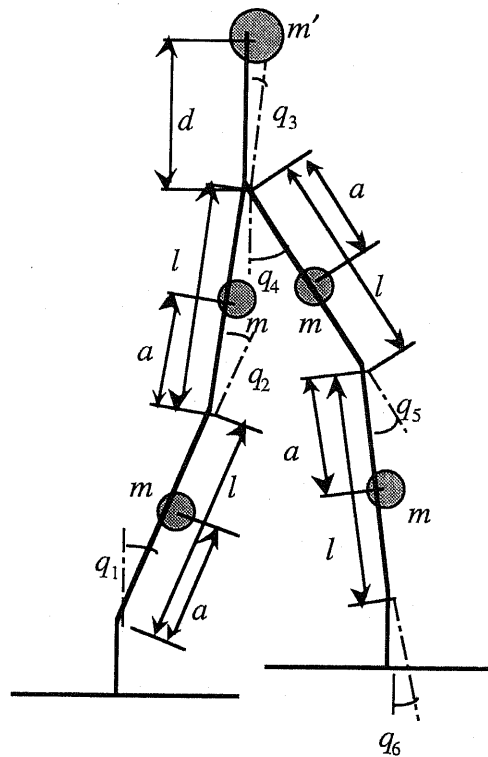


図3.7: 矢状面での座標系設定, 質量モデル

ここで、 $\beta$ は遊脚軌道の性質を定めるパラメータである。

なお、下位レベルからロボットの実際の倒れこみ角度  $q_1$ が中位レベルに送られ、支持脚交換のトリガとなっている。

### 3.4.2 遊脚軌道の選択

式(3.12)における $\beta$ は以下のような性質を持っている。

- ・  $\beta < 0$  で鳥型歩行,  $\beta > 0$  で人間型歩行となる (図3.8)
- ・ 絶対値が大きいと膝を大きく曲げ, 遊脚脚先を高く持ち上げる

実験においては  $\beta = -2$  を採用した。これは以下に述べる角運動量の問題と, 関節の許容動作速度の兼ね合いから選択した。

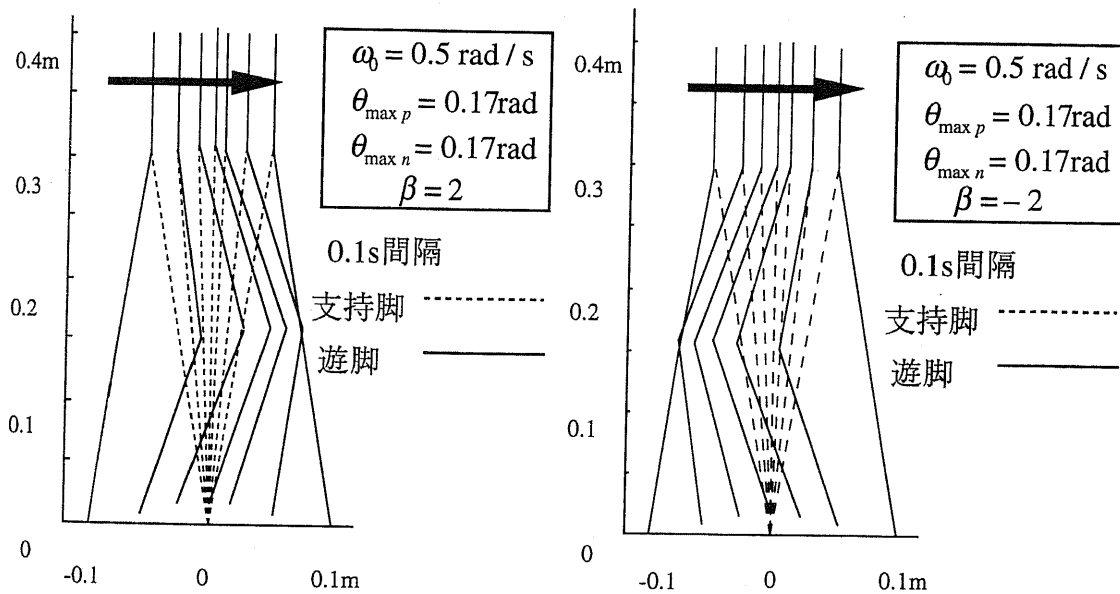


図3.8: 人間型歩行と鳥型歩行

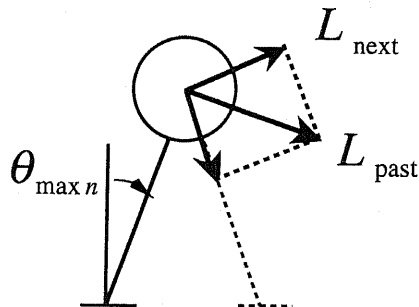


図3.9: 支持脚切り替え時の角運動量の伝達

支持脚切り替え時には必ずしも足首周りの総ての角運動量を次の一步に引き渡せるわけではない。これは、図3.9に載せるように、支持脚切り替え時には床面との衝突によって角運動量を必ず損失することに起因する。次の一步に引き渡される角運動量 $L_{next}$ は、切り替える直前の角運動量 $L_{past}$ を用いて、次式のように近似できる。

$$L_{next} \cong L_{past} \cos(2\theta_{max n}) \quad (3.13)$$

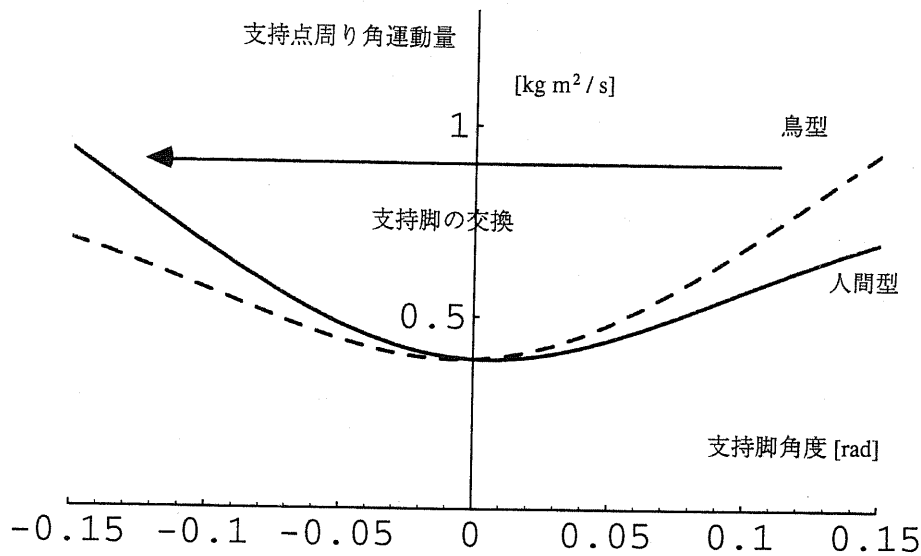


図3.10: 支持脚足首周りの角運動量

図3.10は実験機のパラメータでの支持脚足首周りの角運動量を計算機シミュレーションした結果である。横軸は支持脚足首から見た胴体基部の倒れこみ角度であり、縦軸が足首周りの角運動量である。実線は人間型歩行の場合の軌跡であり、破線は鳥型歩行の場合の軌跡である。人間型の場合は「着地直前の角運動量<着地直後に必要な角運動量」となり、鳥型では「着地直前の角運動量>着地直後に必要な角運動量」となる。この結果は支持脚交換時の角運動量損失とその補償を考慮すると非常に興味深い。

鳥型歩行を採用するとけりによる補償の必要性が薄れる。実際の実験においてもけりはまったく行わず、足の裏は常に床面に平行に設定している。けりによる補償は衝撃力を発生させ、位相面軌跡を乱す要因となるため望ましくない。陽に衝撃力低減制御を行わない際には、鳥型歩行の採用は安定性向上の一助になると考えられる。

## 3.4.3 ZMP安定規範による歩行安定性の検証

前小節で触れたように、着地時の角運動量損失を見越して鳥型歩行の優位性を導いたが、これが実際のロボットにおいて実現可能であるかの検証が必要であろう。また、式(3.12)がZMPを支持脚からはみ出しにくいように選択されていることを確認する。

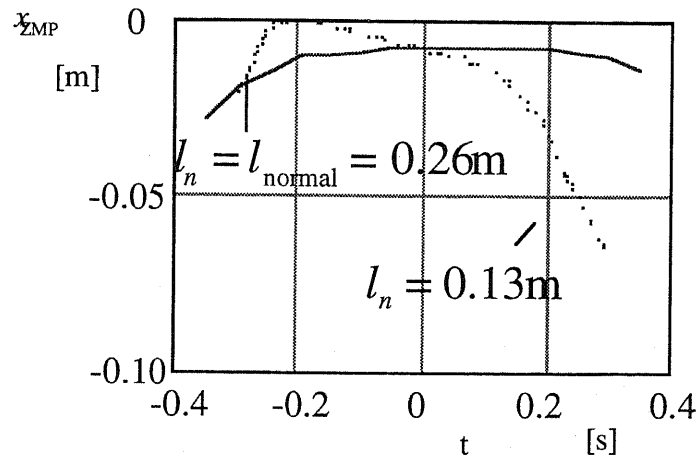
ZMPは床面に対する回転モーメントが0になる位置であり、式(3.14)で求められる。ただし、 $(x_n, y_n)$ は各リンクの重心位置を表し、 $m_n$ は各リンクの質量とする。

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{n=1}^5 m_n (\ddot{y}_n + g) x_n - \sum_{n=1}^5 m_n \ddot{x}_n y_n}{\sum_{n=1}^5 m_n (\ddot{y}_n + g)} \quad (3.14)$$

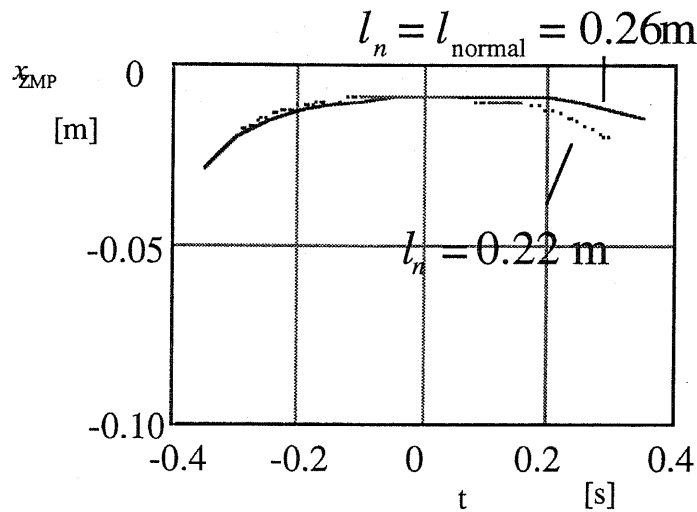
ZMPが、足の裏で構成される多角形の中に存在すれば、その歩行は安定である。片足支持期では、これは支持脚の足の裏のことであるから、 $x_{zmp}$ が足の裏の前後長内をはみ出さないことが、歩行の安定性の十分条件である。

図3.11に歩行の際のZMPの時間変動の計算機シミュレーション結果をのせる。実線は定常歩行の際のZMPの動きで、 $l_n = l_{normal} = 0.26m$ によって与えられる歩行の場合である。ZMPはかかと側の2~3cm辺りを通っており、人間のように爪先側のみに足の裏があるような場合には、歩行は安定とは限らないことがわかる。なお、ZMPがかかと側を通る理由としては、提案手法の遊脚の動かし方が、人間とは逆向きに膝を曲げるようになっていたために、歩行中の重量バランスが進行方向後ろに偏っていることが挙げられる。かかと側にZMPが存在するので、提案手法では足の裏は体を前に押し出すための作用点になるように使われていることが確認できる。

図3.11の(a)の点線は、仮想倒立振子の足の長さをかなり短くしたもの ( $l_n = 0.13m$ ) であり、このような極端に短くする場合としては急加速や急減速が挙げられる。 $t > 0s$ は、 $\omega_0 = 0.2 \text{ rad/s} \rightarrow 1.0 \text{ rad/s}$ のような加速の時のZMPを表している。この場合は明らかに、足首トルクを加速させる方向に使っており、かつ大きな足首トルクを必要としているので、ZMPはさらにかかと側を通っている。すなわち、仮想倒立振子のパラメータ指定による加速が実現されるためには、人間とは異なる足の裏の構成、すなわち「かかと側に長い足の裏」が必要であることがわかる。もっとも、常識的な加速( $\omega_0 = 0.2 \text{ rad/s} \rightarrow 0.5 \text{ rad/s}$ 、歩行速度6cm/sから15cm/s)のような場合には(b)のように、ZMPはあまり大きく移動せず、足の裏は後ろに3cmあれば十分であることがわかる。



(a) 定常歩行と急加速・急減速



(b) 定常歩行と加速・減速

図3.11: 歩行時のZMPの軌跡

### 3.4.4 ロバストサーボの採用

仮想倒立振子法は、各関節軸の位置制御によって、質量中心の足首周りの角速度を倒立振子のそれに近づけるものであった。逆にいえば、位置制御のサーボ剛性が低ければ、角速度は倒立振子のそれには近づかない。このため、各関節軸にはロバストサーボを施して、他関節からの干渉力や、重力の影響を受けない位置サーボ系を構成する必要がある。加えて、一般にロバストサーボ系はパラメータ変動に対しても十分なロバスト性を有しているので、二足歩行機械を搬送用に利用する際などの荷重変動に対しても、歩行形態が乱れないことが期待できる。

なお、ロバストサーボ系の構成方法については本論文の範囲を逸脱するので文献[24], [25], [26], [27], [29]をご覧頂きたい。



図3.12に、試作1号機”Ostrich-I”の左足を着地したまま、右足を前後に動かした場合（バスケットボールでいう所のピボットをさせた際）の、左足の足首の挙動についての計算機シミュレーションを載せる。左足の足首を選んだ理由は、”Ostrich-I”のアクチュエータ性能が全関節とも同等であるので、このような動作をさせた際には、左足首がもっともトルクを要し、かつ外乱の効果も大きいので、サーボ性能の検討に適しているからである。2自由度サーボを用いた場合が(a)、PD制御器を用いた場合が(b)である。このシミュレーションでは、ロバスト性の検証のため、各種の外乱を入力している。まず、 $t=4s$ にて、胴体部に4kgの負荷を追加している。すなわち、 $m'=4 \rightarrow 8kg$ である。さらに、 $t=7s$ にて、モータ定格の70%の負荷トルクを入力している。なお、シミュレーションに用いた定数を表3.1に示す。PD制御器は、応答時間が2自由度サーボと同じになるようにゲインを調節している。

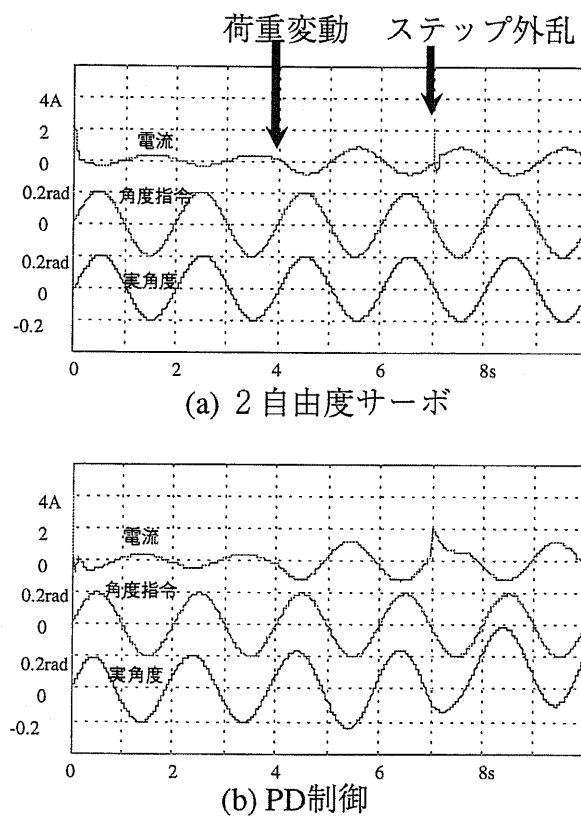


図3.12: ピボット運動をさせた場合の応答

図3.12から、荷重変動等に耐えられるような二足歩行機械は、荷重の情報が与えられない限りは、2自由度サーボのようなロバストサーボによって制御される必要があることがわかる。さらに、目標追従特性が頑強に実現されているので、滑らかな動きをさせるためには、滑らかな位置指令を与えるだけでよい。トルクパターンを考える必要はなくなっている。従来の二足歩行においては、姿勢による外乱の変動や、各関節の干渉力の変動が大きいため、位置のサーボ剛性があがらず、トルクパターンを工夫して作らなければうまく動かなかったという経緯があったが、ロバストサーボの適用は、その労力を省いてくれる物になっている。もちろん、過去

にもハイゲインのサーボで位置指令のみを与える形の実現も考えられたが、ノイズ等の問題でロバスト性をあまりあげられなかった。ゆえに、位置制御のみの発想は歩行には向かないとされたが、2自由度を擁するロバストサーボは、これに対する反論になっている。

なお位置制御の実装に当たってはプレフィルタを前段に挿入している。これは指令値と実際値の追従の時間遅れを極力小さくするためである。従来手法のように軌道パターンをメモリに貯えておくならば、追従のおくれを見越して軌道パターンを制作しておけばよい。しかし、実時間で軌道生成も行うシステムを構築する際は、この遅れは致命的なものとなる。一般に小型のDCモータを位置制御する際の応答時間は速くても50ms前後が選ばれる。ところが足の長さが0.3m程度のロボットの場合、倒立振子の時定数は $1/\alpha = 170\text{ms}$ で与えられ、応答時間に対して十分大きいとはいえない。ゆえに、倒立振子の振る舞いが線形近似できる範囲に治まるようにするためには、応答時間を10ms程度に押さえることが必要である。

表 3.1: シミュレーションで用いた定数

トルク係数	$K_m = 5.76 \text{ Nm/A}$	ロータ慣性モーメント	$J_M = 8.1 \times 10^{-2} \text{ kg m}^2$
		負荷慣性モーメント	$J_L = 0.79 \text{ kg m}^2$
目標値応答時間	$\tau_r = 100 \text{ msec}$	$Q(s)$ フィルタ遮断時間	$\tau_d = 10 \text{ msec}$
		プレフィルタ遮断時間	$\tau_p = 10 \text{ msec}$

第4章

Ostrich-I の開発

4.1 システム構成

4.1.1 ハードウェア

図4.1に筆者が製作した試作1号機”Ostrich-I”を示す。”Ostrich-I”の仕様を表4.1に載せる。

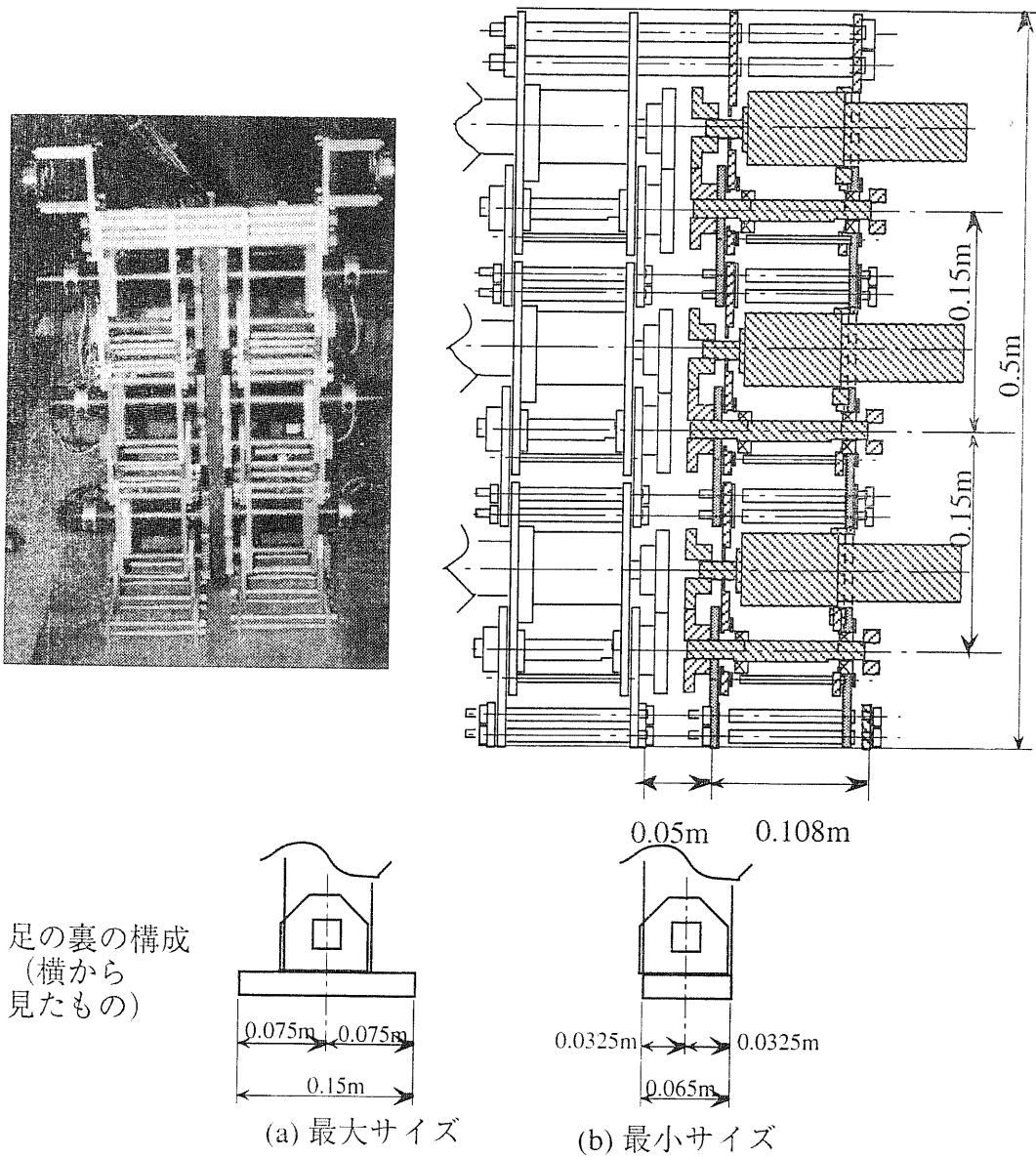


図 4.1: Ostrich-I

表 4.1: ロボットの仕様

材質	
構造材	6mm厚ジュラルミン
	8φジュラルミン棒
フランジ	10mm厚ジュラルミン
ギア, 関節軸, 胴体部シャフト	鉄棒(S45C)

アクチュエータ(RH-14)仕様

定格出力 (出力軸換算)	18.5W
モータ定格出力	30W
定格電流	1.8A
定格トルク (出力軸)	5.9Nm
定格回転数 (出力軸)	30rpm
トルク定数 (出力軸換算)	5.76Nm/A
慣性モーメント (出力軸換算)	0.081kg/m <sup>2</sup>
電機子抵抗	2.7Ω
電機子インダクタンス	1.1mH
減速比	100
エンコーダ分解能	1000P/rev.

重量

構造材	7.6kg
アクチュエータ	0.5kg×6
ギア	0.2kg×12
全重量	13kg

図4.2に製作したコントローラの構成を示す。特徴的なのは、歩行速度をAD変換器を通して、実時間で取り入れる構成になっている点で、可変抵抗により歩行速度の指令値を与えるようになっている。各軸のサーボルーチンの計算等は、DSP  $\mu$ PD77240で行う。限られたサンプリング時間内で、一軸につき3次程度のコントローラを実現し、それを6軸分実現するためには、DSPのような高速のプロセッサは必要と考えられる。筆者は1ms程度のサンプリング周期を仮定しており、インターバルタイムを用いた割り込みにより正確なサンプリングを実現する。上記のDSPはサーボ計算を300  $\mu$ s程度で行うことができるので、計算能力は十分である。ただし、この余裕時間は、軌道計算や支持脚切り替え判定等の処理に割り当てられる。

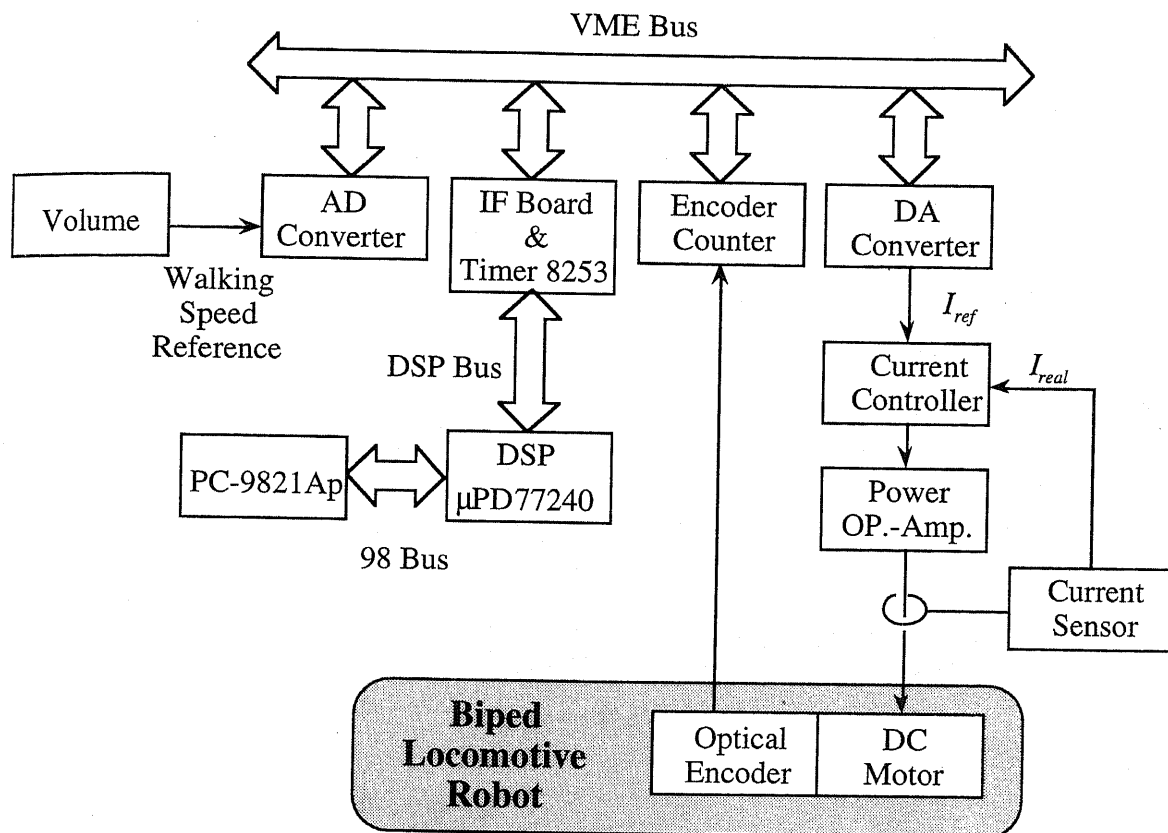


図 4.2: コントローラ構成

#### 4.1.2 ソフトウェア

図4.3に仮想倒立振子のパラメータ指定による二足歩行の制御フローチャートを載せる。この手法では、歩行を決定するパラメータは4つに集約される。すなわち、歩行速度指令値の  $V_{ref}$ 、遊脚の振り上げ度合を決める  $\beta$ 、および歩幅と歩行速度の関係を定める  $\gamma$  である。現在はこれらの3つのパラメータのうち、 $\beta$ 、 $\gamma$  は前もって与えるようになっている。

歩行速度指令  $V_{ref}$  以外のパラメータを与えておけば、本システムは  $V_{ref}$  を唯一の入力とするシステムとなっており、ラジオコントロールカーのようなりモコンによる可変速歩行が可能である。本システムは「仮想倒立振子の足の長さ」を加減速の度合を表すパラメータとして用いており、かつ、加減速であるか定常歩行であるかを指定するのは、仮想倒立振子の足の長さというパラメータ1つだけである。さらに、このパラメータの指定値も、要求する歩行速度から解析的かつ容易に求められるので、サンプル時間内に計算可能である。

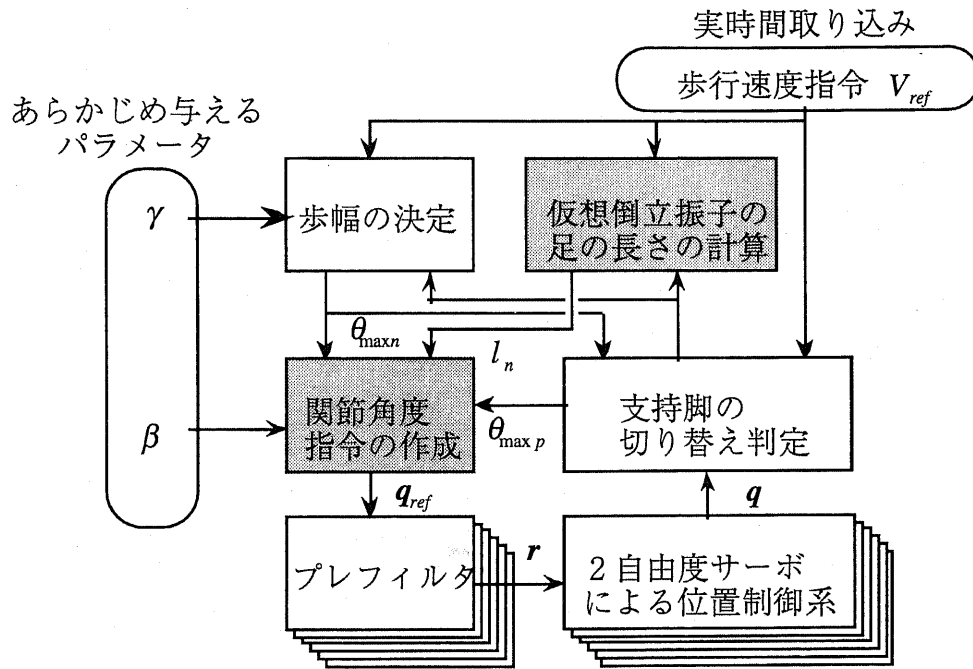


図 4.3: 制御の流れ

## 4.2 Ostrich-I による歩行実験

### 4.2.1 実時間可変速歩行の実現

図4.4-6は歩行実験時の連続写真である。図4.7は歩行速度指令に対する応答の様子（可変抵抗スイッチからの歩行速度指令値と、左足首関節の応答）を示す。最初はロボットは停止状態にあり、歩行速度指令は0である。  $t=1\text{ s}$  の時点で歩行速度指令を約  $0.2\text{ m/s}$  と設定し、ロボットは歩行を開始する。この時の歩行パラメータは歩幅  $0.05\text{ m}$ 、周期  $0.5\text{ s}$  である。さらに、  $t=6\text{ s}$  付近で可変抵抗を手動で調節し、歩行速度指令を約  $0.25\text{ m/s}$  に上げる。これに対しロボットは実時間応答を示し、高速歩行へと移行する。この時の歩行パラメータは歩幅  $0.075\text{ m}$ 、周期  $0.5\text{ s}$  である。歩幅の増大に応じて関節角度の稼働範囲も増大していることがみられる。

図4.8はこの時の胴体倒れこみ角度についての位相軌跡を観測したものである。(a)はモデルの挙動であり、(b)は支持脚関節角度などから算出した実機のものである。角速度は角度情報の時間差分を利用しているため観測雑音の影響が大きいが、大まかに二本の軌跡をトレースしていることがみられる。

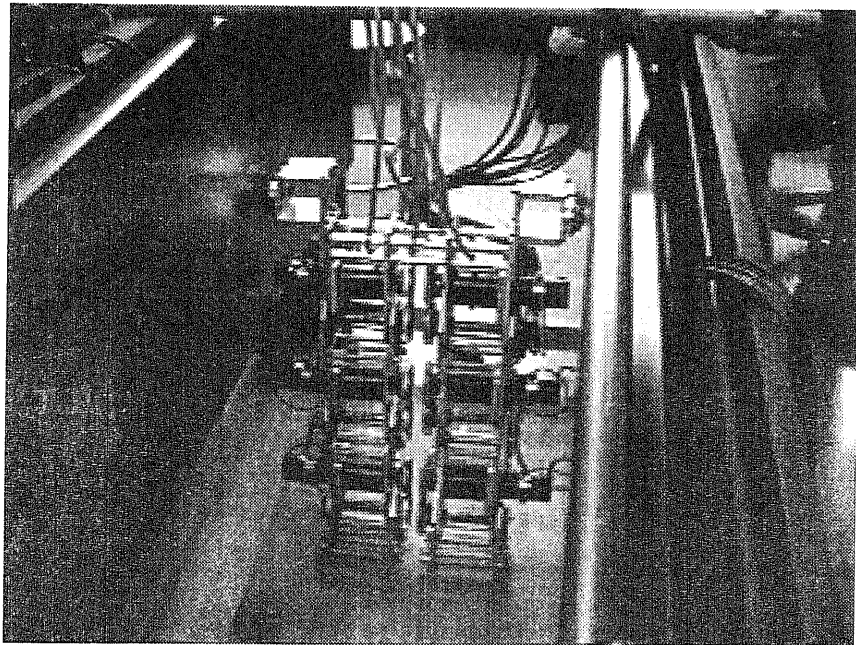
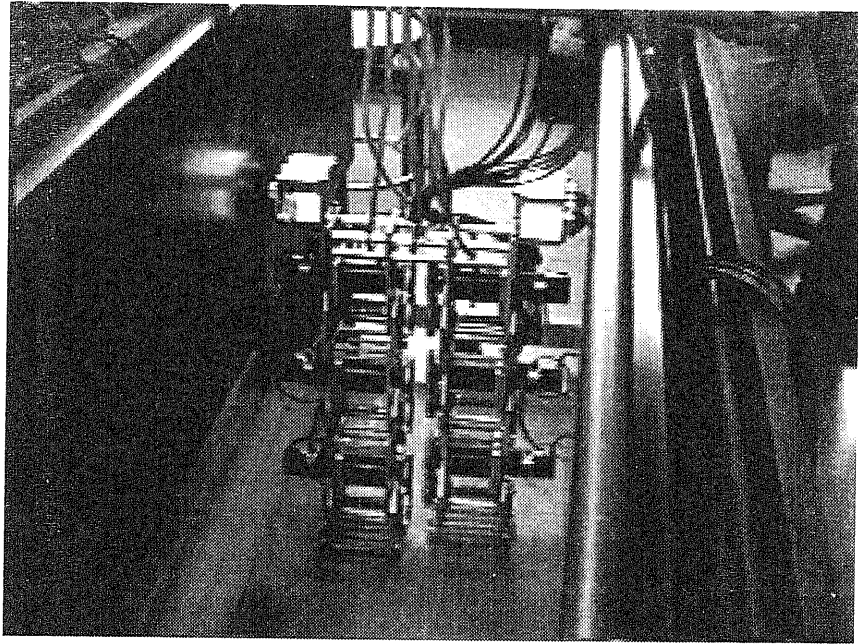


図 4.4: 歩行実験時の連続写真-1 (0.3s間隔)

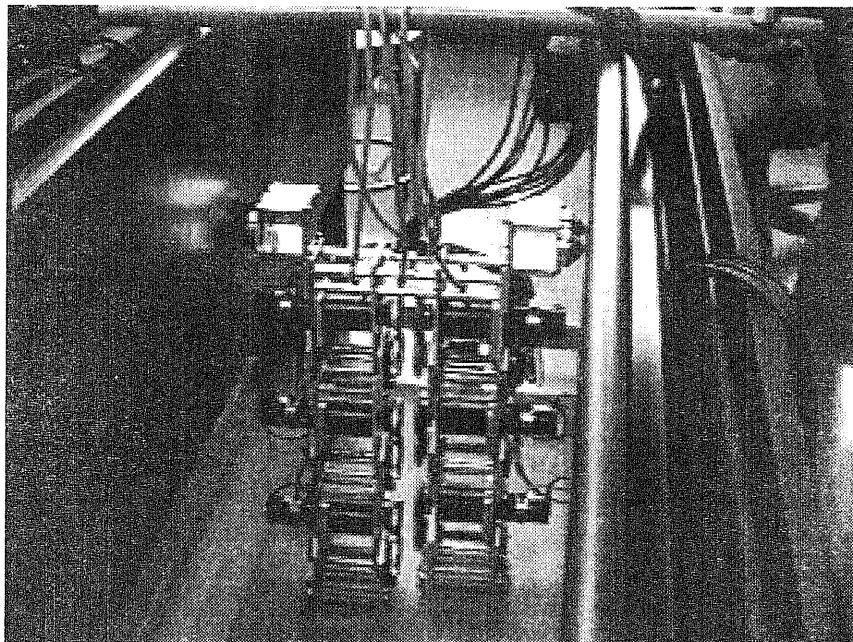
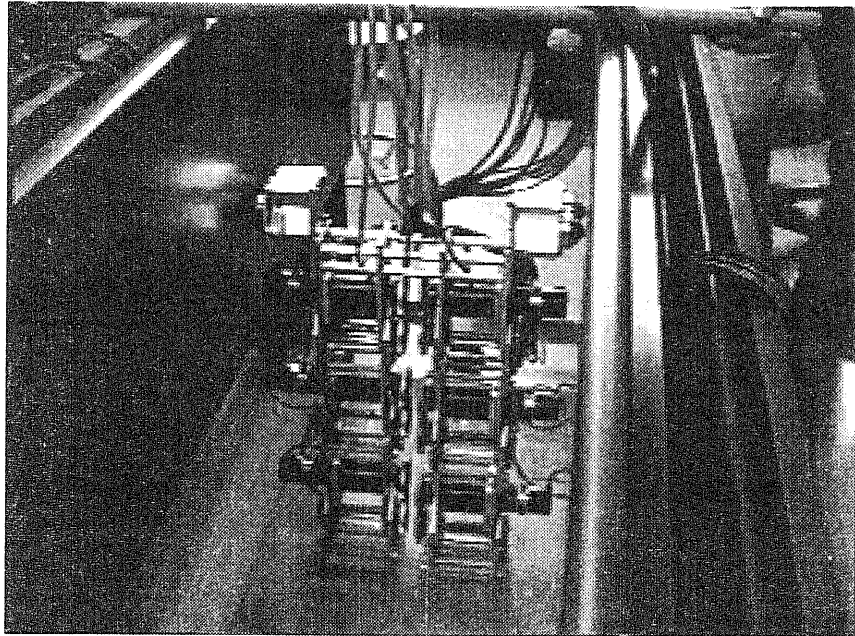


図 4.5: 歩行実験時の連続写真-2 (0.3s間隔)



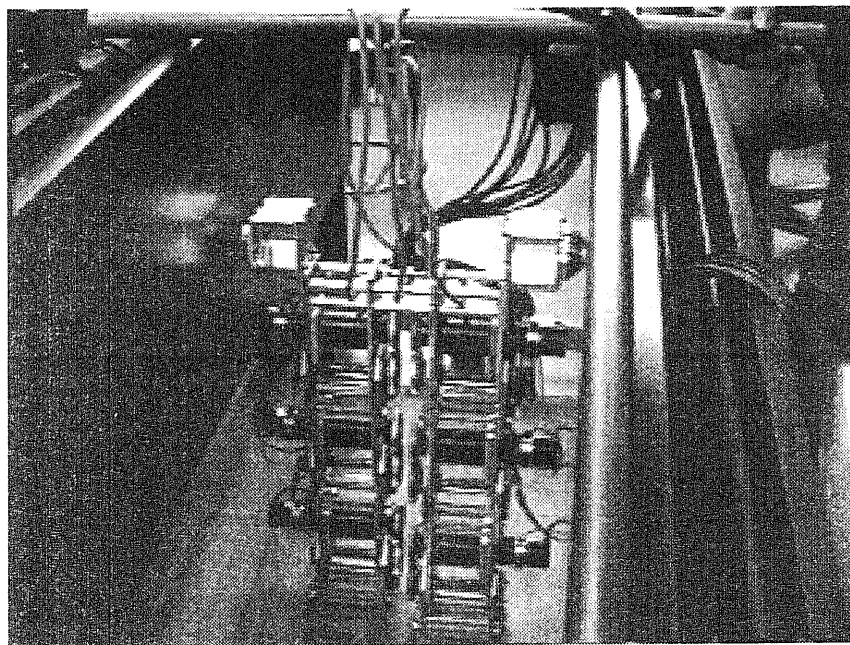
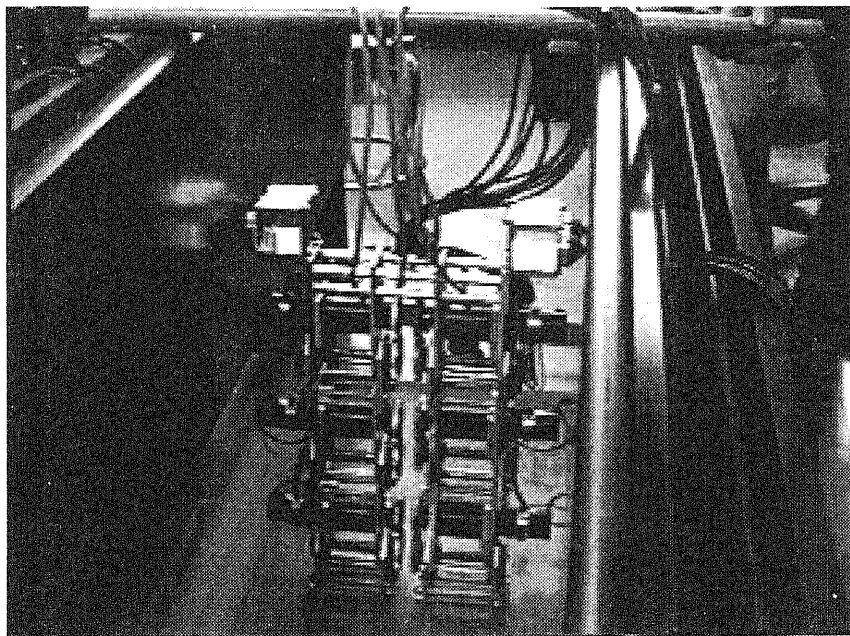


図 4.6: 歩行実験時の連続写真-3 (0.3s間隔)

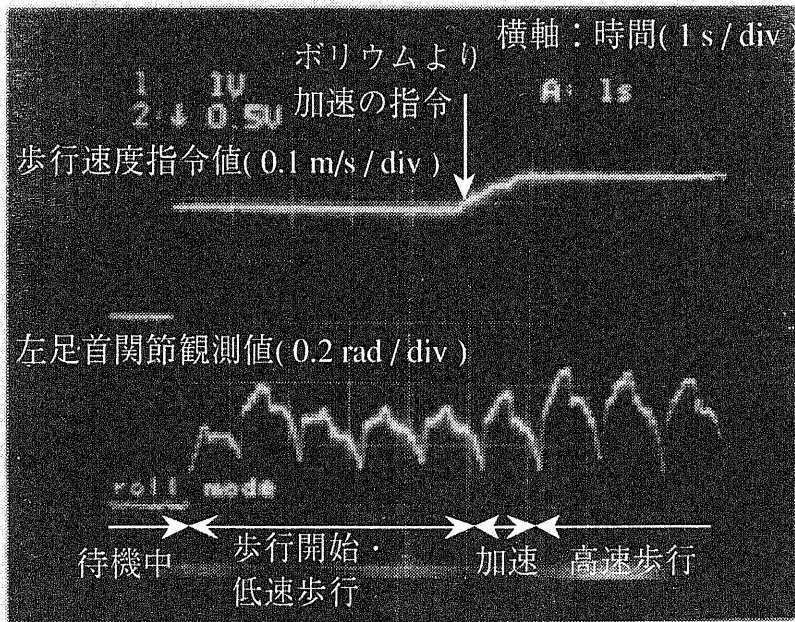


図 4.7: 加速指令に対する実時間応答の様子

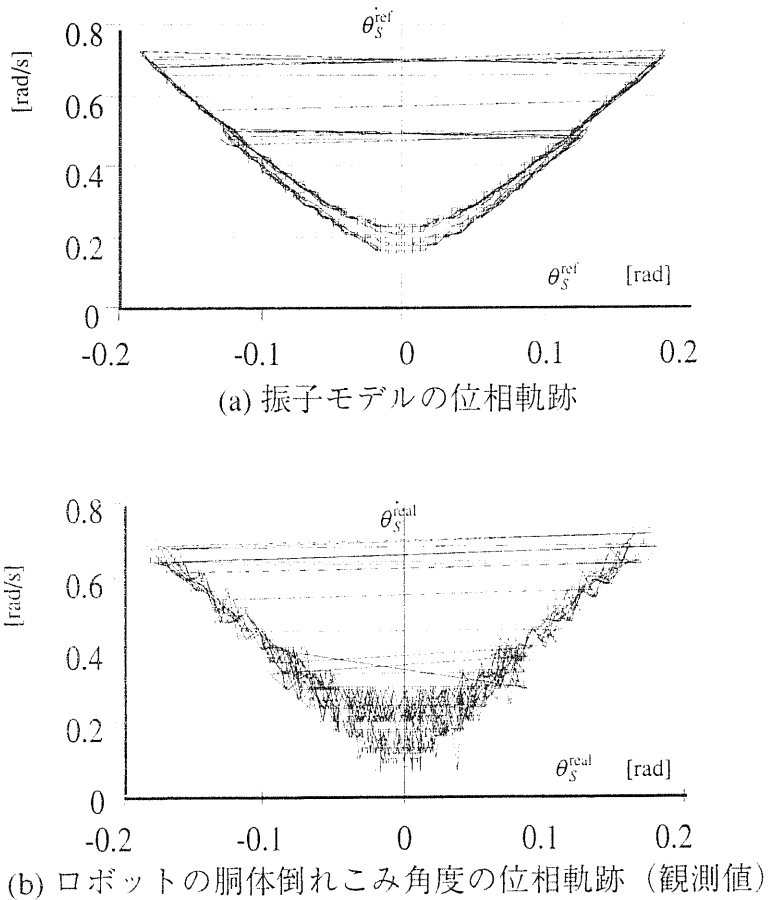


図 4.8: 歩行実験時の位相軌跡

図4.4-8などに示すように、操作者の指令に応じて歩行状態を実時間で変化させるシステムが構築できることを確認した。また、歩行可能な範囲は

#### 4.2.2 外乱に対するロバスト性の検証

各関節軸の位置制御のロバスト性を変更し、それが歩行にどのような影響を与えるかを検証した。ロバスト性の調整は外乱推定時間を10 ms から 50 ms の間で10 ms 刻みで変更した。歩行への影響については歩行速度を一定に設定し、同一歩数（10歩）でどれだけの距離を進むかを測定することで確認した。腰部にボールトランスがついており、ガイドとの摩擦が常に生じているため、実際の歩行はこの摩擦分を補償しながらでなければ前に進むことができない。ゆえに、関節剛性を落としていけば外力に負けて関節が指令値通りに動かないこととなる。

図 4.9 は各推定時間毎に5回の試行を行い、平均値、最大値、最小値をプロットしたものである。外乱抑圧が理想的でサーボ剛性が無限大の時は歩行距離は 250 mm となることが期待できる。図4.9から明らかなように、外乱推定が遅くなればなるほど歩行距離が小さくなっており、外乱を補償しきれていないことがわかる。

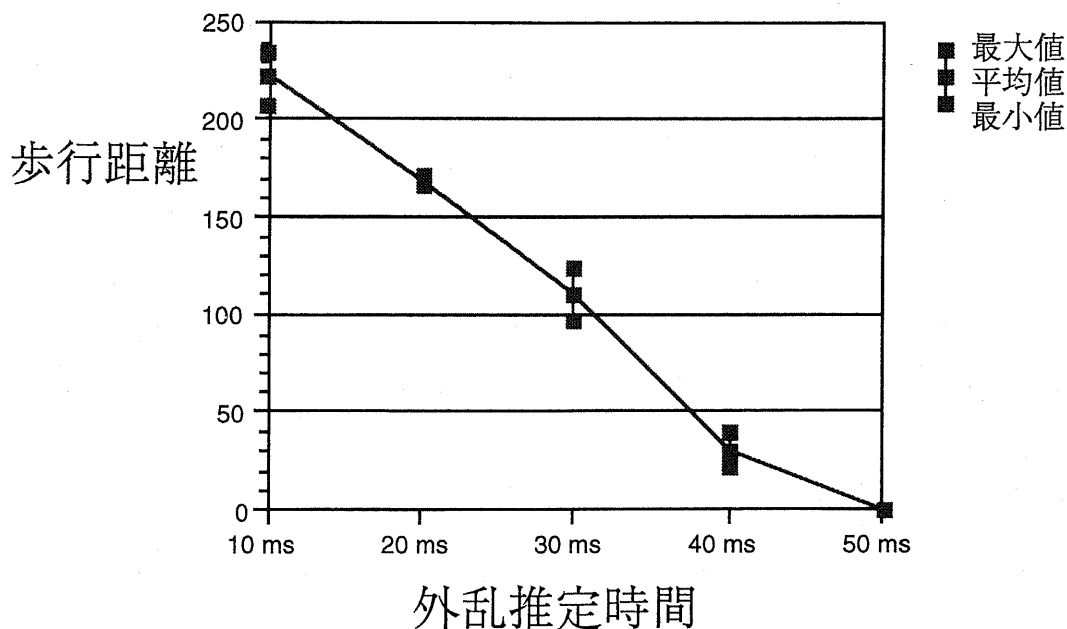


図 4.9: 外乱推定時間と歩行距離の関係

### 4.3 ガイドレールを外した場合

自立歩行の可能性について検討するため、ガイドレールを外した状態で、前額面運動を自由にした場合の歩行実験を行った。支持脚切り替え時に床面との反力が十分にあり、リズムカルに床面を蹴りつければリズムカルに身体を左右に揺動させるモードが発生し、前額面に能動的な自由度がなくとも身体を左右に傾けながら単脚支持による歩行を実現できると思われる（[19], [32]）。

#### 4.3.1 歩行実験

歩行パラメータを様々に変化させて実験を行ったが、身体を左右に揺動させて単脚支持をするまでには至らなかった。実現されたのは遊脚を引きずりながらの歩行であり、パラメータの選択によっては支持脚の接地が面接触とはならず、爪先や踵の点接触となる場合が生じた。このような接地状態では、ヨー軸（床面に垂直な軸）周りの回転モーメントを床との摩擦力では補償できずに、進行方向が右や左へ回転してしまう。この様子を図4.10-12に示す。身体をひねりながら前に進んでいることがわかる。

ヨー軸周りの回転モーメントを補償するためには床面と摩擦力を大きくする必要があるが、上記のように支持面の接触が不十分で点接触となっているため、摩擦力は十分ではない。そこで、足の裏の前後長を伸ばすことにより接触点周りの慣性モーメントを増やし、ヨー軸回転を小さく抑えることを試みた。その結果、進行方向はまっすぐ進むようになったが、遊脚を前に運ぶ際のひっかかりが多くなって、十分な歩幅が実現できなかった。この様子を図4.13-15に示す。

また、歩幅、膝の曲げ伸ばし量などのパラメータを固定して歩行周期のみを変化させて行った結果、0.7s以下の周期であれば、左右に転倒することはなかった（表4.2）。このことから、歩行機械の構造的な倒れ込み時定数 170 ms に対して、4倍程度が歩行周期の許容範囲と考えられる。

表 4.2: 歩行周期と左右転倒の関係（歩幅0.07m,  $\beta = -2$ ）

歩行周期	挙動
0.2s	実現不能（関節応答速度が不足）
0.3s	安定（ただし、アクチュエータ負担が大きい）
0.5s	安定（特に問題なし）
0.7s	安定（若干倒れかかっている）
0.8s	転倒（歩行周期が長すぎる）

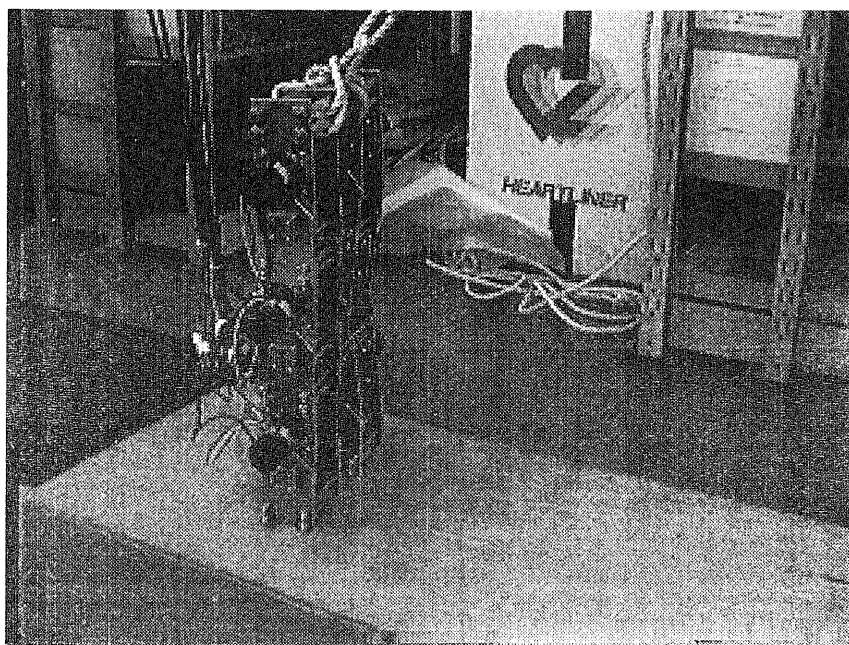
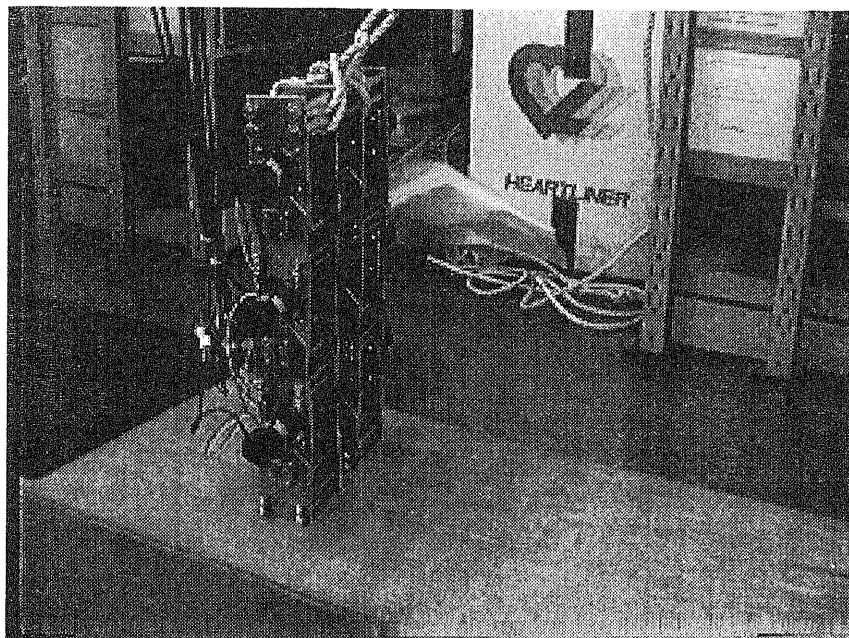


図 4.10: ガイドレールを外した場合の歩行1-1  
(足の裏の前後長が短い場合)

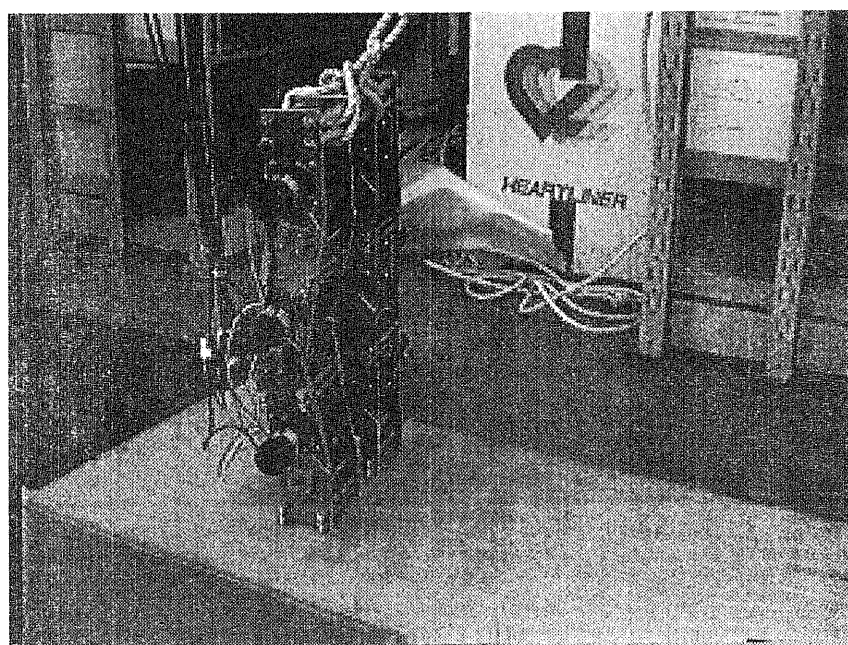
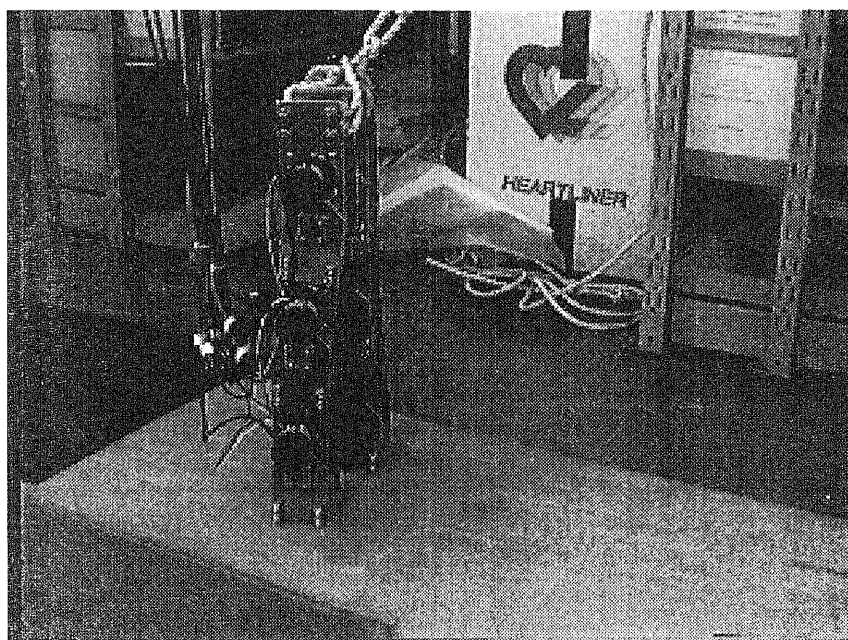


図 4.11: ガイドレールを外した場合の歩行1-2  
(足の裏の前後長が短い場合)

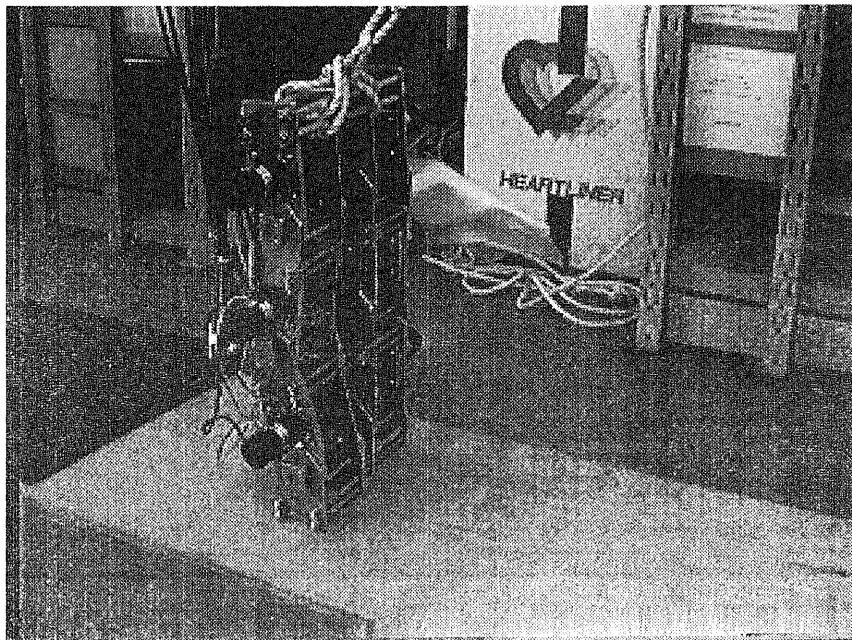
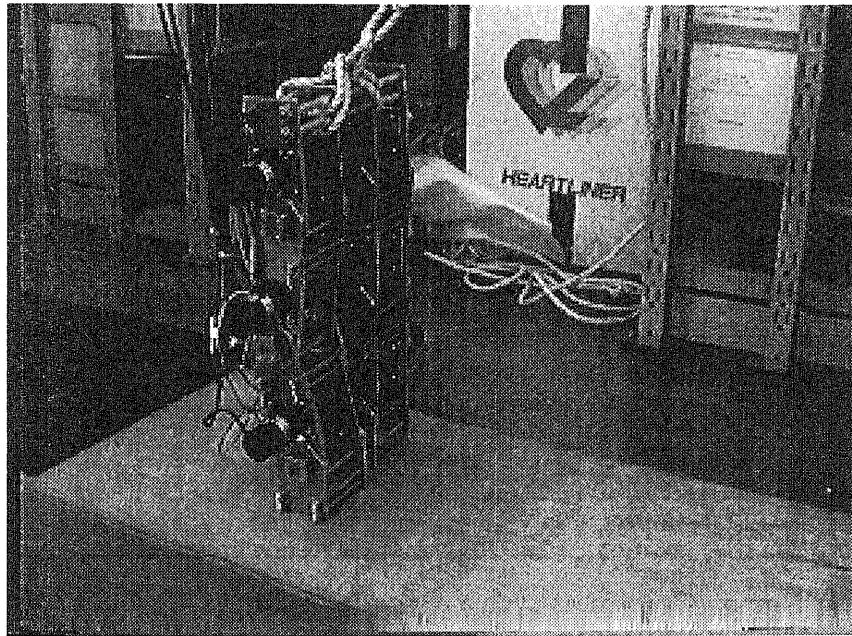


図 4.12: ガイドレールを外した場合の歩行1-3  
(足の裏の前後長が短い場合)

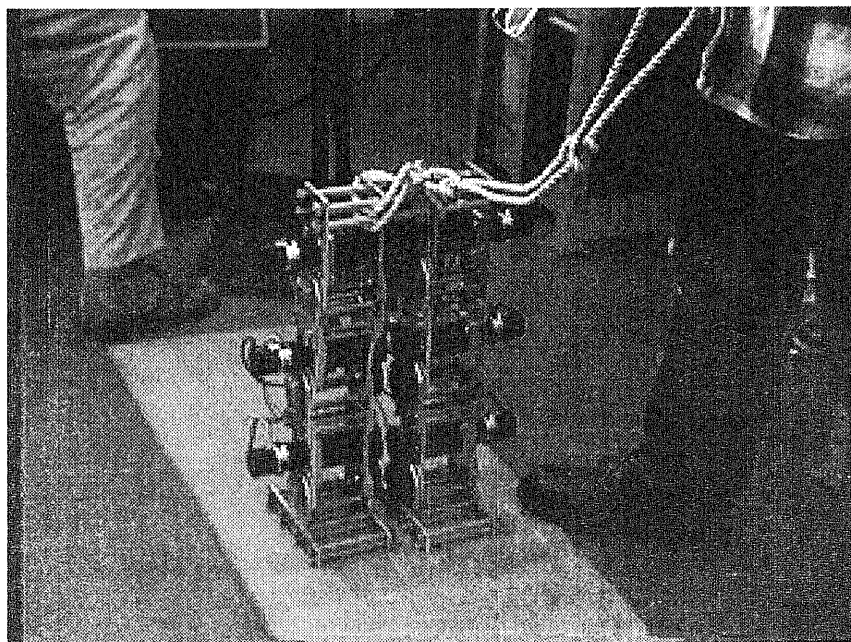
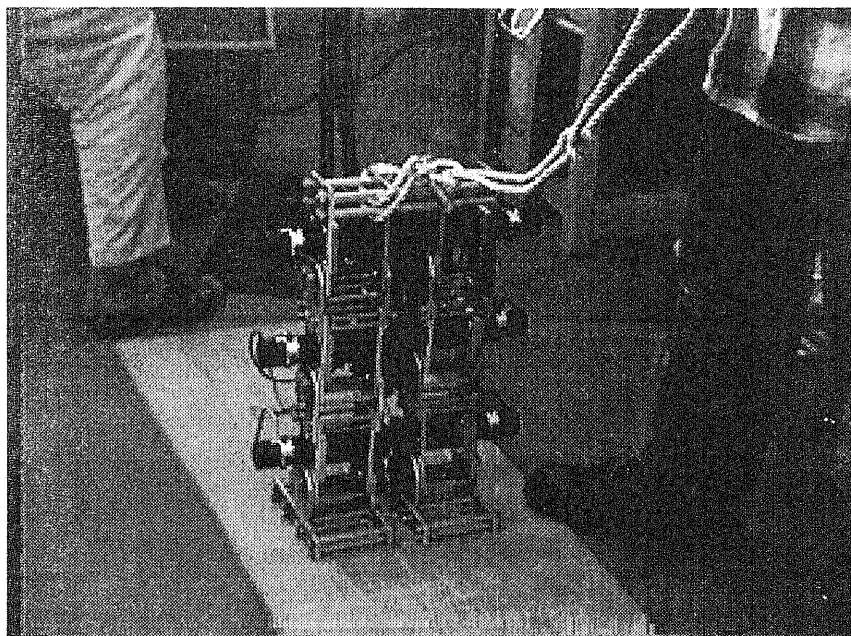


図 4.13: ガイドレールを外した場合の歩行2-1  
(足の裏の前後長が長い場合)



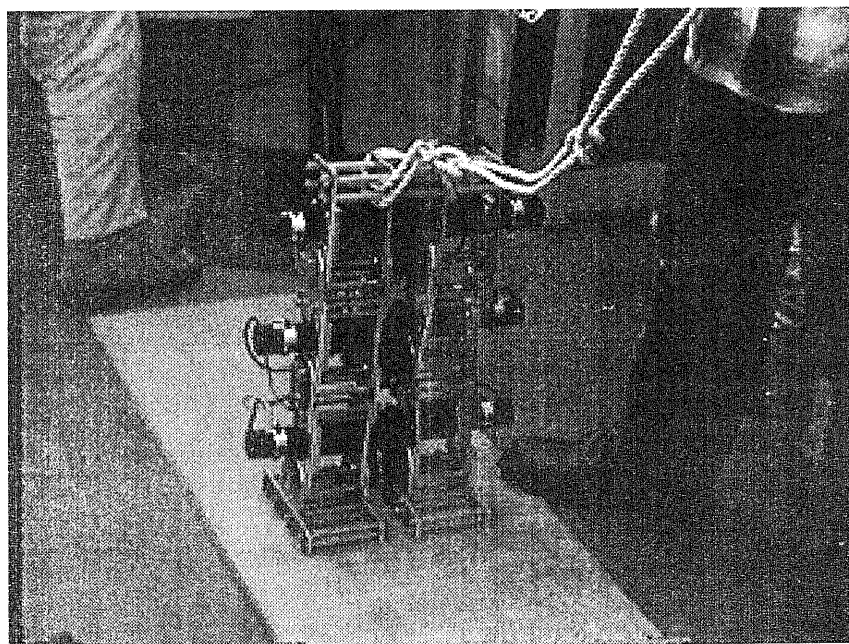
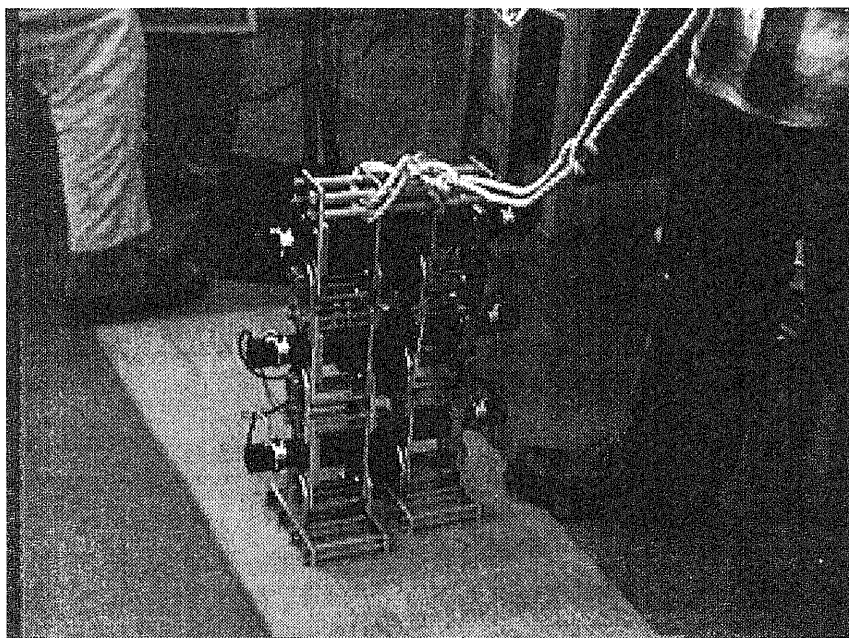


図 4.14: ガイドレールを外した場合の歩行2-2  
(足の裏の前後長が長い場合)

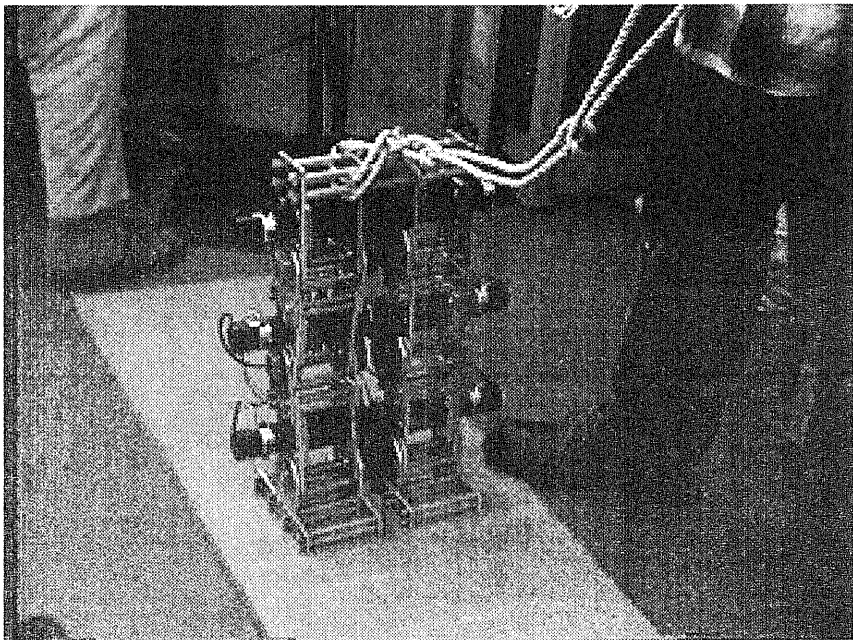
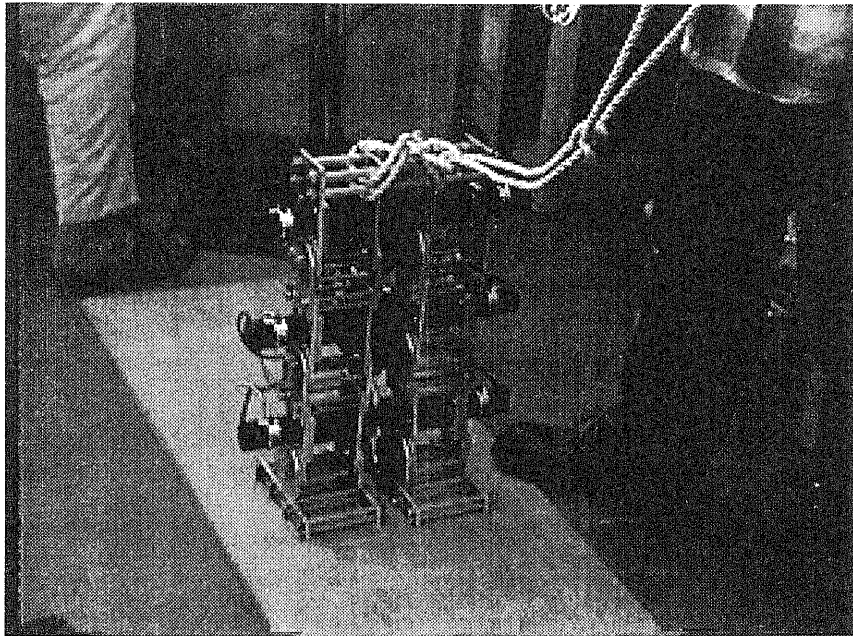


図 4.15: ガイドレールを外した場合の歩行2-3  
(足の裏の前後長が長い場合)

### 4.3.2 ガイドの有無による比較

上で示したように、ガイドがない場合は遊脚の持ち上げが十分でなく、まっすぐ進まないなどの弊害が生じる。これをガイドレールで補助した場合と比較したものが図4.16である。歩幅、歩行速度などの条件を同一として、10歩での進行方向に進んだ距離を示す。試行回数は10回とし、表示は各々の平均値である。

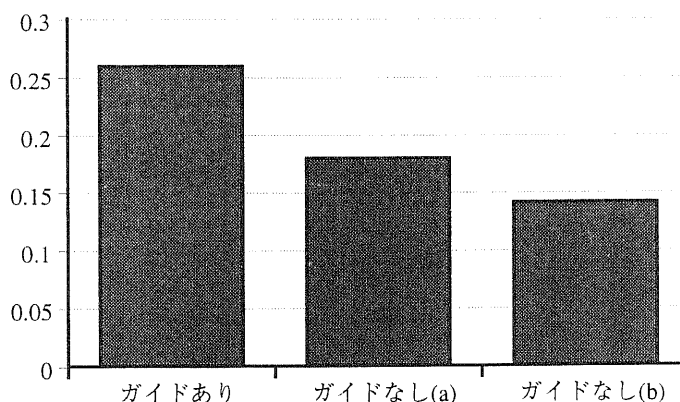


図 4.16: ガイドの有無による歩行距離の比較

(歩幅 0.03 m, 設定歩行速度 0.08 m/s)

(ガイドなし(a)は足の裏が短い場合 (6.5cm)を示す。

ガイドなし(b)は足の裏が長い場合 (15cm)を示す。)

足の裏が短い場合は身体がヨー軸周りに大きく回転してしまい、あまり前に進んでいない。また、足の裏が長い場合は身体はまっすぐ進行方向を向いているものの、遊脚の足の裏がひっかかる感じで前にあまり進んでいない。このように、遊脚の支持が不十分で支持脚が安定に接地していないとうまく前に進めないことが確認できた。

### 4.3.3 ガイド無し歩行に関する検討

様々なパラメータ下で実験を行ったが、結局遊脚を完全に持ち上げることができなかった。この理由を整理すると以下のようなになる。

- ・構造的な倒れ込み時定数が早い
- ・アクチュエータ特性が、けりを行うには不向きである  
高減速比のモータを使用しているため、けりのような瞬発的なトルク発生に不向きである
- ・構造的なガタ、バックラッシュ等により、機体剛性が低い

第1点は重心位置を高い位置に持つていくことが解決策となるであろう。第2点はこれといった解決策はないが、機体の軽量化により同一アクチュエータでも十分な瞬発力を期待できると思われる。第3点は設計、製作時の注意によって改善できると思われる。

しかしながら、けりのような撃力によって受動的に前額面運動を制御することは、歩行安定性の観点から好ましくないことは明らかである。ゆえに上記のような解決策は抜本的なものではない。前額面に能動自由度を配し、左右への転倒を防止する方策を考えることが重要である。第5章ではこの問題について検討する。

#### 4.4 まとめ

以上に述べてきたように、Ostrich-Iを用いた実機実験によって、矢状面に拘束された実時間の可変速歩行が実現できることを示した。実現可能な歩行は、歩行速度は0.05 m/s ~ 0.25 m/s、歩幅は0.02 m ~ 0.10 mの範囲である。また、ガイドレールによる外力補償の観点からロバストサーボが有効であることを確認した。なお、ガイドレールによる矢状面への拘束が存在しない場合は、遊脚を完全に浮かせることができないため、遊脚を引きずりながらの歩行となり、また足の裏の接触も面接触ではなく爪先や踵での点接触となり、安定な歩行を実現できなかった。ゆえに、自立歩行を実現するためには前額面に制御可能な自由度が必要であることがわかった。

なお、実験を通していくつかの問題が明らかになった。以下にまとめる。

実機実験において、歩行速度を上げていくと膝関節が制御不能となり転倒することが起こる。これは、足首、股と比較して膝関節は遊脚時に高速な応答を要求されるため、モータ最大回転速度の制約により制御安定性がそこなわれることが多いためである。これを防ぐためには回転速度の早いモータが必要となるが、これは支持脚時のトルク容量とのトレードオフとなる。したがって現在のところ有効な解決策は存在しない。非回転型のアクチュエータ技術の発達が期待される。

また、各関節軸のバックラッシュ、構造材のがたつきなどが歩行にかなりの悪影響を与えている。特に足首関節のバックラッシュは左右非対称度が大きければ歩幅の差異が招じ、進行方向が正面からずれてしまうなどの悪影響を及ぼす。さらに、これらのがたつきは実験を繰り返すにしたがって顕著となる。20回程の実験の後にはボルト・ナット等ゆるんでいる箇所が数ヶ所以上発生する。2号機の設計においては締め付け等のメンテナンスが行いやすい構造になるよう注意する必要がある。

## 第5章

## 仮想倒立振子法の拡張

## 5.1 受動的矢状面拘束とその限界

試作1号機“Ostrich-I”においては、運動を矢状面に拘束するために前額面でボールトランス+ガイドによる転倒防止を行っていた。しかしながら実用化を考慮すればガイドレール等に頼らない自立的な前額面転倒補償が必要となる。

## 5.1.1 足の裏で拘束する場合

支持多角形（支持脚の足の裏で構成される凸多角形）内に前額面運動のZMPが納まっていれば、安定性が補償される。これを静的に満たす条件は前額面重心の投影点が支持多角形の内側に存在することである。すなわち、足の裏がコの字形であったり、内側に飛び出していれば良い。

しかしながら上記の条件を満たすような足の裏の場合は互いに足の裏が接触する恐れがあり、取り得る歩幅に対して大きな制約を生ずる。また、何らかの障害によって前額面運動が転倒状態に陥った時、補償する手だてがなくなる。

## 5.1.2 上半身の相互作用で補償する場合

次に上半身の反力によって前額面転倒を防止することについて考えてみる。ただし、アクチュエータは上半身と下半身をつなぐ腰部にのみ装備し、支持点はフリージョイントとする。

## 解析

図5.1に二重倒立振子系のモデルをのせる。ここで、 $\theta$  は鉛直軸から見た絶対角度を表し、 $q$  はその手前のリンクに対する相対角度を表している。このとき、ジョイント周りの摩擦項を無視した運動方程式は式(5.1)で与えられる。

$$J(\theta)\ddot{\theta} + X(\theta)\dot{\theta}^2 + Z(\theta) = M^T u \quad (5.1)$$

ただし、方程式の各要素は次のように与えられる。

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ L_{21} \cos(\theta_2 - \theta_1) & L_{22} \end{bmatrix}, \quad X(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & L_{12} \sin(\theta_1 - \theta_2) \\ L_{21} \sin(\theta_2 - \theta_1) & 0 \end{bmatrix},$$

$$G^T = g \begin{bmatrix} m_1 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 & 0 \\ l_1 & a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g(m_1 a_1 + m_2 l_2) & g m_2 a_2 \end{bmatrix} \equiv [G_1 \ G_2],$$

$$Z(\theta) = -[G_1 \sin \theta_1 \ G_2 \sin \theta_2]^T, \quad M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad M^T = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\dot{\theta}^2 \equiv [\dot{\theta}_1^2 \ \dot{\theta}_2^2]^T, \quad q = M \theta \tag{5.2}$$

$$\left. \begin{aligned} L_{ii} &= I_i + m_i a_i^2 + l_i^2 \sum_{k=i+1}^p m_k \\ L_{ij} &\equiv L_{ji} = l_i m_j a_j + l_i l_j \sum_{k=j+1}^p m_k \quad (i < j \leq p) \end{aligned} \right\} \tag{5.3}$$

なお、 $L_{ij}$  は一般的な慣性能率の表式で(5.3)で与えられる。また  $I_i$  はリンク  $i$  の重心周りの慣性能率、 $m_i$  はリンク  $i$  の質量、 $a_i$  はリンク  $i$  の根元の回転軸からリンク重心までの距離、 $l_i$  はリンク  $i$  の根元の軸から先端の軸までの長さである。前額面には、足首のトルク発生要素がないので式(5.4)の制約条件が付け加えられる。式(5.4)の制約下における  $q_1$  と  $q_2$  の関係式(5.5)が求められる。

$$u_1 = 0 \text{ Nm} \tag{5.4}$$

$$\begin{aligned} & (L_{11} + L_{22} + L_{12} \cos q_2) \ddot{q}_1 + (L_{22} + L_{12} \cos q_2) \ddot{q}_2 - L_{12} \sin q_2 (2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) \\ & - G_1 \sin q_1 - G_2 \sin(q_1 + q_2) = 0 \end{aligned} \tag{5.5}$$

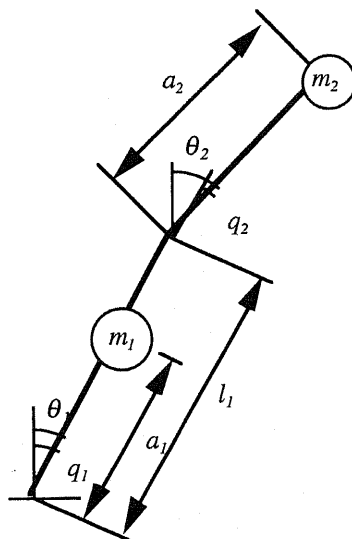


図 5.1: 前額面 2 質点モデル

表 5.1: ロボットのパラメータ

$I_1 = 0 \text{ kg m}^2$ $m_1 = 13 \text{ kg}$ $a_1 = 0.25 \text{ m}$ $l_1 = 0.4 \text{ m}$	$I_2 = 0 \text{ kg m}^2$ $m_2 = 4 \text{ kg}$ $a_2 = 0.3 \text{ m}$
--	---

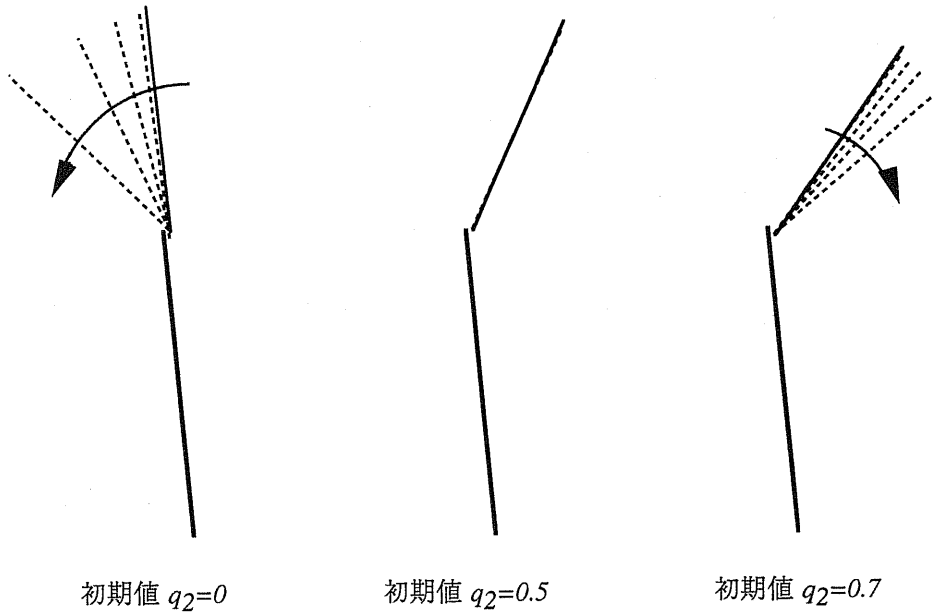


図 5.2: 下半身を動かさない場合のスティック線図(0.1 s 間隔)

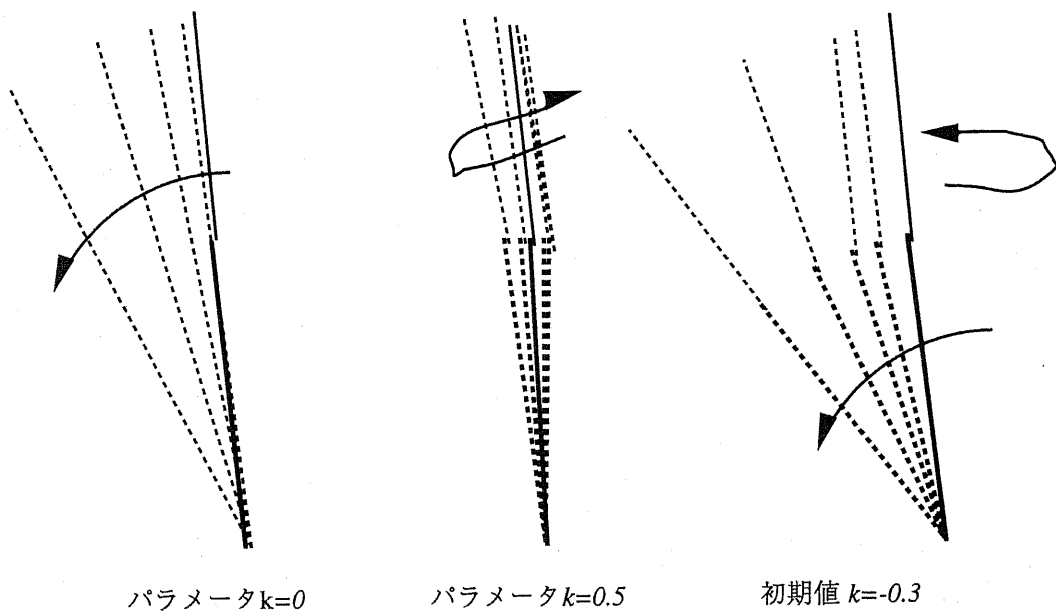


図 5.3: 下半身を動かす場合のスティック線図(0.1 s 間隔)

以下、2つの方式について解説する。

両足支持期を明確にする方法 -----A

歩行の際、単脚支持期は、適当な制約で上半身の重り要素を動かす。両脚支持期では、その定常解から初期状態への復帰を行う。単脚支持期には、下半身は前額面で見ると全く動かないもの ( $\dot{q}_1 = \dot{q}_2 = 0$ ) にすることができるが、式(5.5)より、その解は安定な定常解ただ一つで、他はすべて定常的には不安定な解である (図5.2)。これは、式(5.6)を数値計算したシミュレーション結果である。

$$(L_{22} + L_{12} \cos q_2) \ddot{q}_2 - L_{12} \sin q_2 \dot{q}_2^2 - G_1 \sin q_1 - G_2 \sin(q_1 + q_2) = 0 \quad (5.6)$$

ゆえに、 $\dot{q}_1 = \dot{q}_2 = 0$  という制約を与えてしまうと、上半身の動かし方は  $q_2 = \text{const}$  に制約される。よって、「両足支持期で次の軸足の定常解まで持って行って、片足支持期は上半身は動かさない」というアルゴリズムが考えられる。

長所 低速歩行が可能である。

短所 両足支持期の角運動量損失などの見積もりが難しい。意図的に両足支持をすることはエネルギー的に損である。

両足支持期はないものとし、上半身は大まかに動かす方法 -----B

極論すれば、下半身は左右に転倒しない限り少しは傾いてもかまわない。問題なのは内側に倒れて遊脚 (浮いている側の足) が地面についてしまうことなので、そのようなことが起きない限り、下半身の前額面内での動きはあまり拘束する必要はない。ゆえに、矢状面の動きに対応して上半身を左右に振れば、支持脚切り替え時に毎回初期姿勢に戻って来ることは可能である。

よって、上半身を傾ける角度  $q_2$  を式(5.7)で与えることにする。

$$\left. \begin{aligned} q_2 &= 2k\theta' \\ \theta' &= \frac{2\beta}{\theta_{\max n} + \theta_{\max p}} (\theta_n + \theta_{\max p}) (\theta_n - \theta_{\max n}) \\ \theta_n &= \frac{\omega_0}{\alpha} \sinh(\alpha t) \quad \alpha = \sqrt{\frac{g}{l_n}} \end{aligned} \right\} \quad (5.7)$$

式(5.7)は、矢状面の動きに対応して、一歩のはじめと終わりにはそれぞれ、 $q_2 = 0 \text{ rad}$  となるような動きをする。 $q_2$  を式(5.7)で与えた際の  $q_1$  の動きは、式(5.5)を数値計算することによって求められる (図5.3)。



長所 両足支持による角運動量損失がなく、エネルギー的に有利。歩行持続性などの判別が簡単。

短所 低速歩行はできない。パラメータのチューニングが必要。

まとめ

A, B の結果をみると、安定解は接点のようになっており、歩行パラメータを変化させると不安定性が非常に増大する恐れがある。このため、定められた歩行速度による定常歩行においては転倒防止を期待できるが、加減速中や歩行速度パラメータ変更時の対応に不安が残る。

## 5.2 能動的前額面運動の制御

### 5.2.1 下半身運動による前額面運動制御

支持点関節にアクチュエータが存在すれば、前額面転倒運動を能動的に補償することが可能であるが、転倒モーメントを支持点アクチュエータがすべて受け持つことになる。また、足の裏の面積が狭ければアクチュエータ容量が十分でも ZMP をおさめることができないので転倒してしまう。上半身運動と併用することによってこれらの問題を解決できると思われるが、制御方策は複雑となる。

しかしながら、支持点関節のアクチュエータを重力効果を十分に考慮して効果的に用いれば、上半身のアクチュエータを必要とせずに転倒補償も可能と思われる。次節ではこの点に立脚して仮想倒立振子法の3次元への拡張を行う。

## 5.3 仮想倒立振子法の3次元への拡張

### 5.3.1 前額面における倒立振子の導入

前額面においても倒立振子モードに拘束することを考える。鉛直直立時を基準時刻として両平面における振子の転倒は次式で記述できる。

$$\left. \begin{aligned} \theta_s &= \frac{\omega_0}{\alpha} \sinh(\alpha t) \\ \theta_L &= \theta_{OL} \cosh(\alpha t) \end{aligned} \right\} \text{ただし } \alpha = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (5.8)$$

ここで、 $l$ は、振子の足の長さであり、添え字は各平面を表している。 $\omega_0$  および  $\theta_{0L}$  は運動を決定するパラメータである。

式(5.8)をもとに胴体運動を拘束した場合のイメージを図5.4に示す。

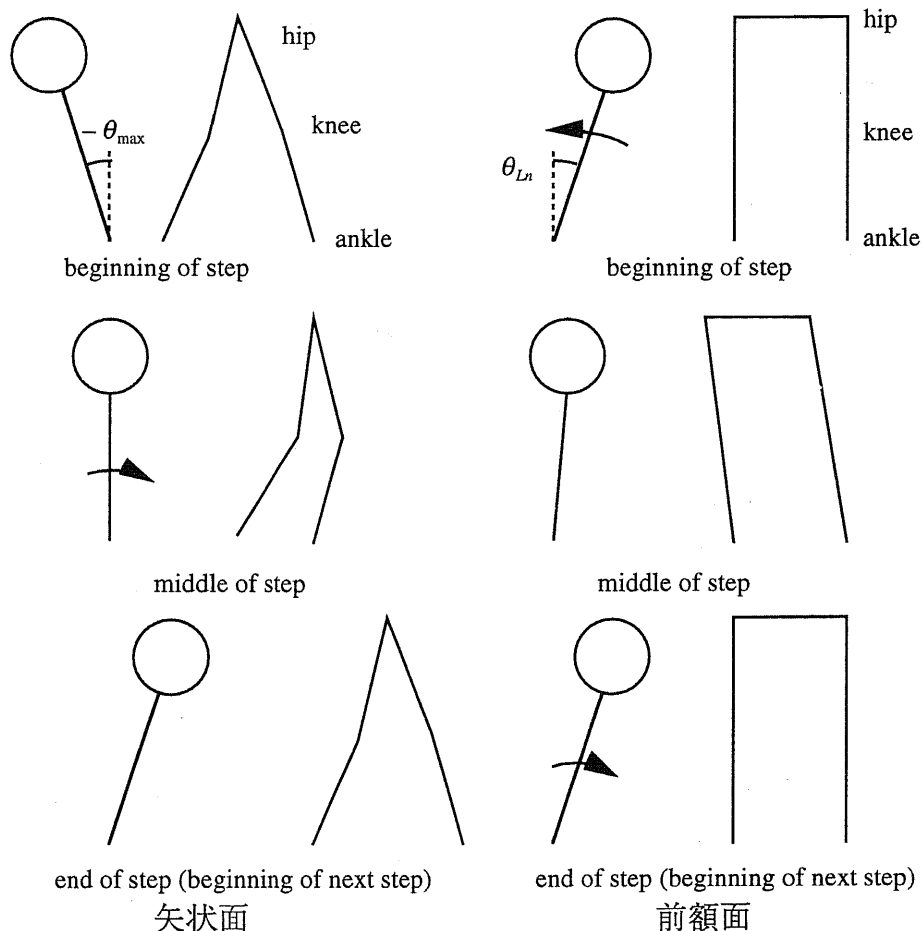


図 5.4: 仮想倒立振子と実機との対応

この場合、支持期、不支持期のタイミングにあわせて身体を左右に揺動させている。揺動させるモードについては重力により導かれるモードを採用すれば、アクチュエータトルクは少なくて済む。また足の裏の大きさも小さくて済む。

### 5.3.2 定常歩行時における矢状面・前額面運動の同期

式(5.8)はあくまでも鉛直時を基準とした振子モードを示しているだけで、支持脚交換を考慮して常に同期をとるためにはパラメータ間に制約が生じる。ここでは着地タイミングが両平面において同時であるという条件を用いることでこれを導く。着地時刻を  $t$ 、着地時の矢状面における倒れこみ角度  $\theta_{max}$ 、着地時の前額面における倒れこみ角度  $\theta_{Ln}$  を用いると次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \theta_{\max} &= \frac{\omega_0}{\alpha} \sinh(\alpha t) \\ \theta_{Lr} &= \theta_{0L} \cosh(\alpha t) \end{aligned} \right\} \quad (5.9)$$

双曲線関数の性質を利用することにより，以下の条件が導かれる。

$$\frac{\theta_{0L}}{\theta_{Lr}} = \frac{\omega_0}{\sqrt{\omega_0^2 + (\alpha \theta_{\max})^2}} \quad (5.10)$$

よって，着地を含めた運動の同期を考慮した仮想倒立振子運動は次式で与えることができる。

$$\left. \begin{aligned} \theta_s &= \frac{\omega_0}{\alpha} \sinh(\alpha t) \\ \theta_L &= \theta_{Lr} \frac{\omega_0}{\sqrt{\omega_0^2 + (\alpha \theta_{\max})^2}} \cosh(\alpha t) \end{aligned} \right\} \quad (5.11)$$

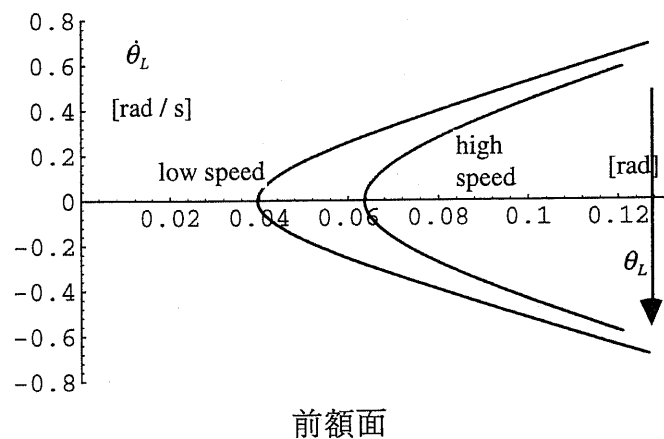
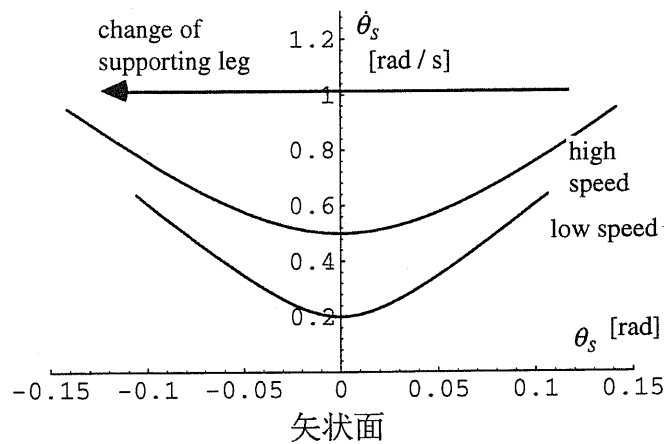


図 5.5: 運動の同期を考慮した倒立振子モードの位相軌跡

図 5.5 は式(5.11)により導かれる倒立振子モードの位相軌跡を描いたものである。

前額面運動についてみると、歩行速度が速い時は振幅が小さくなっている。これは速く歩く時は身体をあまり大きく左右に揺る必要が無いことを示している。また低速時には振幅が大きくなっており、これはゆっくり歩く時には大きく身体を左右に揺すってバランスをとらなければならないことを示している。以上の結果は我々人間の歩行と照らし合わせても妥当な結果である。

### 5.3.3 加減速時における矢状面・前額面運動の同期

次に両平面運動の同期を保った上で加減速を行うことを考える。図 5.6 は加速の手順、A→B→C, C'→D→E を示したものである。各々の点は両平面において時刻が一致していなければならない。

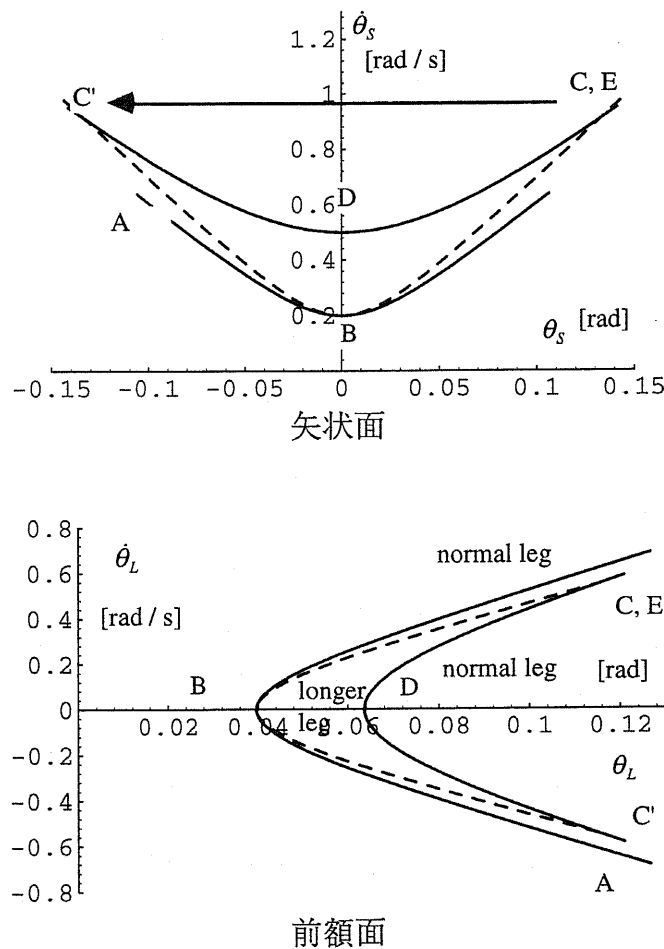


図 5.6: 加減速時の位相軌跡

各々の点における時刻の一致を考慮すれば、以下のような条件が導かれる。

$$\theta_{high} = \frac{\omega_{low}}{\alpha_{Sacc}} \sinh(\alpha_{Sacc} t_{acc}) = \frac{\omega_{high}}{\alpha_n} \sinh(\alpha_n t_{high}) \quad (5.12)$$

$$\begin{aligned}
 1 &= \frac{\omega_{low}}{\sqrt{\omega_{low}^2 + (\alpha_n \theta_{low})^2}} \cosh(\alpha_{Lacc} t_{acc}) \\
 &= \frac{\omega_{high}}{\sqrt{\omega_{high}^2 + (\alpha_n \theta_{high})^2}} \cosh(\alpha_n t_{high})
 \end{aligned} \tag{5.13}$$

$$\omega_{Shigh} = \omega_{low} \cosh(\alpha_{Lacc} t_{acc}) = \omega_{high} \cosh(\alpha_n t_{high}) \tag{5.14}$$

$$\begin{aligned}
 \omega_{Lhigh} &= \theta_{Ln} \frac{\alpha_{Lacc} \omega_{low}}{\sqrt{\omega_{low}^2 + (\alpha_n \theta_{low})^2}} \sinh(\alpha_{Lacc} t_{acc}) \\
 &= \theta_{Ln} \frac{\alpha_n \omega_{high}}{\sqrt{\omega_{high}^2 + (\alpha_n \theta_{high})^2}} \sinh(\alpha_n t_{high})
 \end{aligned} \tag{5.15}$$

双曲線関数の性質を利用すると、点線の軌跡を得るための振子パラメータ  $\alpha$  がそれぞれ以下のように求められる。

$$\alpha_{Sacc}^2 = \alpha_n^2 + \frac{\omega_{high}^2 - \omega_{low}^2}{\theta_{high}^2} \tag{5.16}$$

$$\alpha_{Lacc}^2 = \alpha_n^2 \frac{\omega_{low}^2 + (\alpha_n \theta_{low})^2}{\omega_{high}^2 + (\alpha_n \theta_{high})^2} \frac{\theta_{high}^2}{\theta_{low}^2} \tag{5.17}$$

式(5.16,17)により、矢状面については短足振子モデルへの拘束、前額面については長足振子モデルへの拘束によって、点線の軌跡が得られることがわかる。

さらに、同期条件を満たす場合、加速する場合は歩幅を若干伸ばし、減速する場合は歩幅を若干縮める必要があることも明らかになった。すなわち、足首から若干の前向きトルクを入力しながら、歩幅を若干伸ばしつつ加速し、足首から後ろ向きトルクを入力しながら歩幅を若干縮めつつ減速する「必要」がある。これは我々人間の歩行時の速度変更の場合と照らし合わせても妥当な結果である。

#### 歩幅パラメータの計算について

なお、 $\theta_{high}$  については解析的に求めるのは困難であるため、以下のような方法で近似値を得ることを提案する。

$$\sinh(\alpha_{Sacc} t_{acc}) = \frac{\theta_{high}}{\omega_{low}} \sqrt{\alpha_n^2 + \frac{\omega_{high}^2 - \omega_{low}^2}{\theta_{high}^2}} \equiv A \tag{5.18}$$

$$\sinh(\alpha_{Lacc} t_{acc}) = \frac{\alpha_n \theta_{low}}{\omega_{low}} \equiv B. \tag{5.19}$$

ここで、以下の近似を利用する。

$$\sinh(x) \doteq \frac{e^x}{2}. \quad (5.20)$$

式(5.20)の近似を利用して着地時刻を求める。

$$t_A = \frac{1}{\alpha_{Sacc}} \log(2A) \quad (5.21)$$

$$t_B = \frac{1}{\alpha_{Lacc}} \log(2B). \quad (5.22)$$

$\theta_{high}$  が真値に近づけば  $t_A$ ,  $t_B$  と同じ値に近づくことが期待できるので、

$$\theta_{high} \rightarrow \frac{t_B}{t_A} \theta_{high}. \quad (5.23)$$

によって  $\theta_{high}$  を更新する。A, B を求めて  $\theta_{high}$  を更新するまでの手順を十分な回数繰り返せば良い。実際に DSP に実装した場合、歩行速度パラメータの選び方にも依存するが5回程度の更新で誤差が数パーセント以内に納まるケースがほとんどであった。

## 5.4 シミュレーション

### 5.4.1 ZMP安定規範による歩行安定性解析

前節において前額面運動についても倒立振子モードへの拘束を提案したが、それが前額面運動の安定性を満たすかの検証を計算機シミュレーションでおこなう。前額面での質量モデルは図5.7で与えるものとした。関節軌道の選び方については自由度が残されているが、ベースケースとして式(5.24)を選択した。

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= \theta_{Ln} \frac{\omega_0}{\sqrt{\omega_0^2 + (\alpha \theta_{max})^2}} \cosh(\alpha t) - \theta_{Ln} \\ q_2 &= \frac{\pi}{2} - q_1 \quad q_3 = \frac{\pi}{2} + q_1 \end{aligned} \right\} \quad (5.24)$$

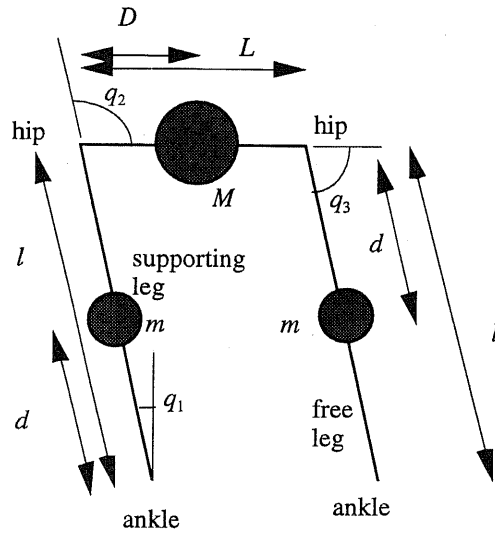


図 5.7: 前額面の質量モデル

表 5.2: モデル中のパラメータ

$m$	4 kg	$M$	6 kg
$l$	0.3 m	$L$	0.2 m
$d$	0.15 m	$D$	0.1 m

また、簡単のため各関節の位置制御は理想的であると仮定して、ZMP を算出している。一歩の間にZMPがどのような推移をするかを図 5.8 に示す。

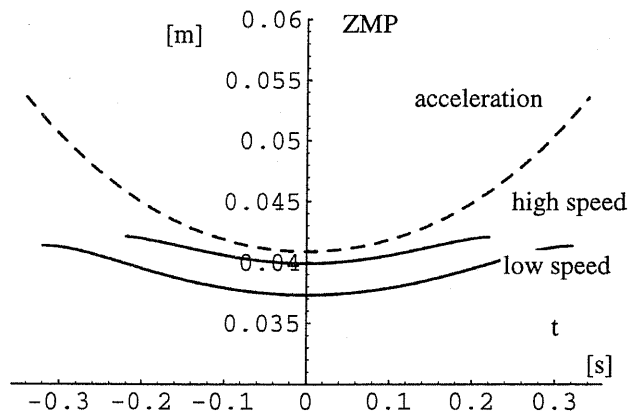
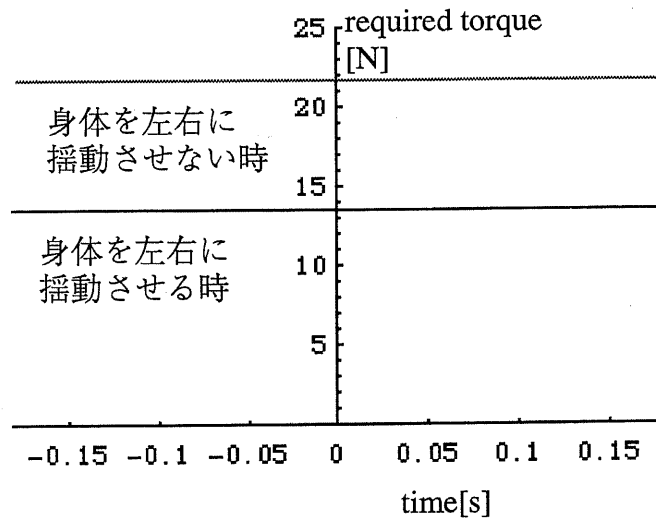


図 5.8:: ZMP軌跡

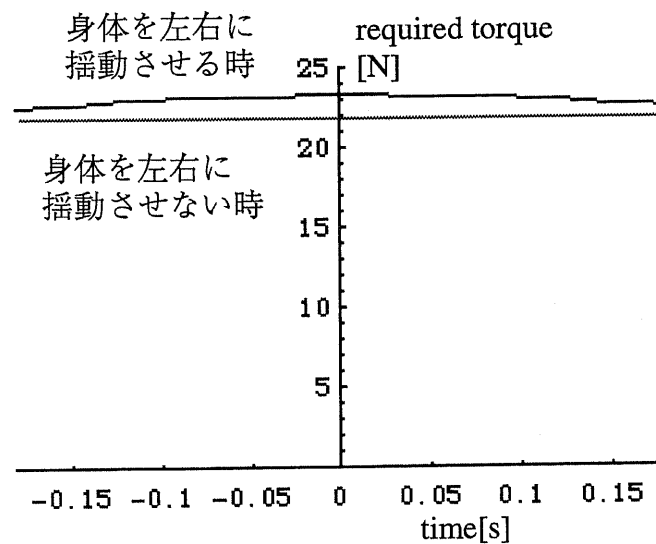
図 5.8 において、定常歩行の場合は ZMP が支持点内側 4 cm 程度のところを通ることがわかる。また加速時においては倒れこみを能動的に遅らせる必要があるため ZMP はさらに内側を通ることがわかる。試作 2 号機”Ostrichi-II”は足の裏は内側には 6 cm の長さがあり、定常歩行、および急激でない加減速ならば安定性が破壊されないことが確認できる。

5.4.2 ハードウェアに関する制約と実現可能性

図 5.9 は、前出の ZMP 解析を行った際の各関節トルクの推移を示している。足首トルクについてみると重力にあわせて身体を左右に揺動させるため、身体をまったく揺動させない場合と比べて必要トルクは減少している。股関節トルクについてみると身体を左右に揺動させることにより若干のトルク増大を招いているが、揺動させないケースと比較してわずかの増加である。



足首関節



股関節

図 5.9: 関節トルクの推移

以上により、ハードウェアに関する制約と軌道の選び方についての知識をまとめることができる。



- ・足首アクチュエータは必ずしも大容量を必要としない
- ・股関節アクチュエータについては大容量を必要とするが、関節軌道を工夫すれば動作速度を要求されないので高減速比を採用できる
- ・矢状面関節アクチュエータと比較して前額面関節アクチュエータは数倍程度のトルク容量が必要となる

## 第6章

## Ostrich-II の開発

## 6.1 システム構成

## 6.1.1 ハードウェア

図6.1に、筆者が製作した試作2号機”Ostrich-II”を示す。”Ostrich-II”の仕様を表6.1に載せる。前額面に4つの自由度を持ち、アクチュエータによって駆動される。矢状面は”Ostrich-I”と同様の構成で6自由度である。減速ギアの材質をエンジニアリングプラスチックに置き換えることにより軽量化を計っている。

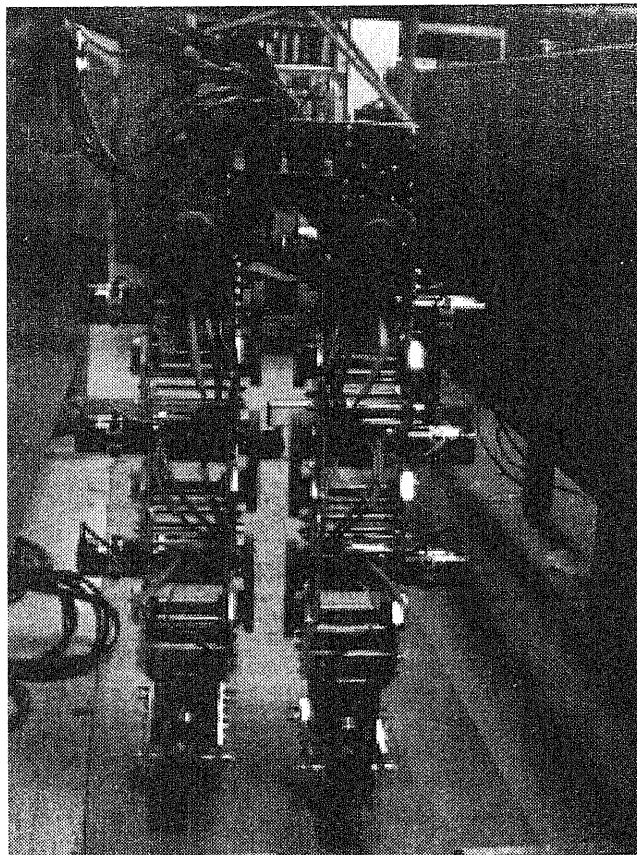


図 6.1: Ostrich-II

表 6.1: ロボットの仕様

## 材質

構造材	6mm厚ジュラルミン
	8φジュラルミン棒
フランジ	10mm厚ジュラルミン
関節軸, 胴体部シャフト	鉄棒(S45C)

## アクチュエータ(RH-14)仕様

定格出力 (出力軸換算)	18.5W
モータ定格出力	30W
定格電流	1.8A
定格トルク (出力軸)	5.9Nm
定格回転数 (出力軸)	30rpm
トルク定数 (出力軸換算)	5.76Nm/A
慣性モーメント (出力軸換算)	0.081kg/m <sup>2</sup>
電機子抵抗	2.7Ω
電機子インダクタンス	1.1mH
減速比	100
エンコーダ分解能	1000P/rev.

## 重量

構造材	6.1kg
アクチュエータ	0.8kg×10
ギア	0.02kg×24
全重量	16kg

## 減速比

矢状面	1:100
前額面	3:1100

## 脚長

矢状面	0.26 m
前額面	0.45 m

図 6.2 に製作したコントローラの構成を示す。構成は 1 号機の時と同じであるが、自由度の増加にあわせて各種 I/O のチャンネル数を増やしている。

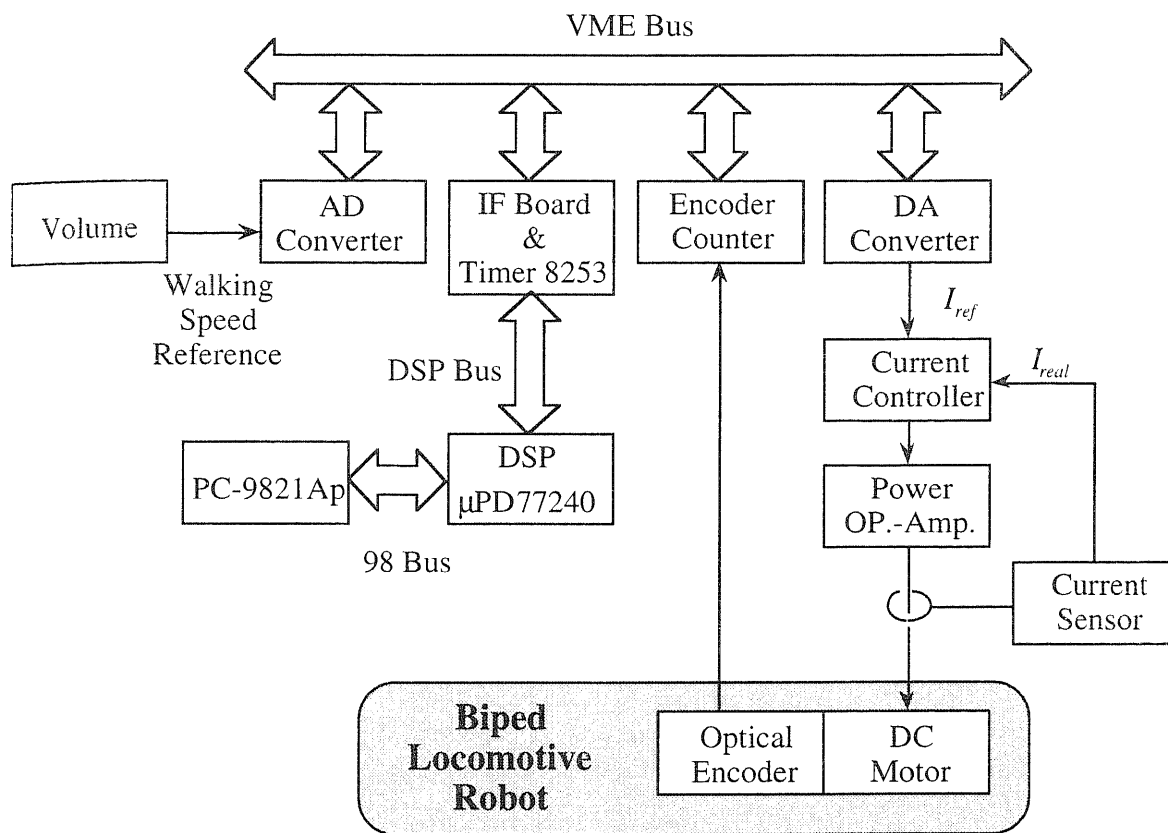


図 6.2: コントローラ構成

### 6.1.2 ソフトウェア

図6.3はソフトウェア構成を示している。各々の役割は以下のようにになっている。

#### ・Parameter Tuner

外部から送られてくる歩行速度指令，および現在の状態，着地情報などから振子モデルのパラメータを適切に調整する。

#### ・Inverted Pendulum Model

矢状面，前額面の倒立振子のモデル。Parameter Tuner によって同期条件が保証されているため各々は独立に計算してよい。

#### ・Touchdown Checker

実機の倒れこみ角等を監視し，着地などの節目節目にフェーズ更新の合図をParameter Tuner に送る。また暴走監視なども行う。

#### ・Trajectory Generator

振子モデルの状態を参考に各関節軸の軌道パターンを生成する。

#### ・Local Position Control System

各関節の軌道パターン追従を行う。プレフィルタ+外乱オブザーバによるロバストな位置制御を利用している。

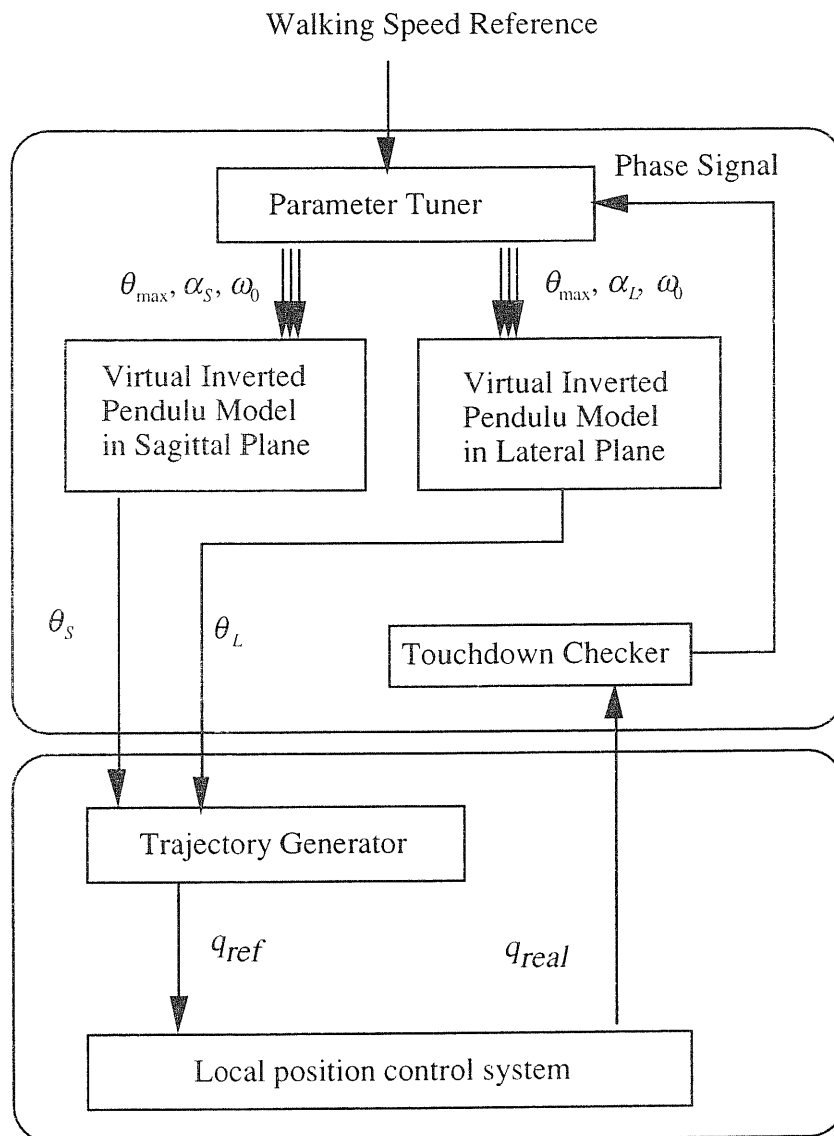


図 6.3: ソフトウェア構成

## 6.2 Ostrich-II による歩行実験

### 6.2.1 定常歩行と安定歩行領域

歩行開始時からの歩行速度をパラメータとして、実験中はこれを固定することに

よって定常歩行が実現される。図6.4はある歩行速度，歩行周期を設定した際に歩行が安定に実現できたかを示すものである。第5章で述べたように，矢状面と前額面の運動の同期を考慮すると歩行速度と歩行周期，歩幅の間には相関関係が生じる。図6.4中では，低速歩行時ほど歩行周期が長い，これは身体をゆったりと左右に揺動させているぶんだけ時間がかかることを示している。高速歩行ならば身体を左右に揺動させる幅は小さくて良い。このため歩行周期は速くなる。結果，右下がりの曲線を描く。なお，この相関関係は解析的には解けないため，数値計算したものを動作点として選択している。

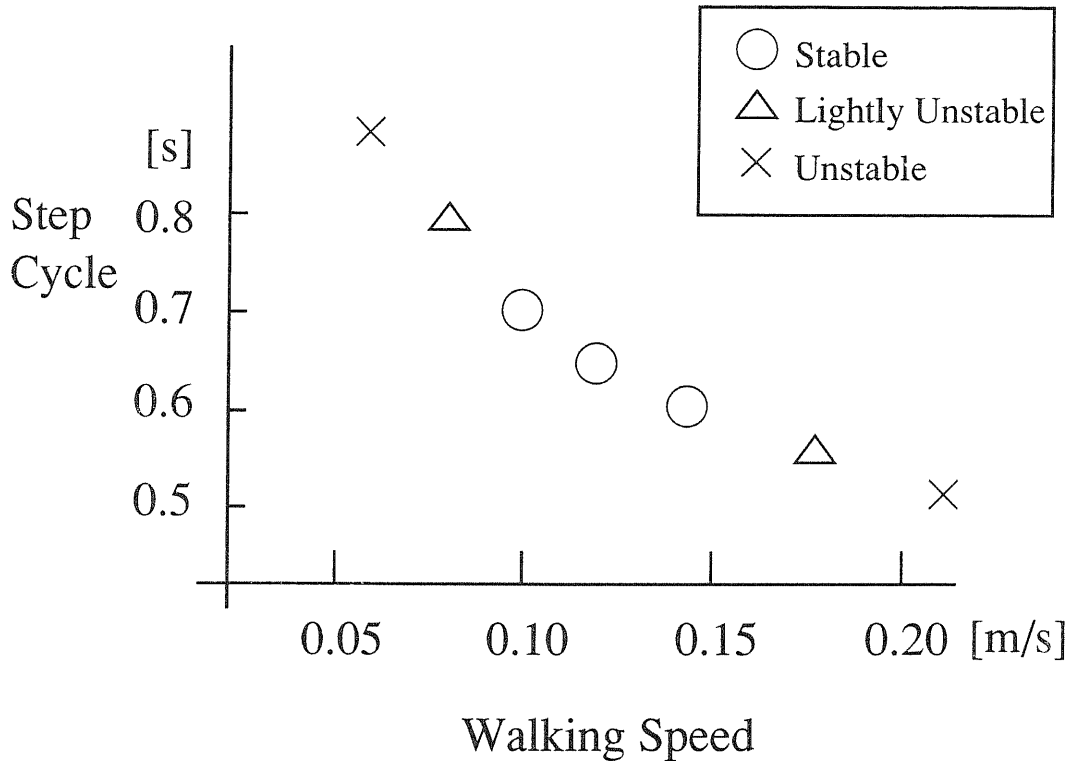


図 6.4: 安定歩行実現領域

0.05 m/s 程度の低速領域では，前額面運動において遊脚を長い間持ち上げることが不可能となり，着地時刻以前に着地してしまい，安定性をそこなう。これは Ostrich-II の構造から決定される倒れこみ時定数よりも歩行周期が長すぎるので，各関節への負荷が大きくなりすぎ，関節剛性が降伏することに起因する。

0.22 m/s 程度の高速領域においては遊脚関節のアクチュエータ動作速度の制約に抵触し，要求動作速度が実現可能速度を越えてしまうため不安定となる。

図 6.5-7 に 0.08 m/s での定常歩行の様子を載せる。身体を左右に大きく揺動させている。図 6.8-10 に 0.14 m/s での定常歩行の様子を載せる。身体を左右に揺動させる幅は若干小さくなり，速く小刻みに揺らしている。

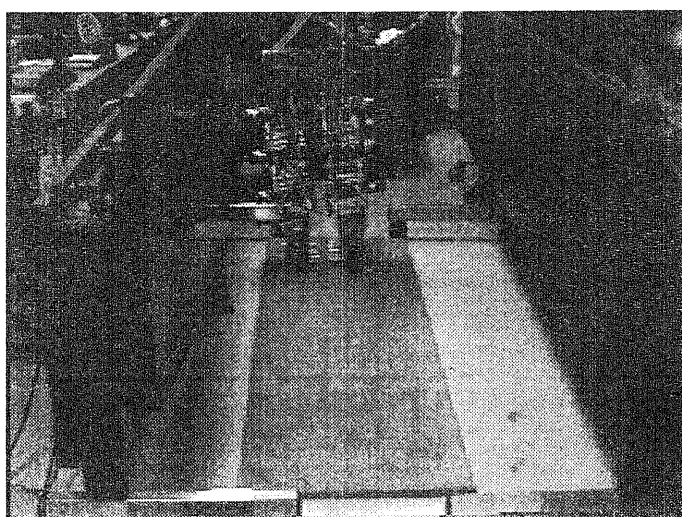
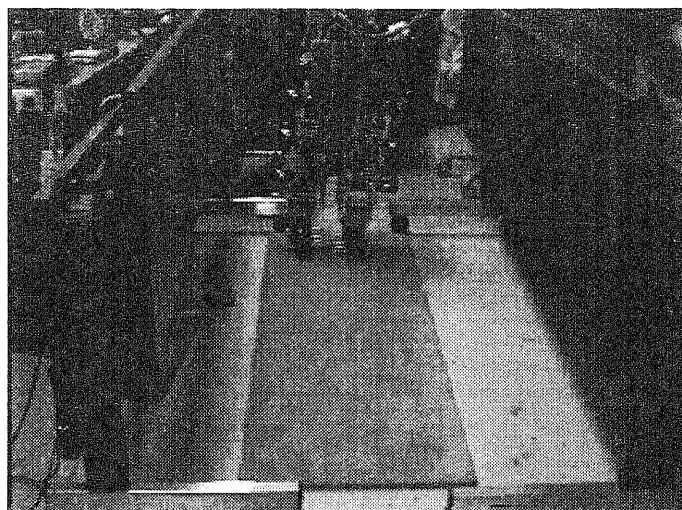


図 6.5: 歩行実験の様子A-1 (0.5 s 間隔)  
(歩行速度 0.08m/s, 周期 0.8s)

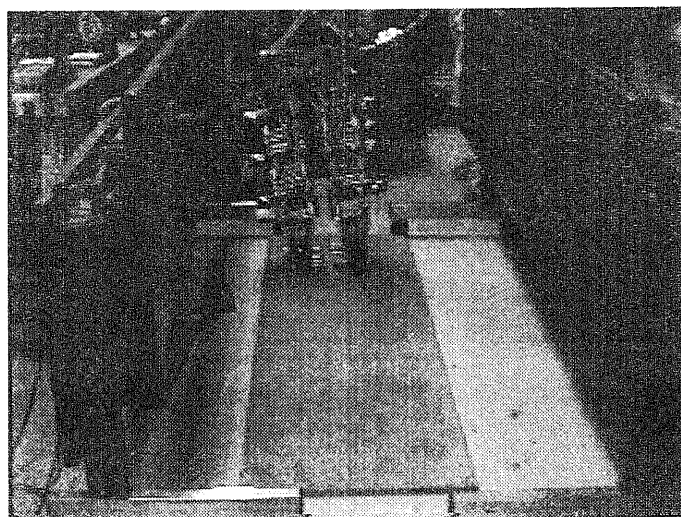
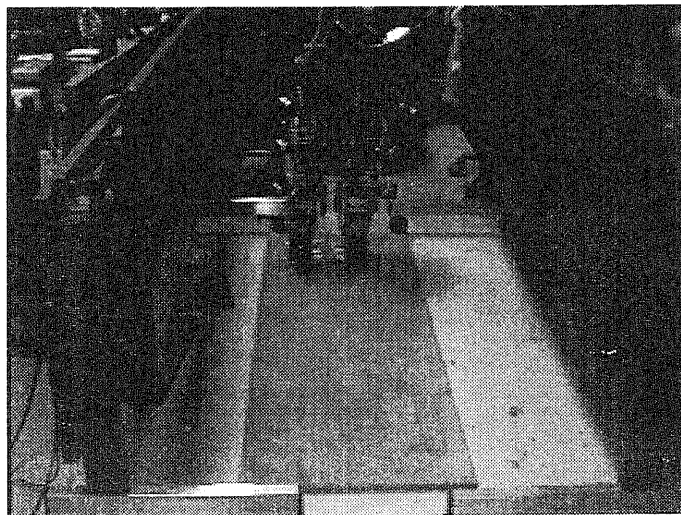
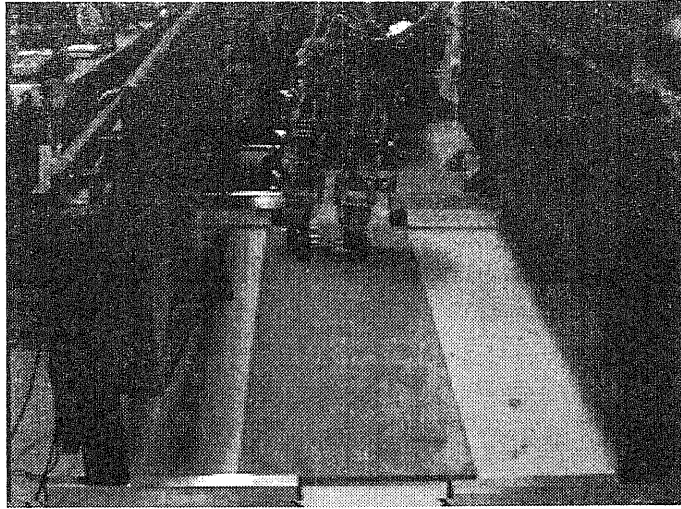


図 6.6: 歩行実験の様子A-2 (0.5 s 間隔)

(歩行速度 0.08m/s, 周期 0.8s)



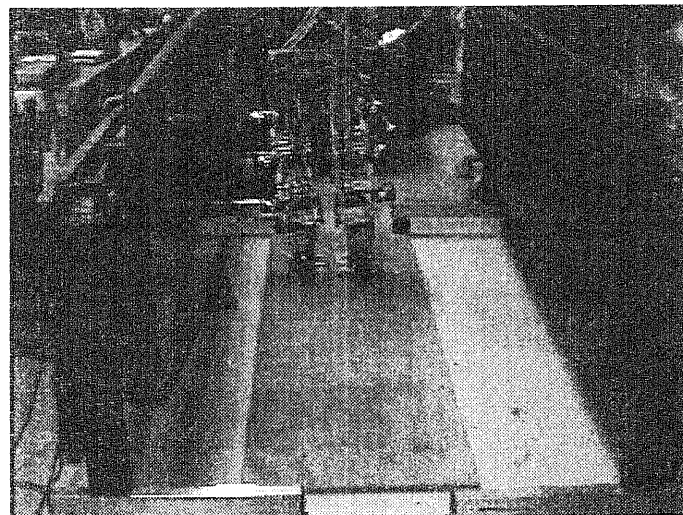
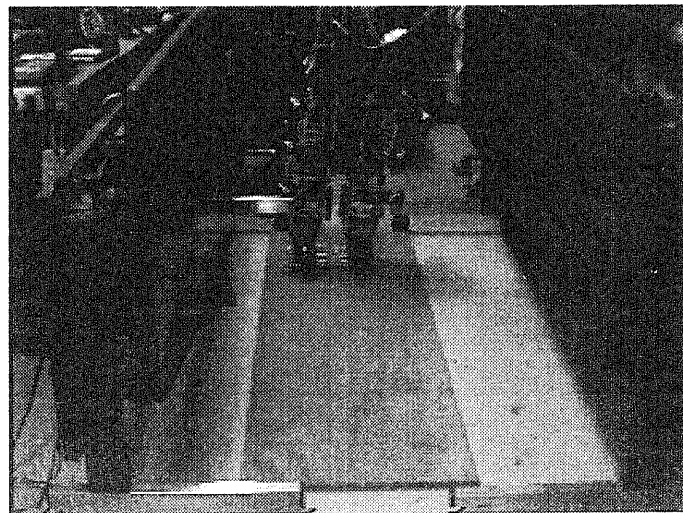
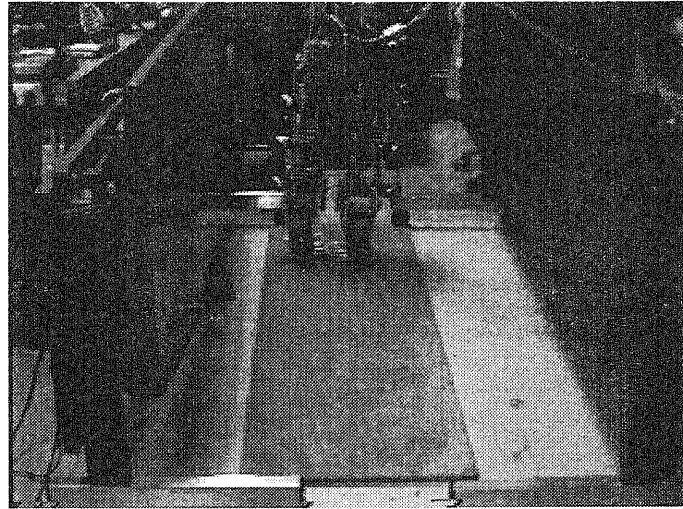


図 6.7: 歩行実験の様子A-3 (0.5 s 間隔)

(歩行速度 0.08m/s, 周期 0.8s)

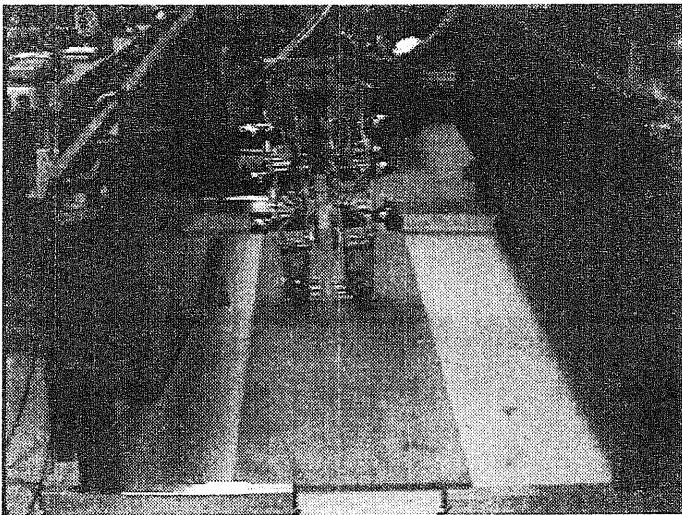
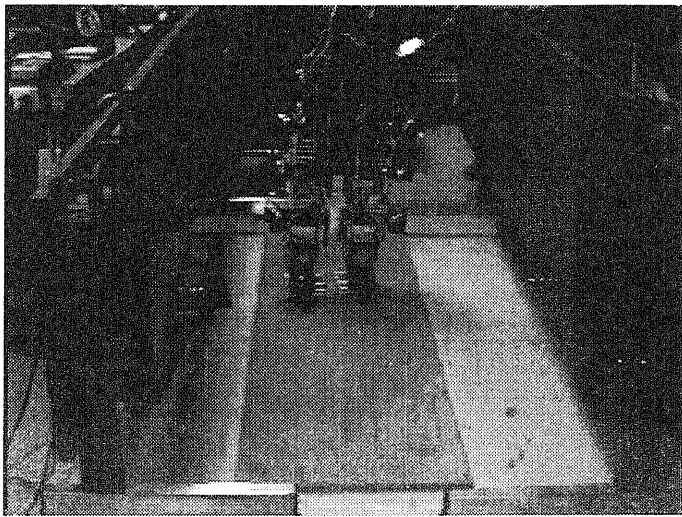
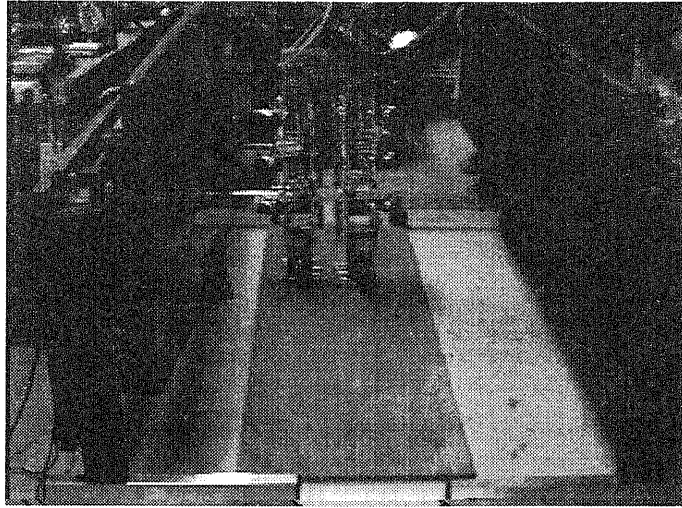


図 6.8: 歩行実験の様子B-1 (0.5 s 間隔)

(歩行速度 0.14m/s, 周期 0.6s)

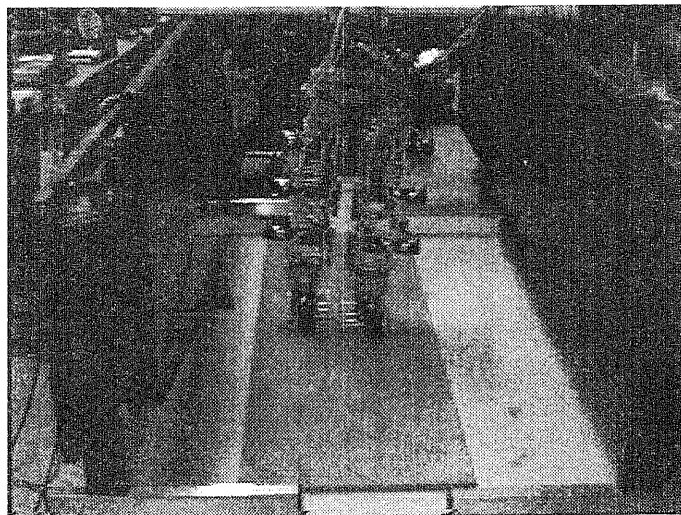
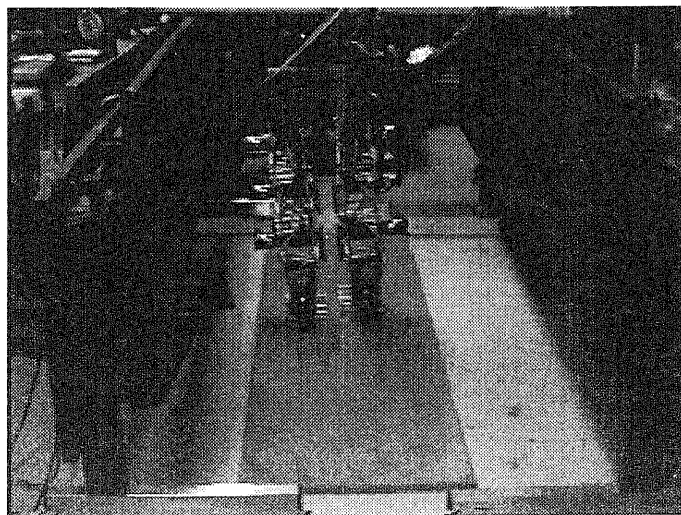
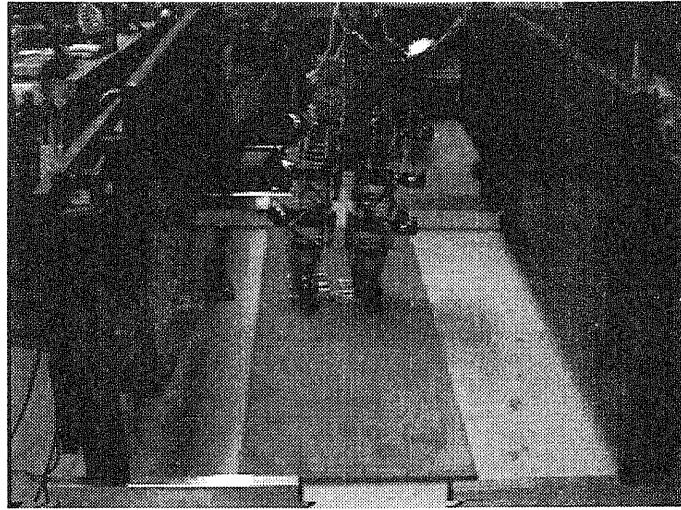


図 6.9: 歩行実験の様子B-2 (0.5 s 間隔)

(歩行速度 0.14m/s, 周期 0.6s)

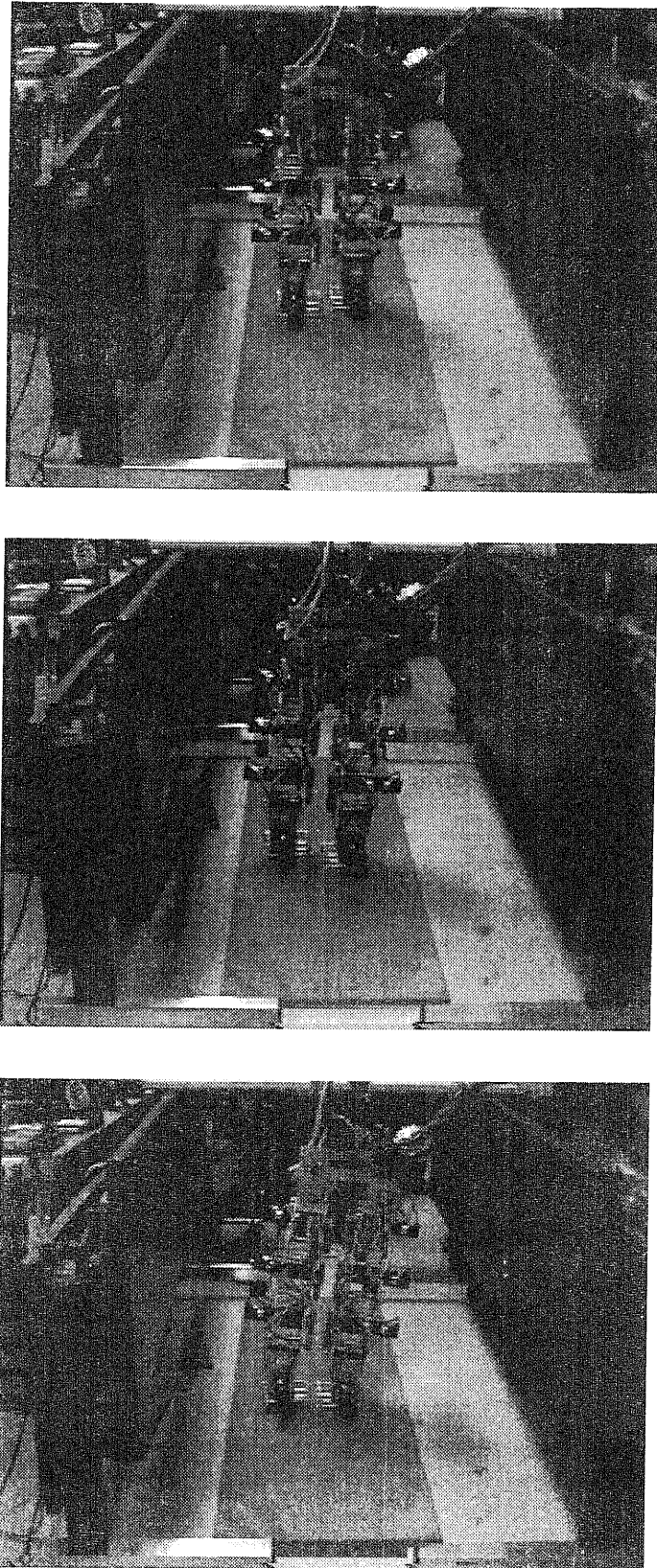


図 6.10: 歩行実験の様子B-3 (0.5 s 間隔)  
(歩行速度 0.14m/s, 周期 0.6s)

## 6.2.2 実時間可変速歩行の実現

歩行実験中の任意の時点で歩行速度指令となる可変抵抗スイッチの値を変更することによって実時間可変速歩行を実現した。図 6.11は各平面の振子モデルの出力  $\theta_s, \theta_L$  を観測したものである。前半は低速歩行状態で、歩行速度指令は約0.08m/sである。この時の歩行パラメータは歩幅 0.06m, 周期 0.8 s である。ここで、 $t=6$  s 付近で可変抵抗を手動で調節し、歩行速度指令を約 0.14 m/s に上げる。これに対しロボットは実時間応答を示し、高速歩行へと移行する。この時の歩行パラメータは歩幅 0.08 m, 周期 0.6 s である。高速歩行に移行すると前額面運動の振幅が若干小さくなり、矢状面運動の振幅は若干増えている。これは身体を左右に揺する幅が小さくなり、若干歩幅が伸びることを示している。

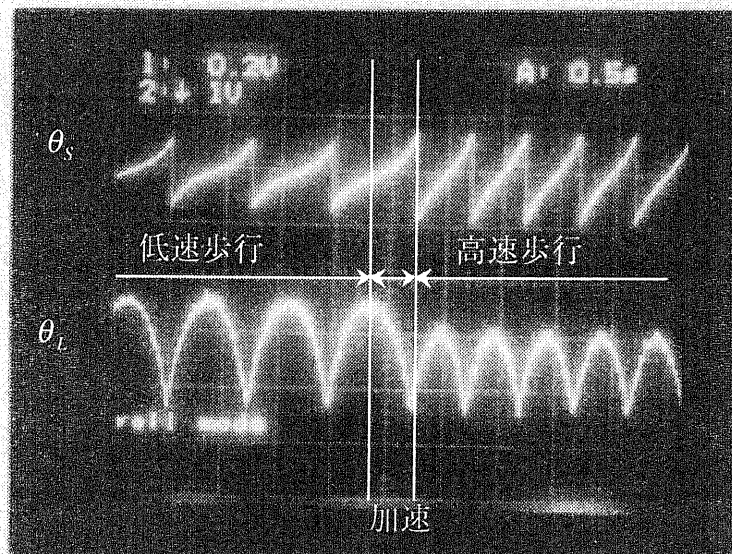
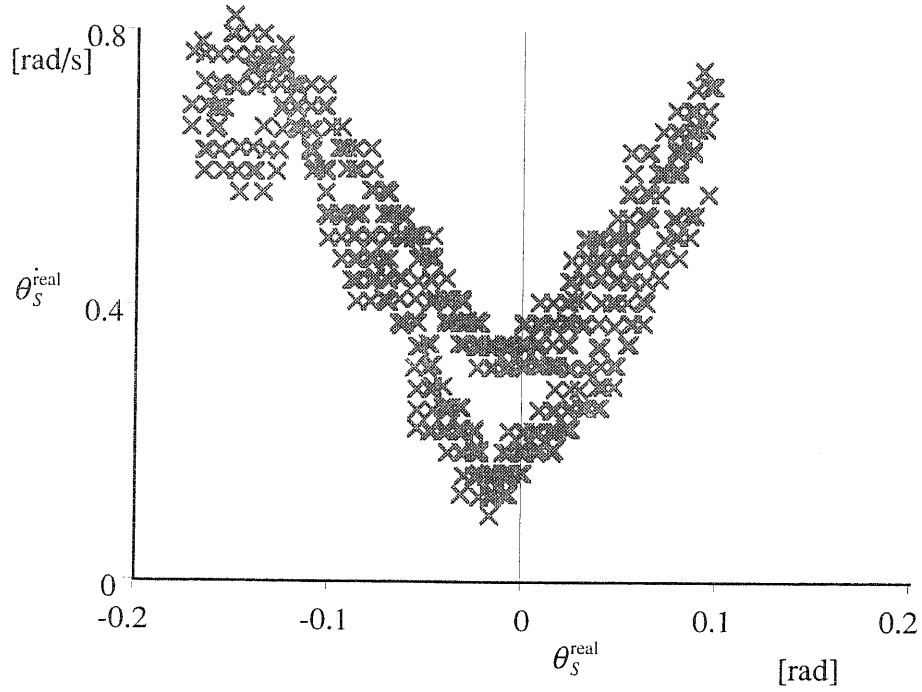


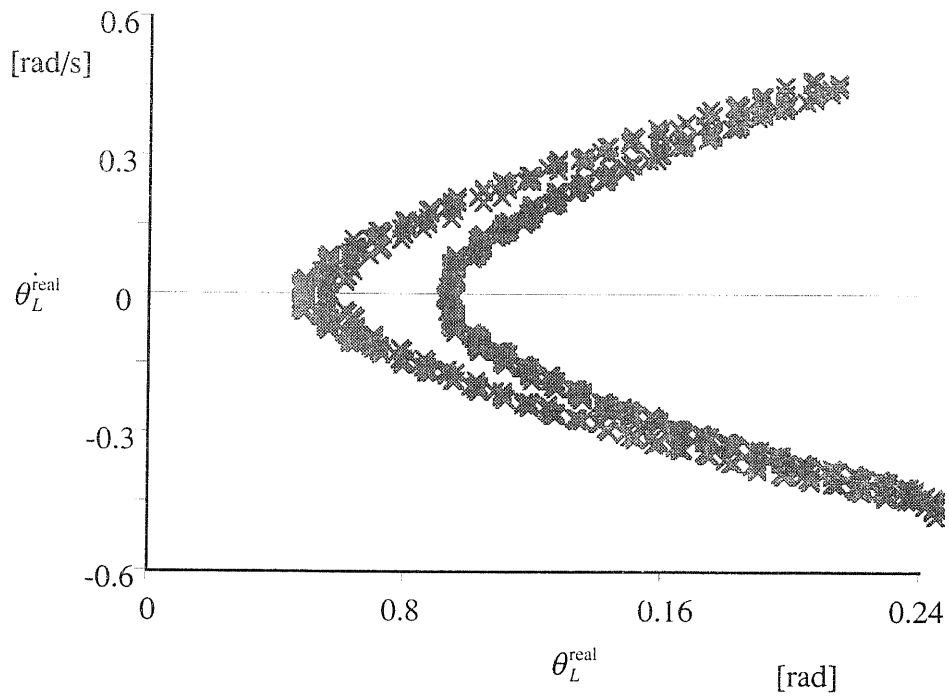
図 6.11: 倒立振子モデル出力の時間変化

図6.12は各平面の位相軌跡を実測したものである。測定に関しては支持脚足首関節角度の観測と、足首から重心位置の幾何関係より計算によって求めている。位置制御応答時間から生じる若干の遅れにより、着地前後での測定に若干の誤差を生じ、理想的な懸垂曲線から外れる点もみられるが、歩行速度に応じた滑らかな軌跡を二本描いていることがわかる。図 6.13-15には実時間可変速歩行実験時の連続写真(0.33s間隔)を載せる。

本小節で示したように、操作者からの歩行速度指令に実時間で応答し、歩行速度を変更しながら直線歩行を実現する二足歩行システムの開発に成功した。



(a) Sagittal Plane



(b) Lateral Plane

図 6.12: 加減速歩行時の位相軌跡 (10 ms 間隔)

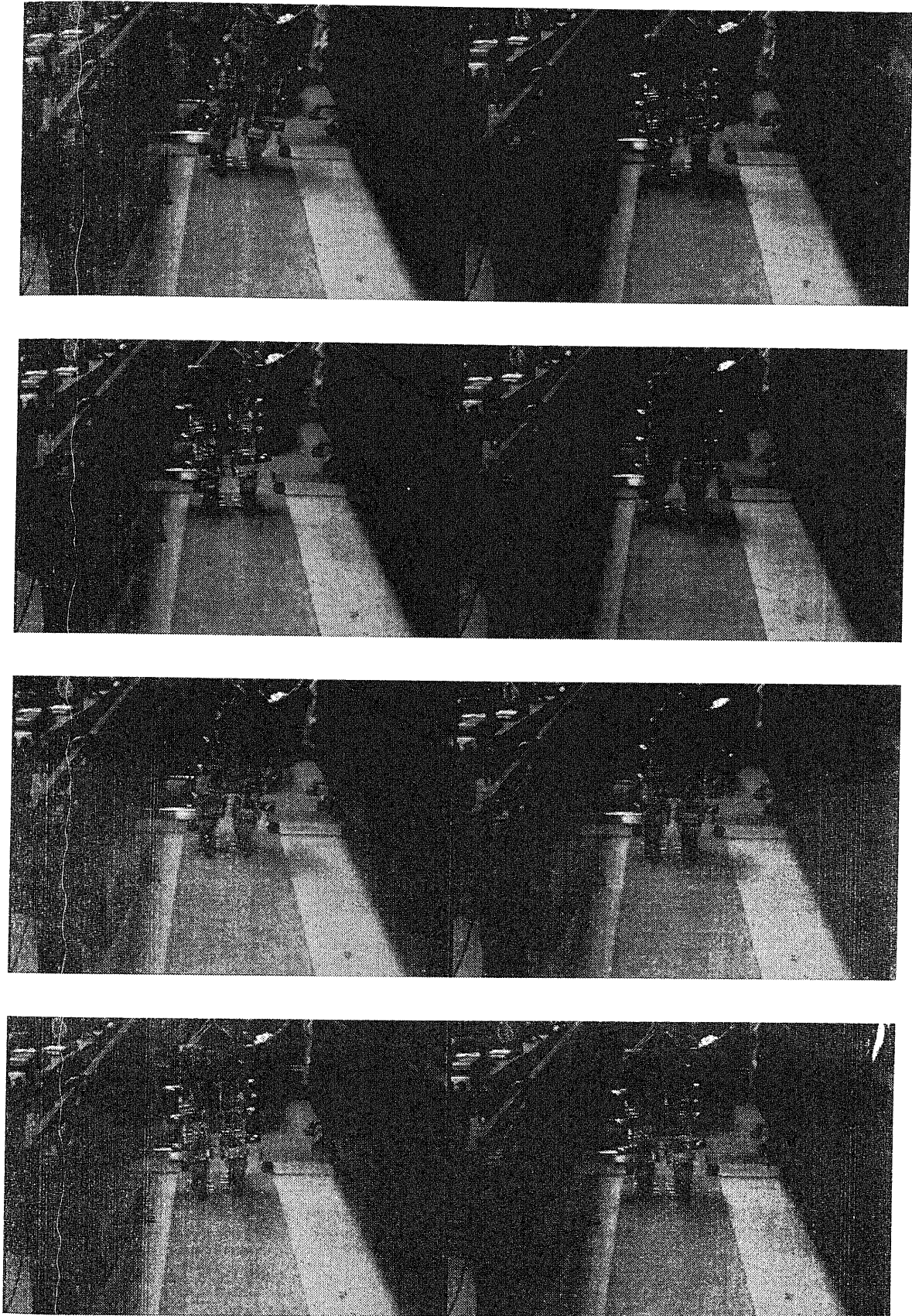


図 6.13: 実時間可変速歩行実験-1 (0.08 m/s → 0.14 m/s)

(0.33 s 間隔で撮影)

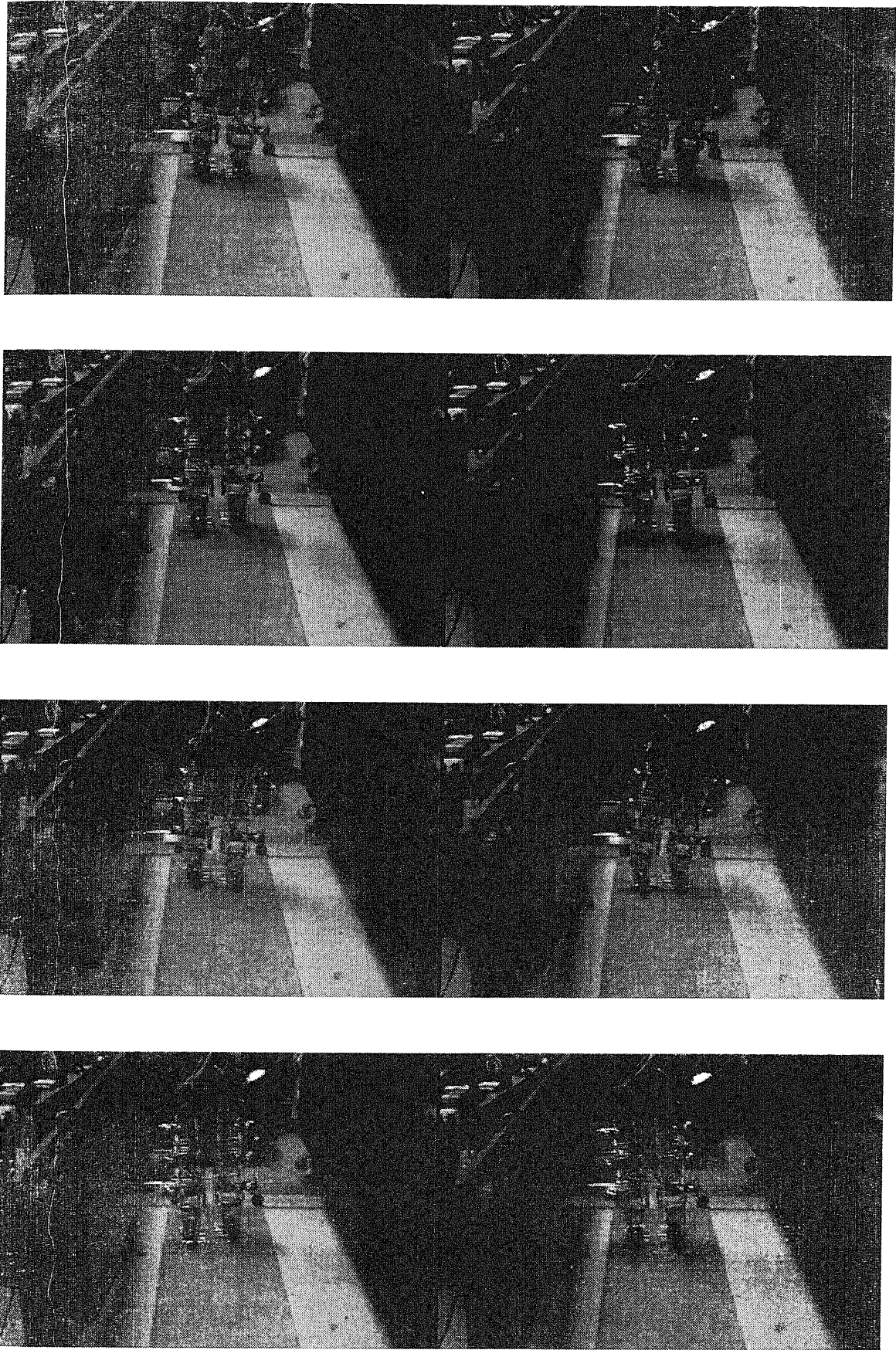


図 6.14: 実時間可変速歩行実験-2 (0.08 m/s → 0.14 m/s)

(0.33 s 間隔で撮影)



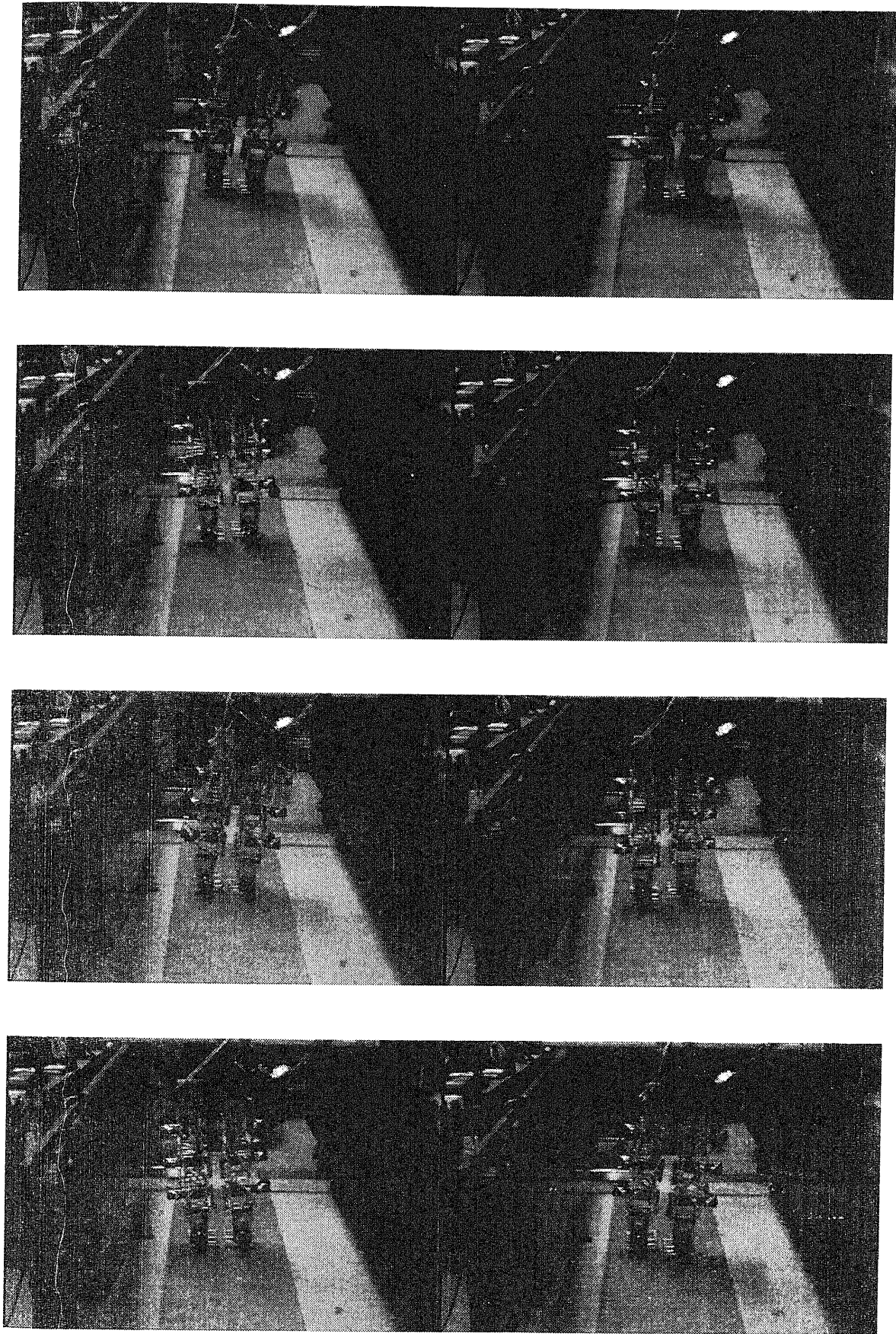


図 6.15: 実時間可変速歩行実験-3 (0.08 m/s → 0.14 m/s)

(0.33 s 間隔で撮影)

## 6.2.3 歩行パラメータ推移に関する考察

第5章では、矢状面と前額面の運動の同期を考慮した結果、より速く歩く場合には歩幅を伸ばし、よりゆっくり歩く場合には歩幅を縮める必要があることを指摘した。そして、本節の実験結果で示してきたとおり、実機実験においても歩幅を調節しながら歩行速度の変更がなされたことを確認した。歩行速度に応じて歩幅を調整することは我々人間の歩行と照らし合わせても妥当であるが、本小節では実験結果がどの程度妥当であるかを検証する。

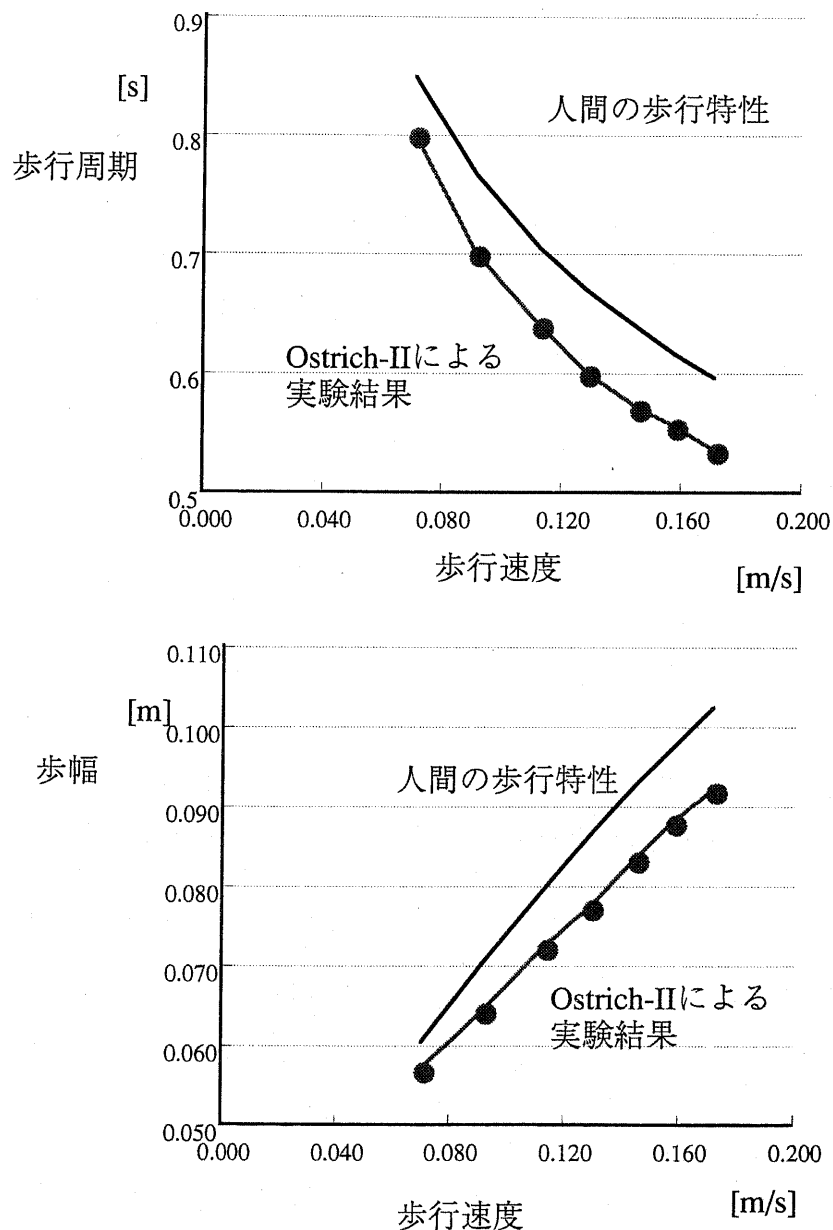


図 6.16: 人間の歩行特性とOstrich-IIによる実験結果の比較  
(人間の歩行特性は足の長さをOstrich-IIと等しく調整している)

図6.16は人間の歩行特性と実機実験を対比したものである。人間の歩行特性は第2章で触れた人間の歩幅の傾向を調査した経験則[37]をもとにしている。

$$S/L = 1.5 (v^2 / gL)^{0.3} \quad (6.1)$$

ここで $S$ は歩幅、 $L$ は足の長さ、 $v$ は歩行速度、 $g$ は重力加速度である。式(6.1)より、歩幅、歩行周期 $T$ は以下のように得られる。

$$S = 1.5 L (v^2 / gL)^{0.3} \quad (6.2)$$

$$T = \frac{S}{v} = \frac{1.5 L}{v^{0.4} (gL)^{0.3}} \quad (6.3)$$

式(6.2),(6.3)を描いたものが、図6.16における人間の歩行特性である。ただし、足の長さについては Ostrich-IIと同じとなるように $L=0.26$  mを与えてある。

実験結果は、Ostrich-IIが安定に加減速を行うことが可能であった場合の各々の歩行速度での歩行パラメータをプロットしたものである。安定な可変速歩行を行うためにはプロットを結ぶ曲線をたどらなければならないことを示している。

歩行周期、歩幅とも、実験によって得られたパラメータ推移の特性は人間の特性の傾向と非常に似ている。すなわち、第5章で提案した仮想倒立振り子の拡張に基づく同期条件は、人間の歩行に関する経験則と非常に合致していることがわかる。人間の歩行に関しては陽に身体を左右に揺動させていないため、振りモードの同期条件が主要因とは考えにくい、人間の歩行特性を説明する一つの可能性として興味深い結果と思われる。

なお、同一歩行速度で比較すると人間の歩行特性の方が歩幅、歩行周期とも大きい。これは人間はOstrich-IIよりも関節稼働範囲を大きくとっていることを示している。Ostrich-IIが関節稼働範囲を大きくとれない理由は主としてハードウェアの制約によるものである。

- ・歩行周期が長い場合、Ostrich-IIは前額面支持脚アクチュエータの負担が大きくなる。しかしながら、人間は足首トルクに頼るのではなく、上半身でバランスをとっている。
- ・遊脚膝関節は股・足首関節などと比較して2倍近い稼働性能を要求される。よって、Ostrich-IIが大股で歩く場合、足首や股関節が稼働可能範囲内であっても、遊脚膝関節が稼働可能領域を越えたり、稼働速度限界に抵触したりしやすい。

前額面アクチュエータの負担については、減速比と稼働速度とのトレードオフも考慮しなければならない。また、高出力・高速度が両立できたとしても、足の裏の面積次第ではそれを有効に利用できない。上半身の付加を考えることが抜本的な解

決策と思われる。

膝関節の問題に対しては、人間は非常に面白い解決策をとっている。支持脚相ではOstrich-IIは位置サーボ剛性によって体重を支えている。これに対し人間は膝関節をほぼロックする形でエネルギーを使わずに体重を支えている。遊脚相についてみると、Ostrich-IIは高減速比があだとなって高速応答が得にくいのにに対して、人間はそのような問題がない。すなわち、支持脚相、遊脚相で膝関節をロックしたりフリーにしたりすることで、高出力・高速度のトレードオフから逃げるのが可能であろう。このアイデアをロボットに活用しようとする研究が進められており[14],[15]、今後の参考としたい。

#### 6.2.4 鳥型・人間型歩行の比較

ここでは実機において鳥型歩行・人間型歩行を実際にも実現し、歩行距離などに有意な差が生じるかを検証する。

表 6.2: 鳥型・人間型歩行比較実験時のパラメータ

	鳥型	人間型
歩行速度	0.10 m/s	0.10 m/s
歩幅	0.07 m	0.07 m
歩行周期	0.7 s	0.7 s
パラメータ $\beta$	2.0	-2.0

表6.2に示すように遊脚膝の曲げ方のパラメータ  $\beta$  以外の歩行パラメータを同一として、鳥型・人間型歩行の比較を行った。その結果、以下のような差異が生じた。

- A. 人間型の方が若干前に進みにくい
- B. Aに関連して、人間型の方が進行方向が正面からずれやすい

これらのことを検証するため、表6.2のパラメータの下で10歩定常歩行を行わせ、直線距離でどれだけ進んだかの比較を行った。各々の歩行形態での平均値と標準偏差を図6.17、表6.3に示す。

表 6.3: 鳥型・人間型歩行での歩行距離（試行回数10）

	鳥型	人間型
平均距離	0.602 m	0.561 m
標準偏差	0.037 m	0.047 m

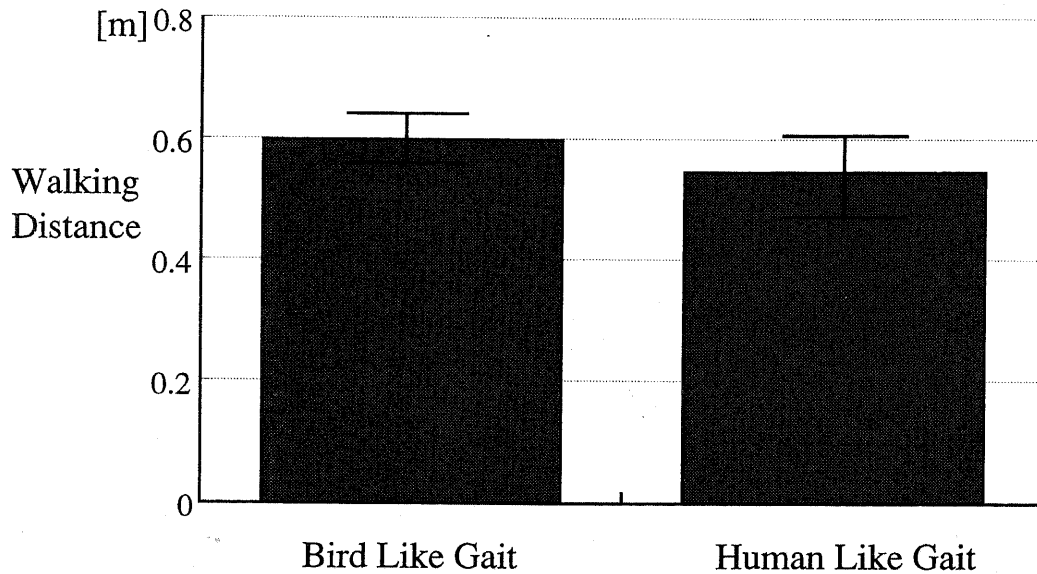


図 6.17: 鳥型・人間型歩行による歩行距離の比較

図 6.17 に示すように鳥型歩行の方が平均 0.041 m 程歩行距離が長かった。見た目では、人間型の場合着地時に若干爪先がひっかかるような印象を受ける。そこで左足首関節について関節応答とモータ電流を観測した。結果を図 6.18 に示す。

図 6.18 において、支持脚相の関節応答は鳥型、人間型とも同様に振子モードにしたがって後ろから前に身体を傾けるという動きを示している（図中 A）。A から B に切り替わる時点が離脱を示しており、B から A に切り替わる時点は着地を示している。遊脚相におけるふるまいは両者でかなり異なる。鳥型の場合は足首を伸ばした（開いた）状態で遊脚相の大半を過ごしている。人間型の場合は足首を縮めた（閉じた）状態で遊脚相の大半を過ごしている。

人間型歩行においては着地直後に瞬時的に大きな電流が流れている。これは着地直後に前向きトルクを発生させる必要があることを示しており、着地衝撃に伴う角運動量損失を補償していることを表している。裏返せば着地直前の角運動量が不足していることの証明であり、第 3 章 4 節における計算機シミュレーションでの比較結果を裏付けている。なお、瞬時的に前向きトルクを発生させようとすることは、着地直後に爪先を沈みこませようとしていることを示している。このため人間型の場合に爪先がひっかかる印象を受けるものと思われる。また、爪先が若干ひっかかることにより歩行距離の低下、直進安定性の破壊などが生じる。よって、歩行距離が鳥型より減少するものと思われる。

鳥型歩行においては着地直後の電流が小さい。これは足首トルクによって角運動量不足を補償する必要が無いことを示しており、第 3 章 4 節における計算機シミュレーションでの比較結果を裏付けている。鳥型の場合は離脱直後に後ろ向きに大きな電流が流れているが、遊脚相のため歩行持続性に直接の影響を及ぼしてはいない。支

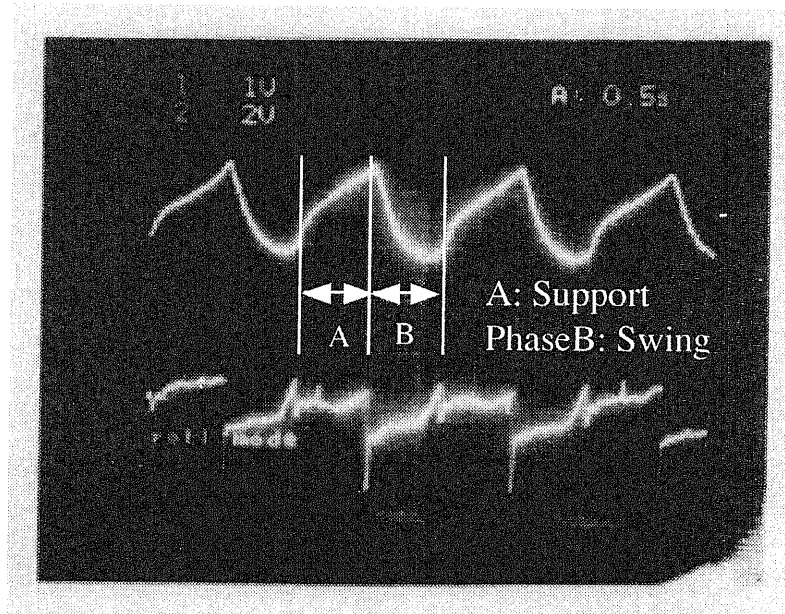
持脚相についてみると電流は滑らかに推移しており、着地前後の関節応答も滑らかである。ゆえに人間型と異なり着地時での衝撃を受けにくく、直進安定性の向上、歩行距離の低減防止に役立っていることがわかる。

0.1rad/div

Left  
AnkleJoint

1.25A/div

Motor  
Currentfor  
Left



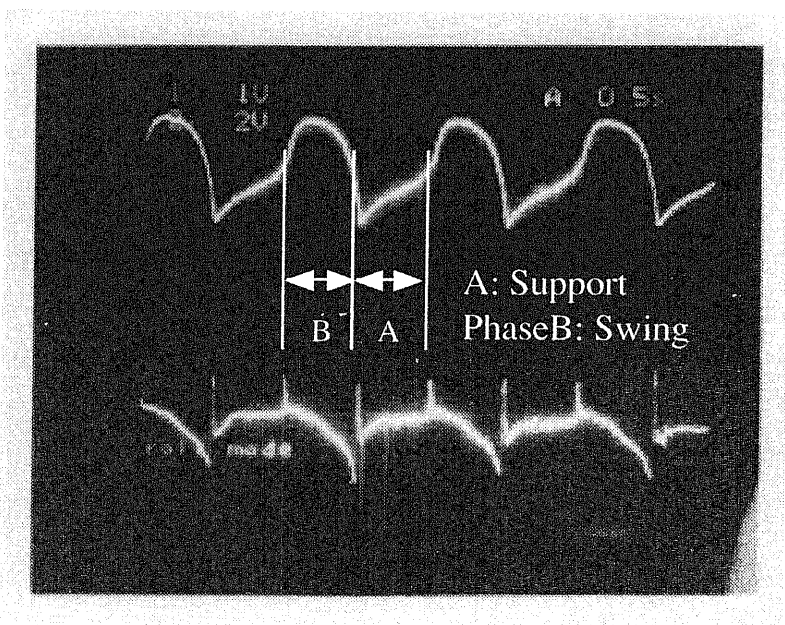
Bird Like Gait

0.1rad/div

Left  
AnkleJoint

1.25A/div

Motor  
Currentfor  
Left



Human Like Gait

図 6.18: 鳥型・人間型歩行時における左足足首関節の動作とモータ電流

### 6.3 まとめ

以上に述べてきたように、Ostrich-IIを用いた実機実験によって、左右のバランスを考慮した実時間の可変速歩行が実現できることを示した。実現された歩行は歩行速度 0.06-0.20 m/s、歩幅 0.02-0.20 m の範囲である。

可変速歩行が安定に実現される歩行パラメータについて、Ostrich-IIによる実験結果と人間の歩行特性の経験則とを比較した。歩行速度に応じて歩幅が大きくなること、歩行周期が短くなることなどの特性が似通っており、実験結果が現実的であることを示すとともに、人間の歩行特性を説明する可能性の一つとしても興味深い。

また、鳥型・人間型歩行の比較を行い、鳥型の方が着地時の安定性や直進安定性などの面で優れていることを確認した。

なお、実験を通して明らかになった問題点を以下にまとめる。

低速歩行領域では構造的な時定数よりも歩行周期が長いため関節剛性が降伏する。また、例えアクチュエータ出力が十分であっても、足の裏の面積によっては支持点がはみ出し、転倒する。これを防ぐには、上半身でバランスをとるという方法が考えられる。また、高速歩行領域では1号機と同様にアクチュエータ速度限界に抵触し、歩行が困難となる。筋肉型アクチュエータのようにストロークが小さくとも出力が大きいものの研究に期待したい。

また、現在はヨー軸運動の制御は考慮していないため、高速歩行時には直進安定性を補償する手段が存在しない。Ostrich-IIにおいては、支持脚が床面に対して十分な摩擦を持って接しているため顕著ではないが、氷上面のような摩擦の小さい床面の場合には直進が困難と考えられる。解決策としては、十分に摩擦が発生するような靴を履いたり、人間のように腕を振ることが考えられる。スパイクなどの効果については2号機の継続課題として、腕を振ることによるヨー軸モーメントの補償については3号機あるいは2号機の改造で検討したい。

## 第7章

### 結言

本論文は、二足歩行機械の実用化にとって必要不可欠でありながら、従来ほとんど手つかずの状況にあった歩容（歩き方）そのものを実時間で変化させるシステムの構築を目指したものである。この目的のため実際に半身大の二足歩行機械を製作し、実機実験により実時間で歩行速度を変化させられるシステムを構築し、以下のような成果を得た。

- ・第4、6章で示すように実時間で歩行速度を制御することができる二足歩行システムの構築に成功した。

第3章で歩行制御の階層化の必要性を説き、上位層は下位層がロバストであることを利用した上で役割分担することにより、見通しの良い制御方策が構築できた。

- ・歩行持続性破壊の観点から鳥型歩行の優位性を発見した。

本論文ではけりによる歩行持続性の破壊の観点からけりをあまり必要としない鳥型歩行の優位性を導いたが、この他にも様々な観点からの比較が可能と思われる。例えば、第6章では着地時刻付近での足首関節動作の観点から鳥型の方が滑らかな着地を実現できることを示した。また、支持点から見た遊脚足先の位置を制御する系においては冗長自由度となっており、着地時のコンプライアンス増加の観点などからより適切な軌道が導けるものと思われる。

- ・3次元歩行を考慮した場合に矢状面・前額面運動の同期の条件を定常歩行、および加減速中の双方について導いた。その結果は我々人間の歩行と照らし合わせて妥当である。

人間は上半身、および腕の振りなどによって前額面運動と矢状面運動の干渉をうまく制御している。しかしながら、本論文で示したように下半身の自由度だけでも運動の同期をとることができ、かつそれが加減速のような過渡状態にも有効であることを示した。また、第6章での実験結果が示す通り、歩行速度と歩幅・歩行周期などの相関関係は人間の歩行に関する経験則と Ostrich-II の実験結果で似通っており、実験結果の妥当性を示すとともに、人間の歩行特性説明の可能性の一つとしても重要であると考えられる。



なお、本論文で提案した手法については、様々な点で自由度と課題が残されている。第3章で触れたように、下位レベルの制御構成には検討の余地が十分にあると思われる。特に歩行安定性の向上に向けて以下のような課題が残っている。

- ・環境情報の取得（足の裏の反力など）による安定化の追求
- ・実時間性を保った上で安定性をいかに向上させるかという観点からみた下位レベル・中位レベル制御構成の検討

例えば、ZMPは支持面での床反力を観測することにより実時間での観測が可能であり、安定余裕に応じて中位レベル側の制御方針を変更していく、といった方法が考えられる。しかしながら、様々な要素を考慮していくにつれてレベル間の干渉も強くなっていき、制御が複雑になると同時に相矛盾する挙動を示す可能性も指摘できると思われる。

中位レベル制御の問題として、歩行状態の把握の観点から、ジャイロによる絶対角度情報の取得のように、外界センサを用いた、より自発的な歩容制御を検討する必要がある。さらに、第6章で触れたように摩擦力が不足する床面でのヨー軸周りの回転の抑圧の問題などは、内界センサ情報（足の裏の反力情報）と外界センサ情報（ジャイロによるヨー軸回転角測定）を有効に統合するセンサフュージョンの問題としても興味深い。

また、本論文で示した歩容変更は歩行移動の可能性からみればほんの第一歩にすぎない。実時間巡回歩行に向けた制御方策の検討などは重要な課題であると考えられる。

### 謝辞

本研究の遂行にあたり、適切なるご指導を頂きました堀洋一助教授に感謝致します。オンライン計算機センターの方々には研究環境の整備に多大の尽力を頂きました。ここに感謝いたします。修士課程および博士課程1年におきましては、茅陽一教授に適切なる御助言を頂きました。また、林武人助手には計算機環境の整備に尽力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

本研究の大前提として、ロボットの製作を欠くことはできません。忙しい最中3ヶ月近くも製作にご協力頂いた、工作室の渋谷武夫助手に篤く御礼申し上げます。

高度運動制御研究会(SAMCON)の皆様には、モーションコントロールに関する様々な助言を頂きました。また、内田利之技官には、ロボットの製作から、コントローラの製作、実験の補助等、様々な場面で支えになって頂きました。深く御礼申し上げます。また、秘書の皆様方には雑用などで多大の御協力を頂きました。ここに御礼申し上げます。

実験に用いたDSPは(株)豊田中央研究所より、御借りしているものです。この場を借りて、御礼申し上げます。

最後に、研究生活を共に過ごし、ディスカッション等を通じて研究内容の向上に影響を与えてくれた学生各位に厚く御礼申し上げます。

## 研究業績

### (1) 学会誌論文

南方英明, 堀 洋一, 「Biped Bike に関する研究 - 矢状面運動の解析と制御 -」  
電気学会論文誌 D (投稿中)

### (2) 国際会議論文

- [1] Hideaki Miankata and Yoichi Hori, "Realization of Robust Biped Walking by Emulating Inverted Pendulum," IEEE 3rd International Workshop on Advanced Motion Control, Berkeley, pp.460-467, 1994.
- [2] Hideaki Minakata and Yoichi Hori, "Realtime Speed-changeable Biped Walking by Controlling the Parameter of Virtual Inverted Pendulum," IEEE IECON '94, Bologna, pp.1009-1014, 1994.
- [3] Hideaki Minakata and Yoichi Hori, "Expanded Virtual Inverted Pendulum Method for Real-time Biped Walking Robot in 3-D Space," International Conference on Recent Advances in Mechatronics, ICRAM' 95, Istanbul, pp.809-814, 1995.
- [4] Hideaki Minakata and Yoichi Hori, "Fundamental Study of Biped Bike Prototype Controlled by Accelerator and Brake Pedals," IEEE 4th International Workshop on Advanced Motion Control, AMC '96-MIE, pp.241-246, 1996.

### (3) 研究会論文

- [5] 南方英明, 堀 洋一, 「仮想倒立振子のパラメータ指定による可変速二足歩行」, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-94-6, pp.45-54,1994.
- [6] 南方英明, 堀 洋一, 「Ostrich-IIによる3次元二足歩行」, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-97-12,1997. (発表予定)

## (4) 大会論文

- [7] 南方英明, 堀 洋一, 「倒立振子をまねることによる可変速二足歩行」, 第11回日本ロボット学会学術講演会, pp.247-248, 東京, 1993.
- [8] 南方英明, 堀 洋一, 「足の質量が無視できない二足歩行ロボットの遊脚の軌道に関する考察」, 平成6年電気学会全国大会, Vol.6. pp.103-104, 東京, 1994.
- [9] 南方英明, 堀 洋一, 「実時間性を考慮した二足歩行ロボットの制御」, 第12回日本ロボット学会学術講演会, pp.427-428, 福岡, 1994.
- [10] 南方英明, 堀 洋一, 「仮想倒立振子を利用した2足歩行の3次元への拡張」, 日本機械学会, ロボティクス・メカトロニクス講演会'95, pp.194-197, 川崎, 1995.
- [11] 南方英明, 堀 洋一, 「仮想倒立振子法による3次元2足歩行」, 第13回日本ロボット学会学術講演会, pp.189-190, 川崎, 1995.
- [12] 南方英明, 堀 洋一, 「Biped Bike に関する研究 - 矢状面運動の解析と制御 -」, 平成8年電気学会産業応用部門全国大会, pp.303-308, 仙台, 1996.
- [13] 南方英明, 堀 洋一, 「Ostrich-I による実時間加減速二足歩行」, 第14回日本ロボット学会学術講演会, pp.207-208, 新潟, 1996.

## (5) その他

### ・学会誌随想

- [14] 南方英明, 「ロボット工学は転換期なのか?」, 日本ロボット学会誌 Vol.14 No.4, pp.507-510, 1995.

## 参考文献

- [1] 日本ロボット学会編:「ロボット工学ハンドブック」, コロナ社, 1990
- [2] 本川達雄:「ゾウの時間ネズミの時間」, 中公新書, 1992
- [3] 日経サイエンス編集部:「リズムの相互作用で出現する歩行運動」, 日経サイエンス, Vol. 23 No. 7, pp.40-43, 1993
- [4] 鶴岡, 村井:「写真測量による人の歩行の3次元バイオメカニクス解析」, 生産研研究速報, UDC 612.766.621.397.61
- [5] 多賀, 山口, 清水:「生物のロコモーションにおける自立分散制御」, 科研費重点領域研究「自立分散システム」第3回全体講演会論文集, pp.77-82, 1993
- [6] 呉松, 前田, 北村:「二足歩行ロボットの自律的軌道生成」, 科研費重点領域研究「自立分散システム」第3回全体講演会論文集, pp.83-88, 1993
- [7] M. Vukobratovic, A. A. Frank and D. Juricic: "On the Stability of Biped Locomotion", *IEEE Trans.*, BME-17-1, pp.25-36, 1970
- [8] F. Gubina, H. Hemami and R. B. McGhee: "On the Dynamic Stability of Biped Locomotion", *IEEE Trans.*, BME-21-2, pp.102-108, 1974
- [9] H. Hemami and R. L. Farnsworth: "Postural and Gait Stability of a Planar Five Link Biped by Simulation", *IEEE Trans. on Automatic Control*, AC-22-3, pp.452-458, 1977
- [10] C. L. Golliday and Hemami: "An Approach to Analyzing Biped Locomotion Controls", *IEEE Trans. on Automatic Control*, AC-12-6, pp.963-972, 1977
- [11] 宮崎, 有本:「特異摂動法による多自由度二足歩行形の解析」, 計測自動制御学会論文集, 15-4, pp.84-90, 1979
- [12] 下山:「竹馬型2足歩行ロボットの動的歩行」, 日本機械学会論文集 (C編), 48-433, pp.1445-1455, 1982
- [13] T. Mita, T. Yamaguchi, T. Kashiwase and T. Kawase: "Realization of a high speed biped using modern control theory", *Int.J. Control*, Vol.40, No. 2, pp.107-119, 1984
- [14] Tad McGeer: "Passive Dynamic Walking", *Int. J. of Robotics Reserch*, Vol. 9, No. 2, pp.62-82, April 1990

## 参考文献

- [15] R. McN. Alexander: "Three Uses for Springs in Legged Locomotion", *Int. J. of Robotics Reserch*, Vol. 9, No. 2, pp.53-61, April 1990
- [16] J. Furusho and A. Sano: "Sensor-Based Conotrol of a Nine-Link Biped", *Int. J. of Robotics Reserch*, Vol. 9, No. 2, pp.83-98, April 1990
- [17] 佐野, 古荘: 「角運動量制御による2足歩行ロボットの3次元動歩行」, 計測自動制御学会論文集, 26-4, pp.459-466, 1990
- [18] 梶田, 谷: 「凹凸路面における動的2足歩行の制御について」, 計測自動制御学会論文集, 27-2, pp.177-184, 1991
- [19] S. Kawaji and K. Sawada: "Dynamical Walk of Biped Locomotion Robot With Characteristic Rhythm", *Japan/USA Symposium on Flexible Automation*, Vol.1, pp.745-752, 1992
- [20] 高西, 寸土, 笠井, 加藤: 「上体運動により3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットの開発」, 第6回知能移動ロボットシンポジウム講演論文集, A 09, pp.1-6, 1992
- [21] Y. Kurematsu, T. Maeda and Y. Kondo: "Trajectory Planning and Control of a Biped Locomotive Robot-Simulation and Experiment-", *Robotics and Manufacturing, Recent Trends in Research, Education, and Aplications*, pp.65-72, ASME Press. 1988
- [22] 五十嵐, 野飼: 「二足歩行運動における両足支持相の力学解析と制御」, 日本ロボット学会誌, Vol. 7, No. 3, pp.142-150, 1989.
- [23] Q. Li, A. Takanishi and I. Kato: "A Biped Walking Robot Having A ZMP Measurement System Using Universal Force-Moment Sensors," *IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS '91*, Nov. 3-5, 1991, Osaka, Japan. IEEE Cat. No. 91TH0375-6. pp.1561-1573
- [24] K. Ohnishi: "Advance motion control in robotics," *Proc. IEEE IECON '89*, Philadelphia, pp. 356-359, 1989.
- [25] 堀: 「加速度制御型サーボ系」, 電気学会論文誌D, Vol. 108-7, pp. 672-677, 1988
- [26] 梅野: 「2自由度制御によるモーションコントロール」, 日本ロボット学会誌 Vol.11, No.4, pp.494-501, 1993
- [27] T. Umeno and Y. Hori, "Two degrees of freedom controllers for robust servomechanism — their application to robot manipulators without speed sensors —," *IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, Yokohama, pp. 179-188, 1990.

## 参考文献

- [28] 船橋, 小川, 後藤, 小島: 「二足歩行機械の脚機構の総合 (第1報, 足関節軌跡創成機構の総合, 第2報, 足首駆動機構の総合) , 日本機械学会論文集 (C), Vol. 50, No. 455, pp.1285-1297, 1984
- [29] K. Shimura, M. Sugai and Y. Hori, "Position, Collision and Force Controls of Robot Manipulator Based on The Robustified Joint Servosystem," *IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, Nagoya, pp.16-25, 1990.
- [30] 畑村洋太郎: 「実際の設計」, 日刊工業新聞社, 1988
- [31] 前田, 杉江, システム制御情報学会編: 「アドバンスト制御のためのシステム制御理論」, 朝倉書店, 1990
- [32] 古田, 川路, 美多, 原: 「メカニカルシステム制御」, オーム社, 1984
- [33] 広瀬茂男、米田完: 「実用的4足歩行機械の開発に向けて」, 日本ロボット学会誌 Vol.11, No.3, pp.360-365, 1993
- [34] 小谷内範穂: 「リム・メカニズムの研究」, 日本ロボット学会誌 Vol.13, No.7, pp.900-903, 1995
- [35] 永田勝也他: 「やさしい相撲ロボットの作り方」, 富士通ソフトウェア, 1993
- [36] 永田勝也他: 「勝てる相撲ロボットの作り方」, 富士通ソフトウェア, 1994
- [37] R. McN. Alexander et al. : "A model of locomotion on compliant legs," *Phil. Trans. roy. Soc. B.* 338, pp189-198, 1992
- [38] 木村ほか: 「四足動歩行ロボットの力学的解析」, 日本ロボット学会誌 Vol.6, No.4, pp.3-14, 1988
- [39] 伊藤宏司: 「歩行運動とリズム生成」, 日本ロボット学会誌 Vol.11, No.3, pp.320-325, 1993
- [40] 古荘純次: 「歩行ロボットの研究展開」, 日本ロボット学会誌 Vol.11, No.3, pp.306-313, 1993
- [41] 藤江正克: 「極限作業における4足歩行ロボット」, 日本ロボット学会誌 Vol.11, No.3, pp.385-390, 1993
- [42] 鈴森、近藤、田中: 「小型歩行ロボット」, 日本ロボット学会誌 Vol.11, No.3, pp.385-390, 1993
- [43] 小谷内範穂: 「多足歩行ロボットの世界」, 日本ロボット学会誌 Vol.11, No.3,

- pp.379-384, 1993
- [44] R. Alexander: "Gaits of Mammals and Turtles", 日本ロボット学会誌 Vol.11, No.3, pp.314-319, 1993
- [45] 米田 完, 広瀬茂男: 「歩行機械の転倒安定性」, 日本ロボット学会誌 Vol.14 No.4, pp.517-522, 1996
- [46] 山口, 他: 「路面形状に偏差のある環境に対する適応能力を持つ2足歩行ロボットの開発」, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.4, pp.546-559, 1996
- [47] 梶田・谷: 「実時間路面形状計測に基づく動的2足歩行の制御」, 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 7, pp. 1062-1069, 1996
- [48] 通産省アールキューブ研究会: 「アールキューブ」, 日刊工業新聞社, 1996



## 付録A

## 二足歩行機械の設計

## A.1 二足歩行機械の製作

製作した二足歩行機械は、本学渋谷武夫氏の協力の下、本学科工作室で製作したものである。他研究機関で行われている歩行ロボットの研究においても、二足歩行ロボットの場合は特に自前で製作が多い。これは、マニピュレータなどと異なって、市場に出まわる絶対数が極端に少ないので、外部の工房にもノウハウがあまり無いことが原因である。

なお、1号機製作における反省点は以下のようなものであった。

- ・ ギアが重い。ギア12個で2.4kgもの重量があり、本体重量の増加を招いた。
- ・ ギアの固定方法を、キーを打ち込む形にした。このため、ギアを取り外すのが非常に困難である。モータの取り付けは、位置的にもギアを取り外さないといけないようになっているので、メンテナンスが困難である。
- ・ ばねワッシャを使えないネジ止め箇所が幾つか存在する。ロボット稼働時の衝撃はかなり大きく、ばねワッシャの入ってないネジはすぐゆるんでしまい、関節にがたを生じる。

これらのことをふまえて以下のような改良を行った。

- ・ ギアを鉄製からエンジニアリングプラスチック製へと変更した。
- ・ ギアの固定方法をネジ止め式に変更した。またモータ取り付け位置に遊びを持たせ、バックラッシを低減できるようにした。
- ・ ネジ・ナット等はすべて外側から止める形にした。これによって、分解せずにすべてのネジ、ナット類の締め付けが行えるようになった。

## A.2 Ostrich-Iの設計図

1号機”Ostrich-I”の設計には約二ヶ月を要した。その設計図をP111-117に載せる。  
製作は

- ・ジュラルミン板の切り出し，整形などに半月
- ・棒材加工に半月
- ・穴開け，ネジ加工に一月

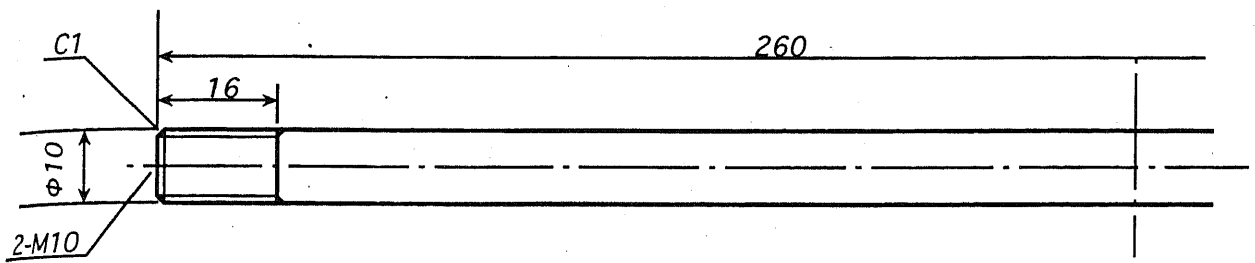
程度を要し，約二ヶ月で完成した。

## A.3 Ostrich-IIの設計図

2号機”Ostrich-II”の設計はシミュレーションとの突き合わせなどでおよそ1年を要した。その設計図をP118-127に載せる。製作は

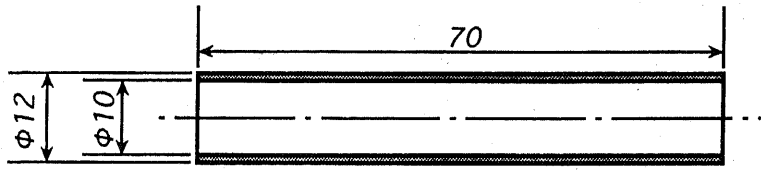
- ・ジュラルミン板の切り出し，整形などに一ヶ月
- ・棒材加工に半月
- ・穴開け，ネジ加工に一ヶ月

程度を要し，約三ヶ月で完成した。

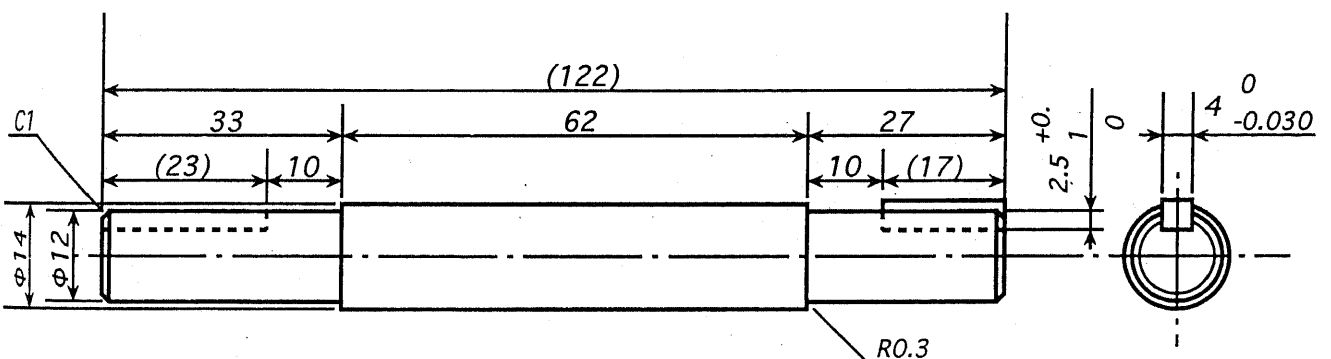


0  
8.376

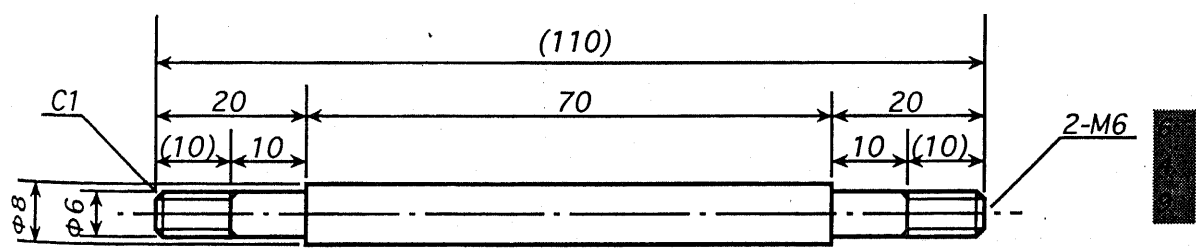
No.1	S45C	腰部固定軸	実寸	4
------	------	-------	----	---



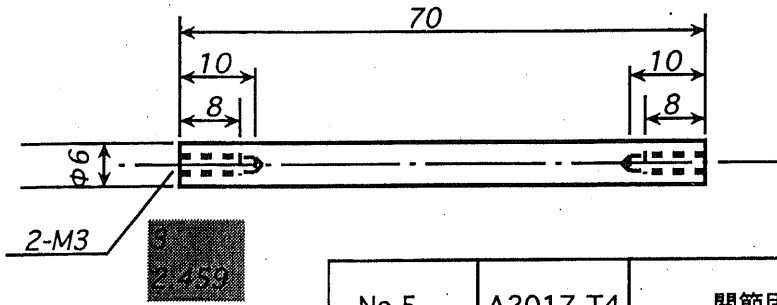
No.2	6063-T5	腰部中空パイプ	実寸	12
------	---------	---------	----	----



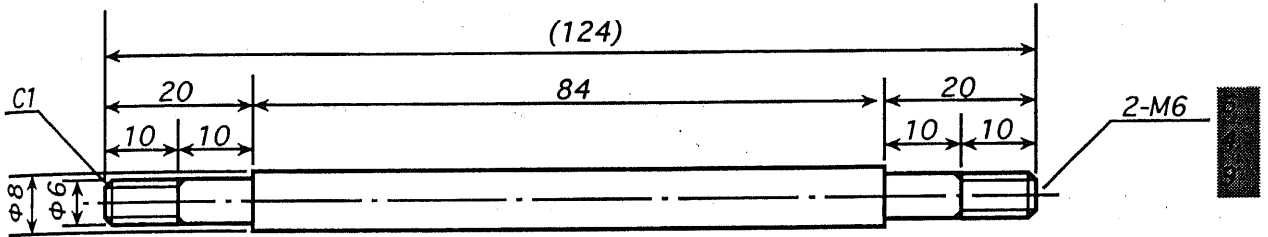
No.3	S45C	関節回転軸	実寸	6
------	------	-------	----	---



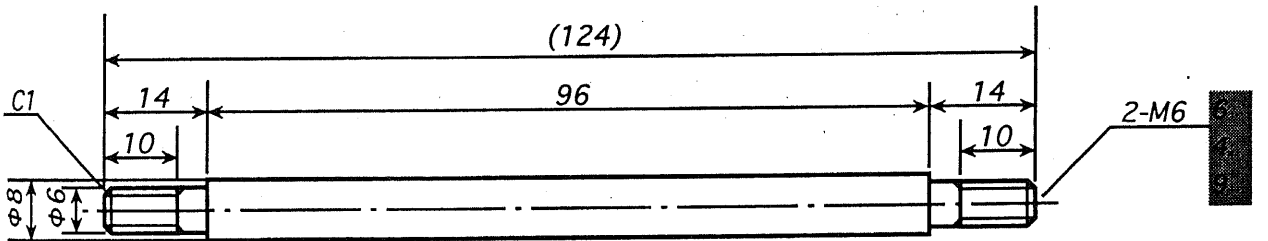
No.4	A2017-T4	すね・大腿部固定軸	実寸	16
------	----------	-----------	----	----



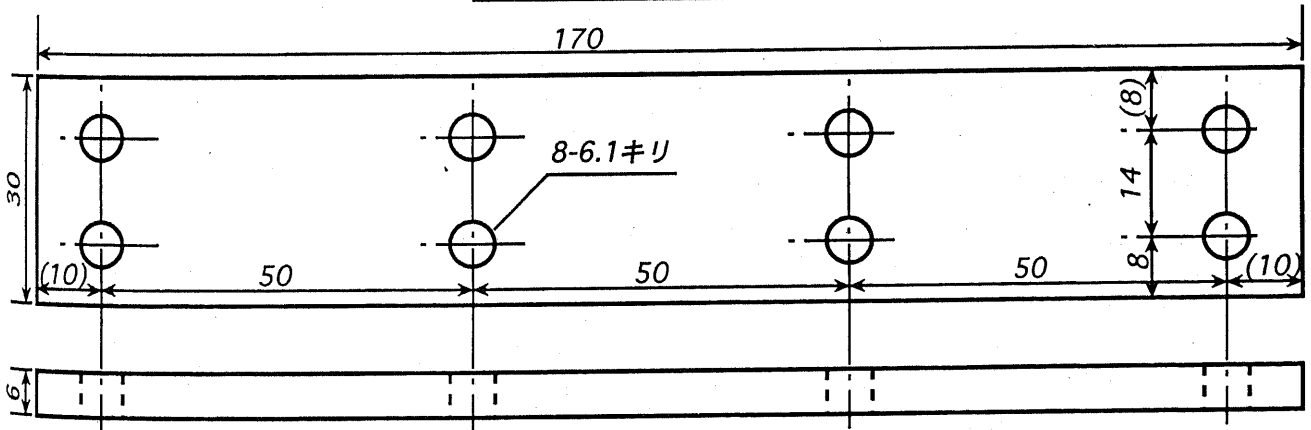
No.5	A2017-T4	関節固定軸	実寸	12
------	----------	-------	----	----



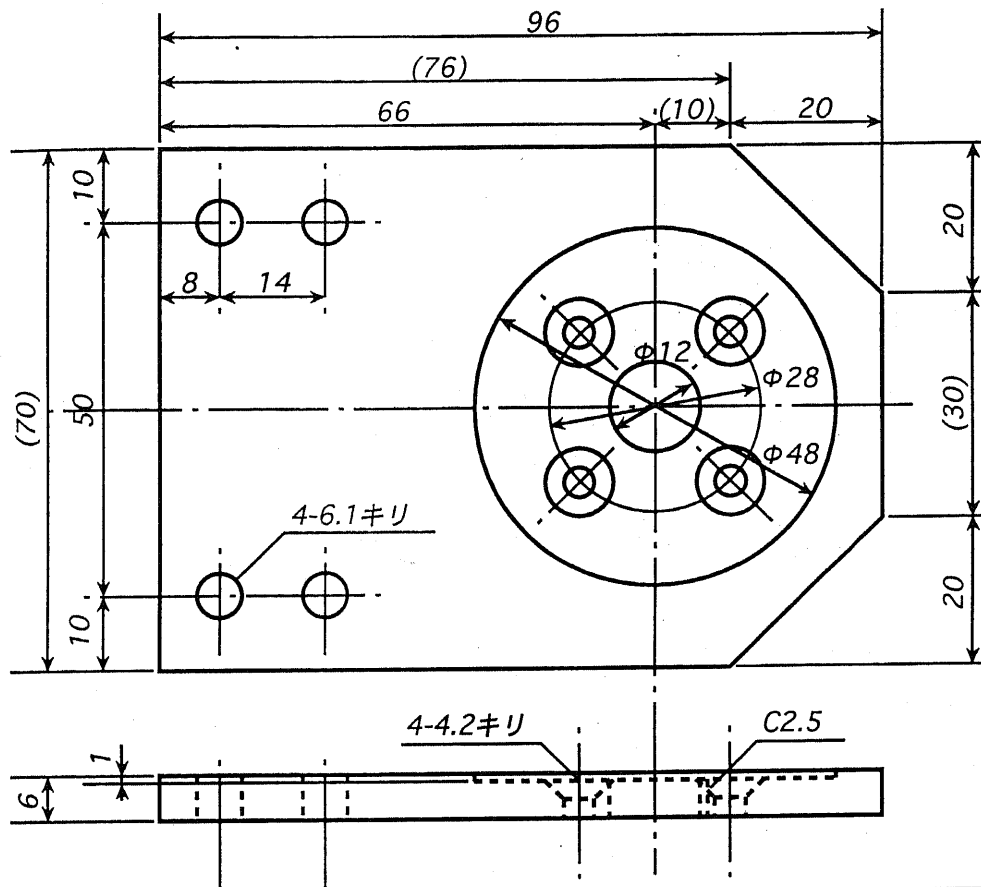
No.6	A2017-T4	足の裏・足首固定軸	実寸	8
------	----------	-----------	----	---



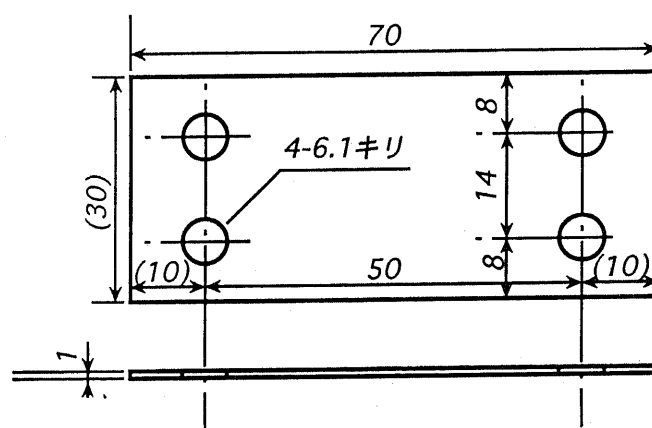
No.7	A2017-T4	足の裏固定軸	実寸	8
------	----------	--------	----	---



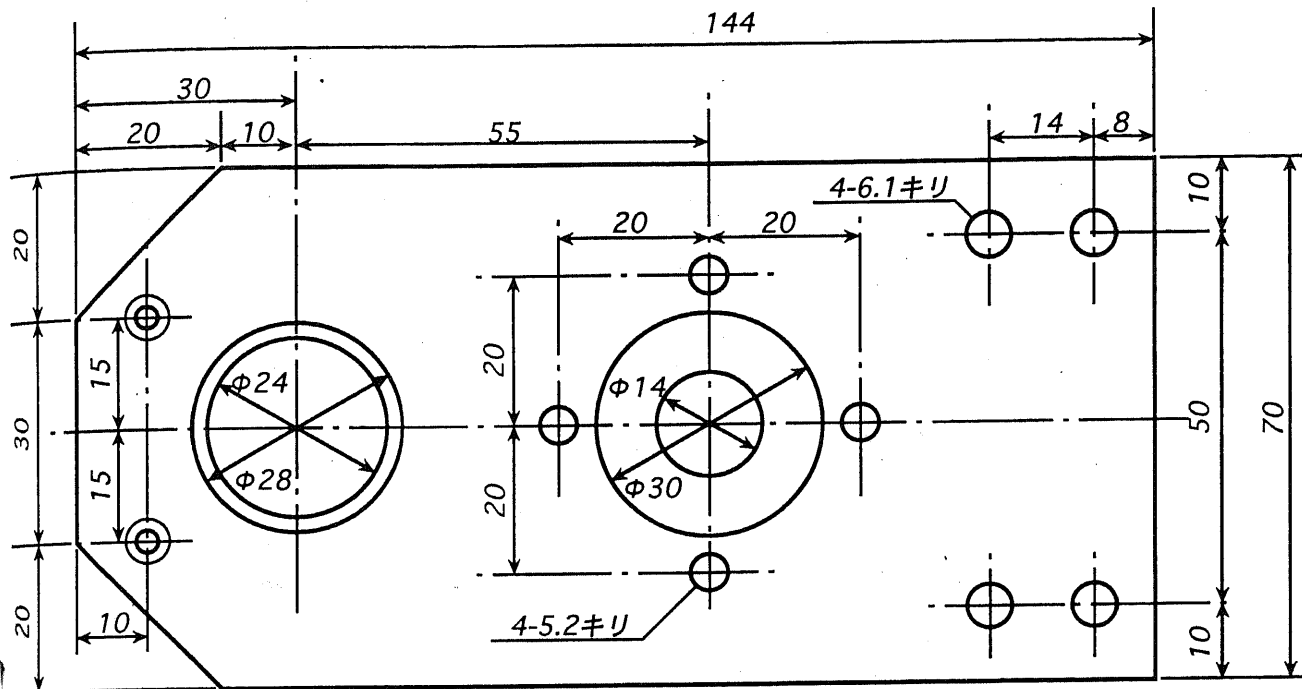
No.8	A2017-T3	足の裏	実寸	4
------	----------	-----	----	---



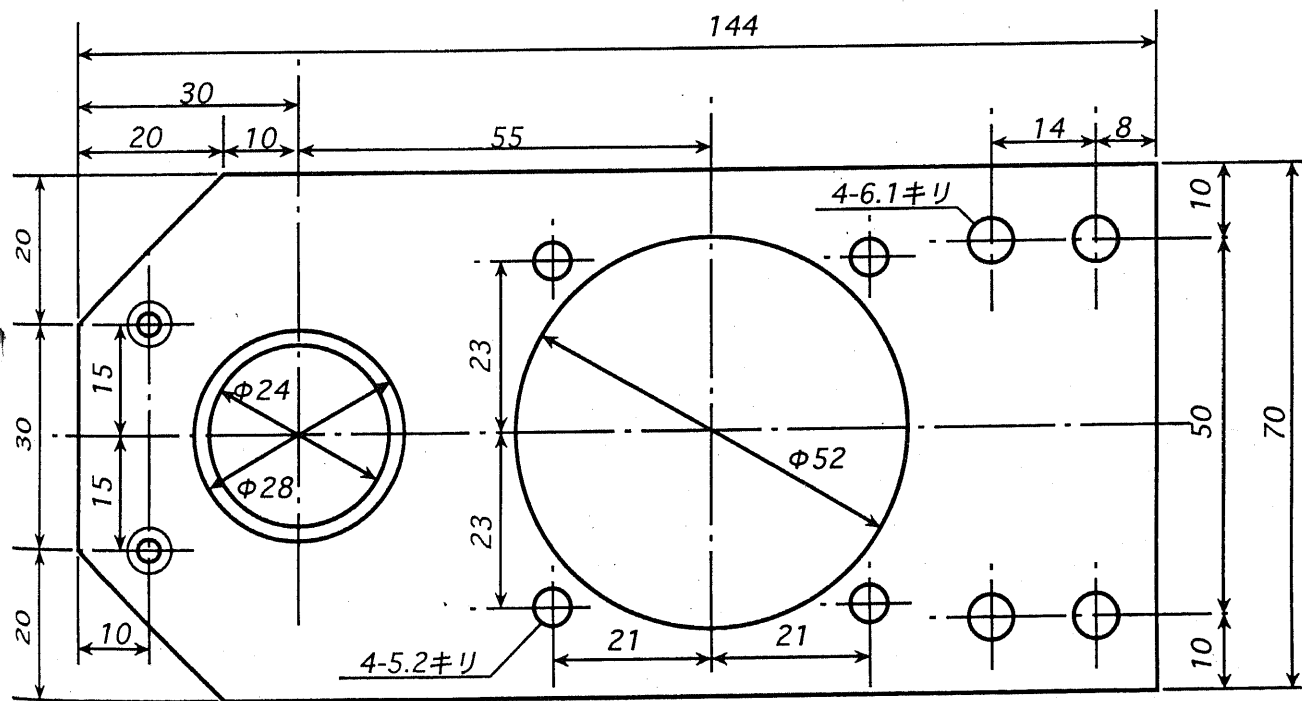
No.9	A2017-T3	外側リンクパーツ	実寸	12
------	----------	----------	----	----



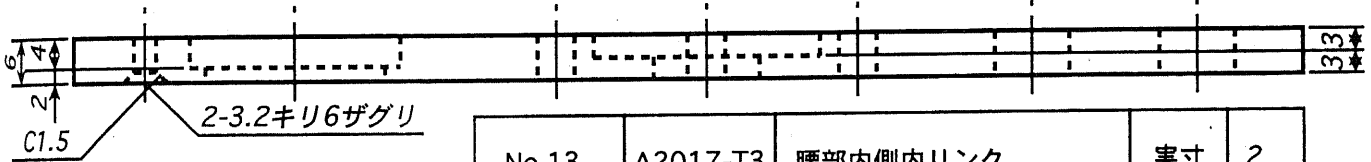
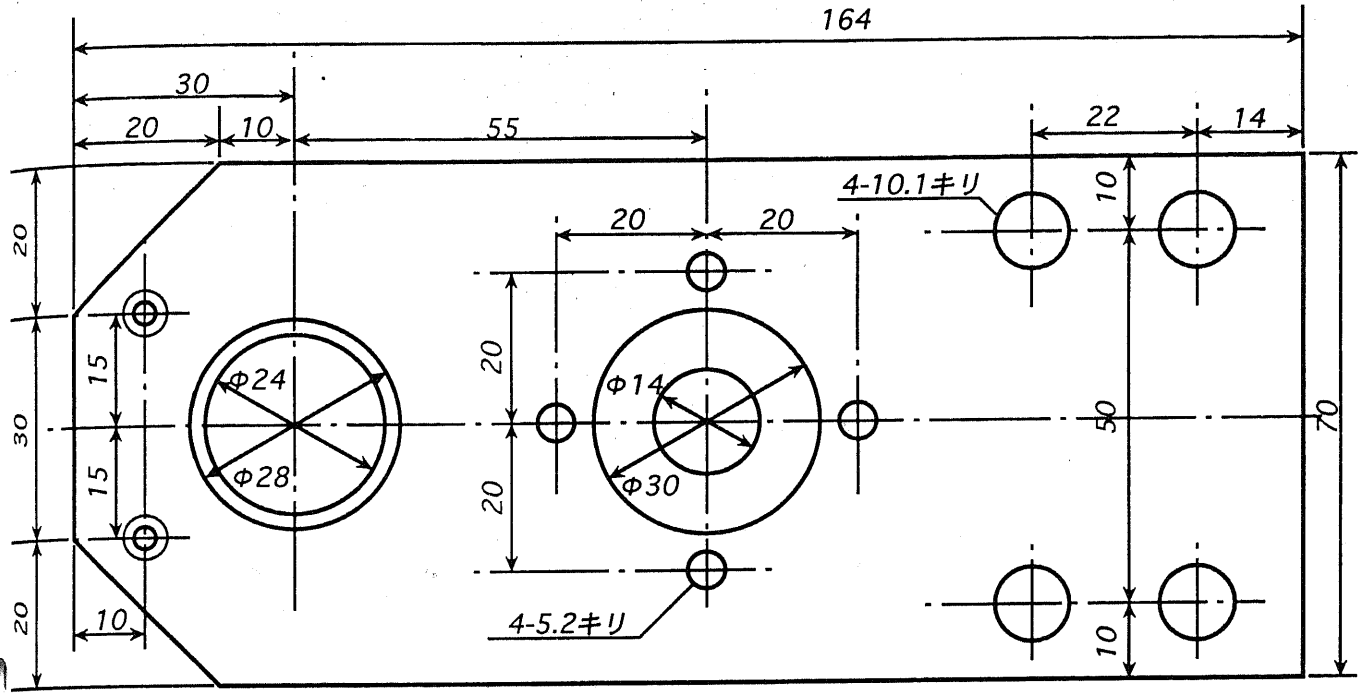
No.10	パネル板	すね・大腿部スペーサ	実寸	8
-------	------	------------	----	---



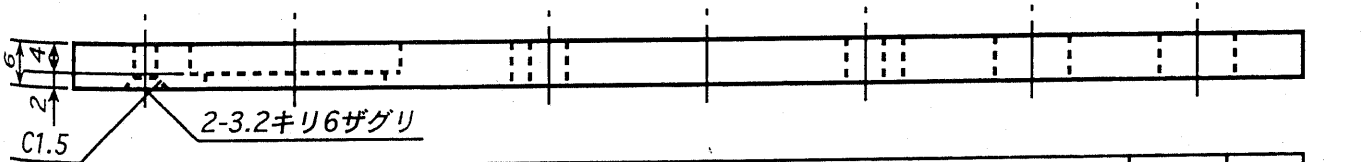
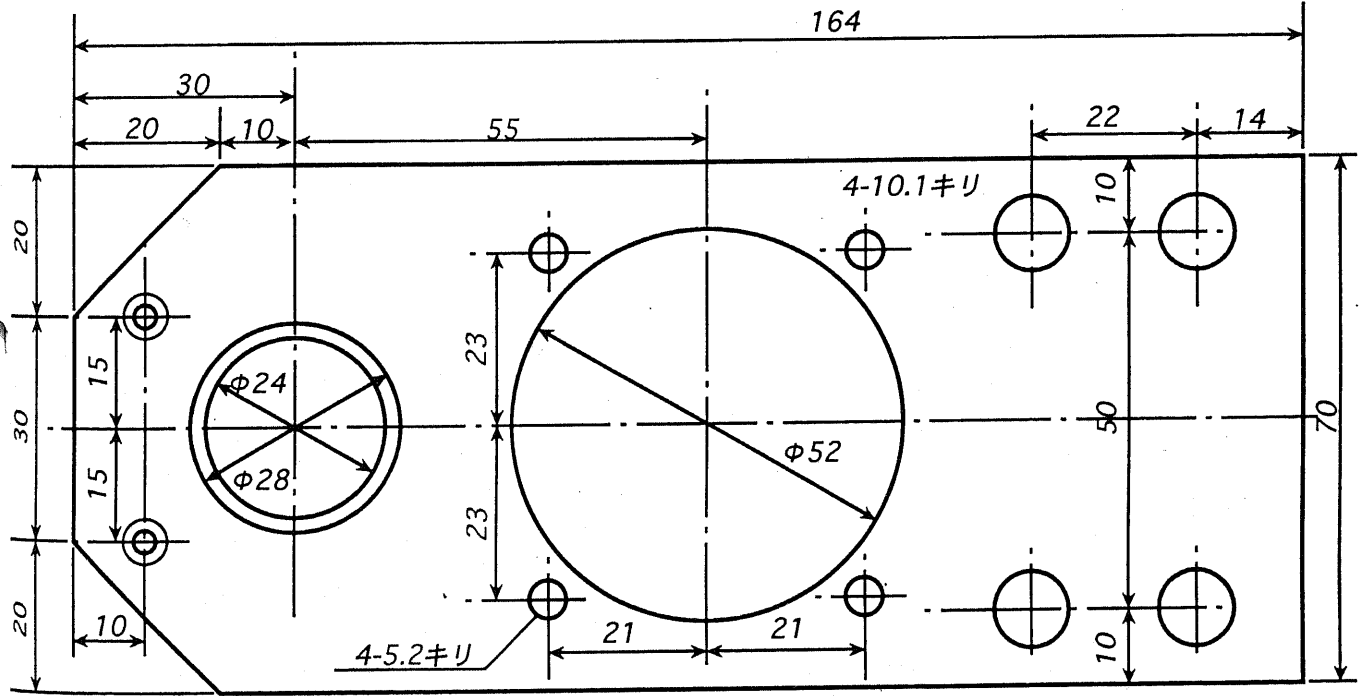
No.11	A2017-T3	すね・大腿部内側内リンク	実寸	4
-------	----------	--------------	----	---



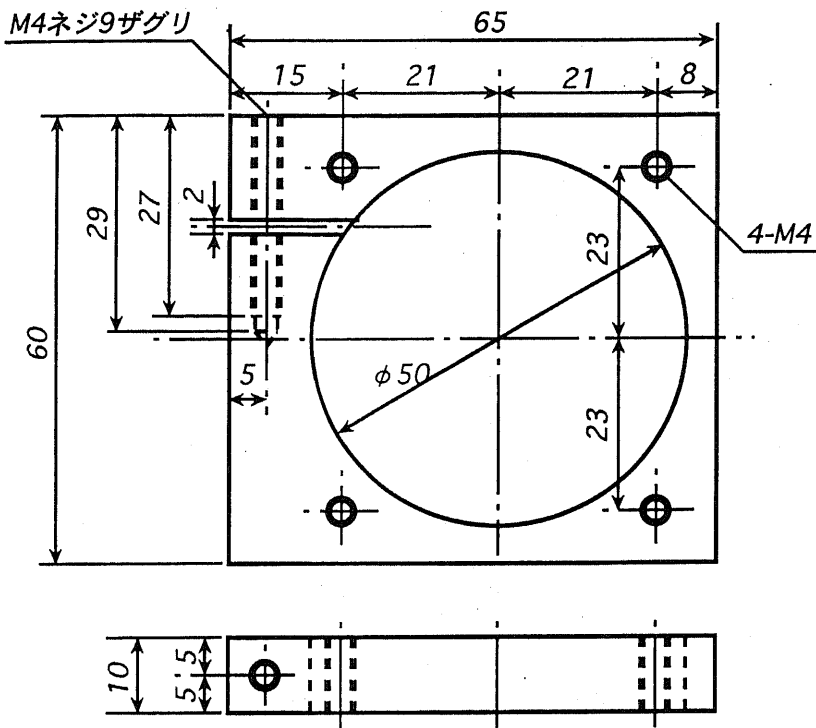
No.12	A2017-T3	すね・大腿部外側内リンク	実寸	4
-------	----------	--------------	----	---



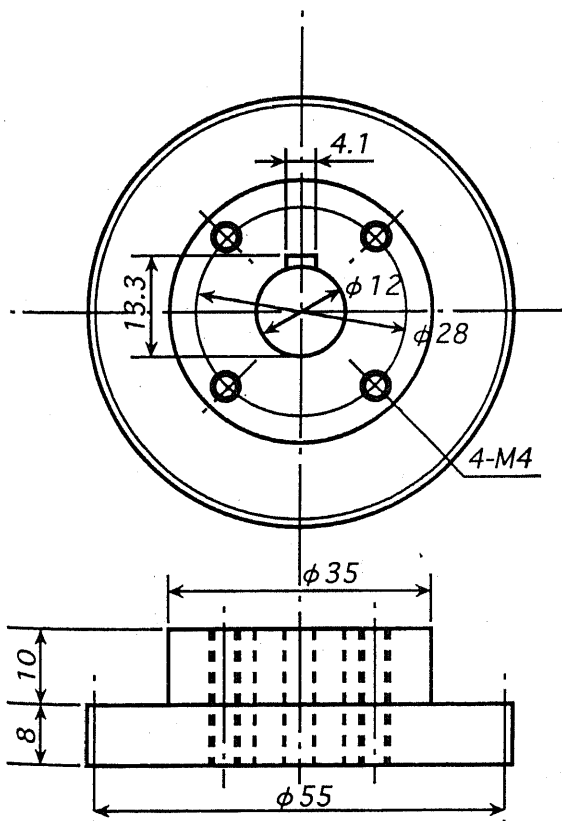
No.13	A2017-T3	腰部内側内リンク	実寸	2
-------	----------	----------	----	---



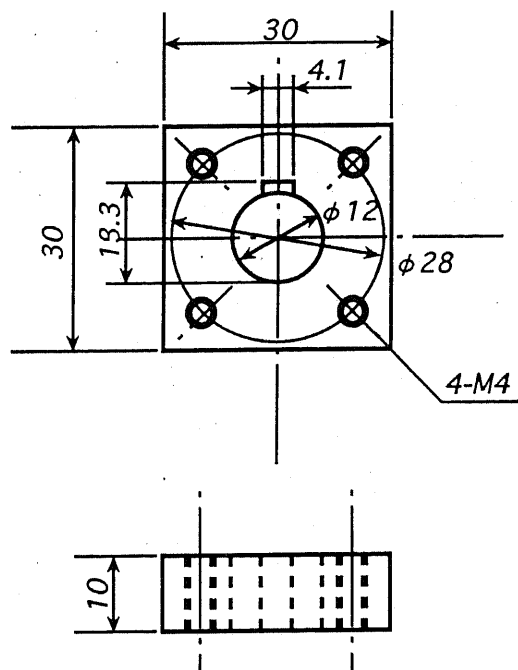
No.14	A2017-T3	腰部外側内リンク	実寸	2
-------	----------	----------	----	---



No.15	A2017-T3	モータ固定板 (本体側)	実寸	6
-------	----------	--------------	----	---

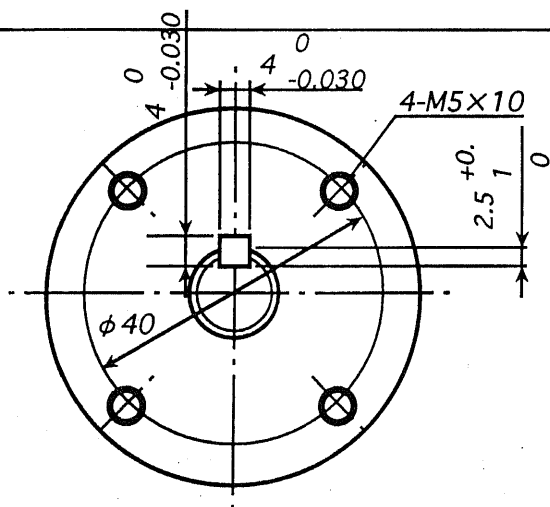
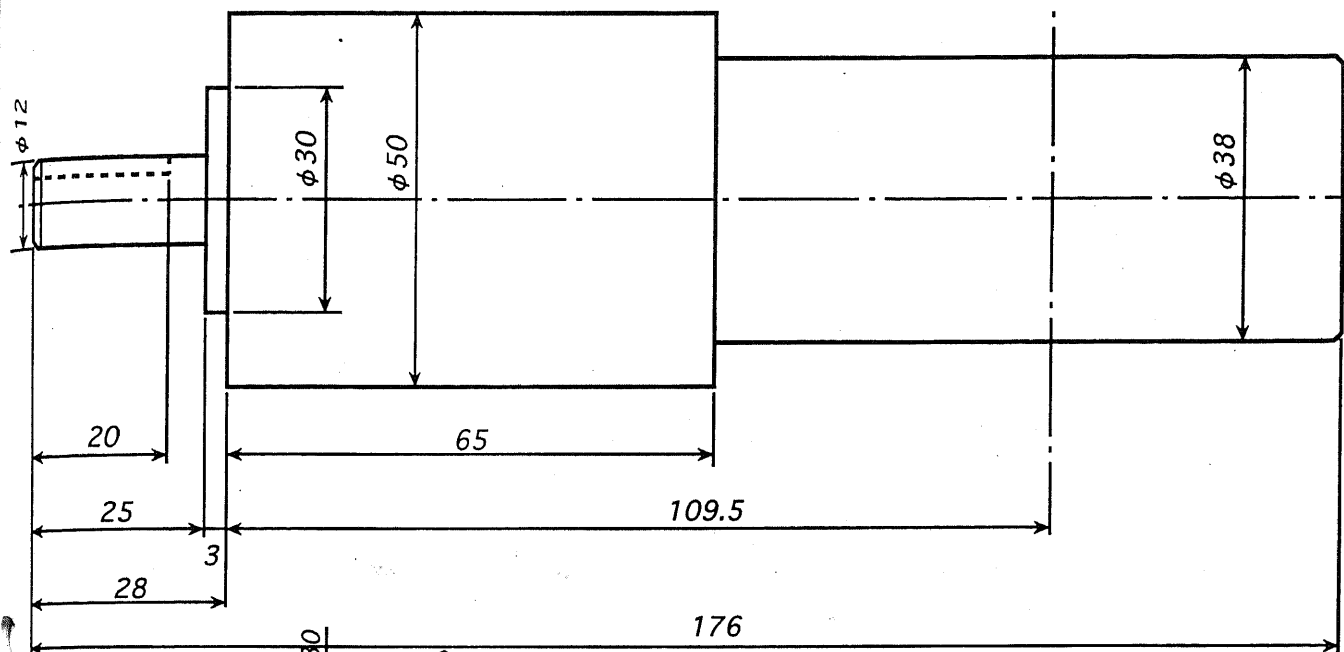


No.16	S45C	駆動用平歯車(SSG1-55)	実寸	12
-------	------	-----------------	----	----

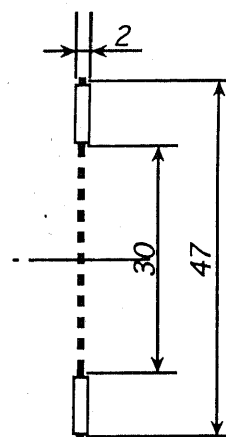
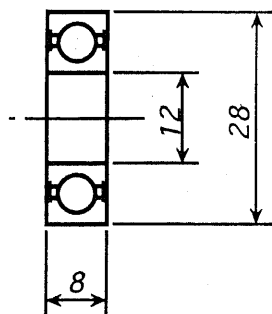


No.17	A2017-T3	軸・リンク固定パーツ	実寸	6
-------	----------	------------	----	---





No.18	RH-14 (ハーモニックドライブ+DCモータ+エンコーダ)	実寸	6
-------	--------------------------------	----	---

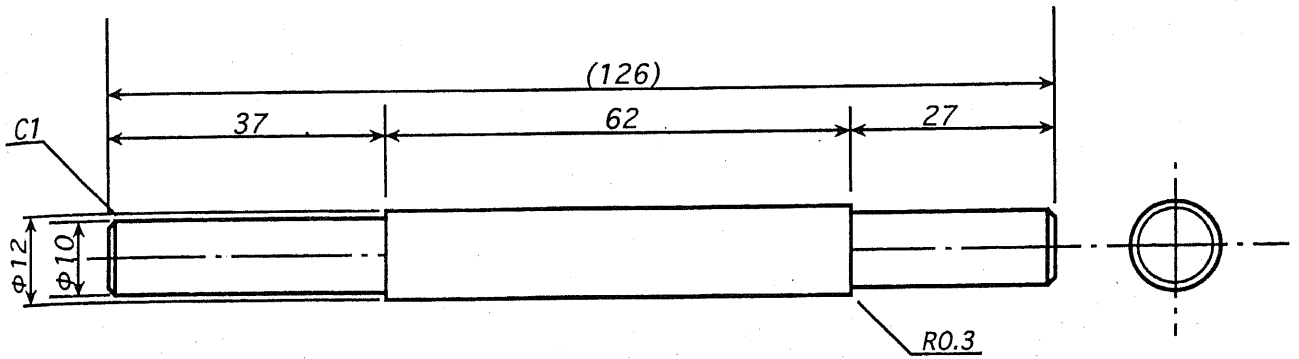


No.19	6001ZZ (深溝玉軸受け)
-------	-----------------

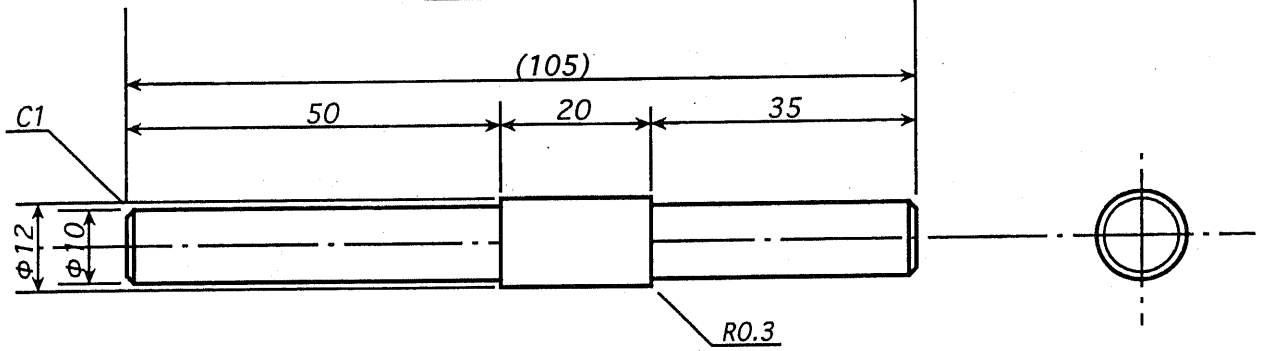
実寸	12
----	----

No.20	FNTA3047 (スラスト ニードルベアリング)
-------	------------------------------

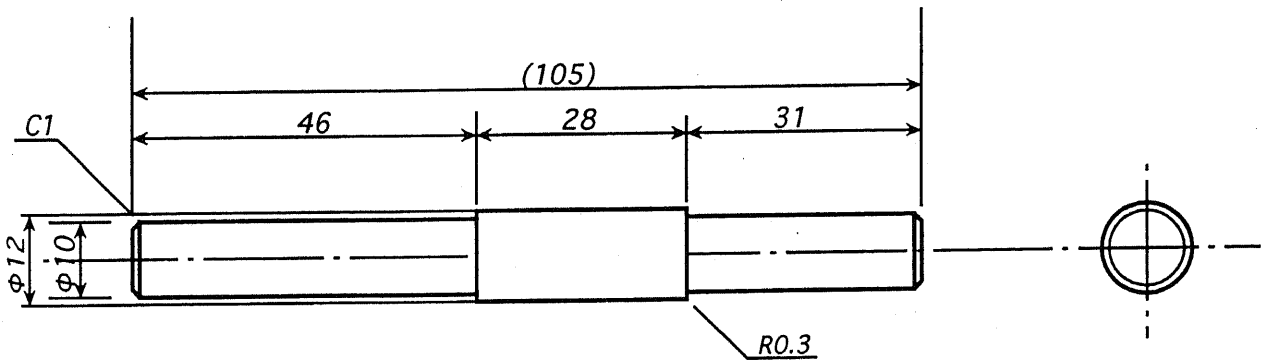
実寸	12
----	----



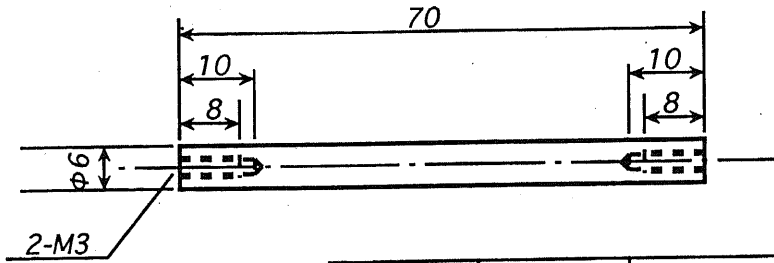
No.1	S45C	関節回転軸	実寸	6
------	------	-------	----	---



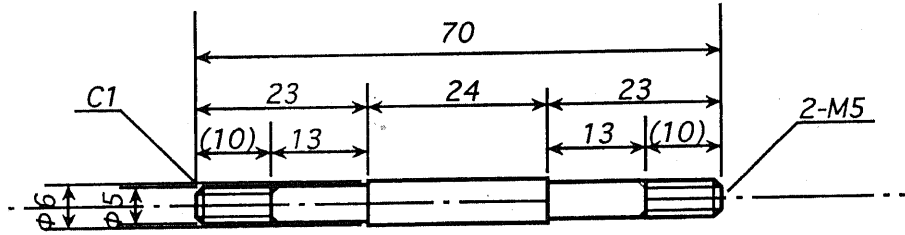
No.2	S45C	足首関節回転軸	実寸	2
------	------	---------	----	---



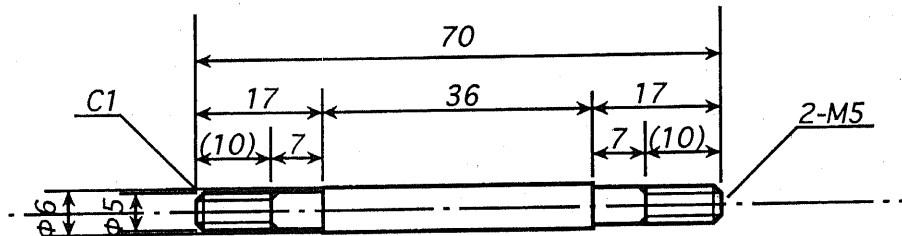
No.3	S45C	股関節回転軸	実寸	2
------	------	--------	----	---



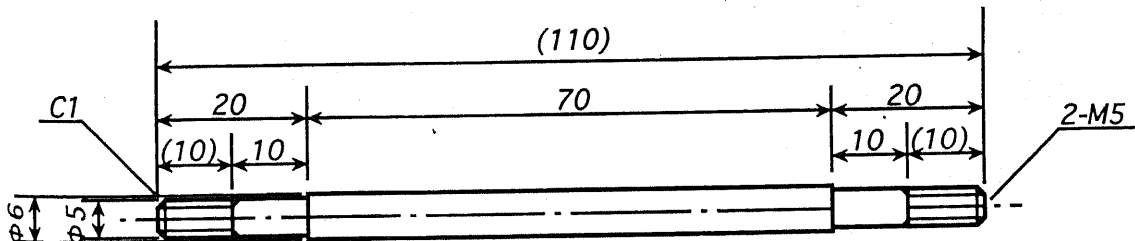
No.4	A2017-T4	関節固定軸	実寸	12
------	----------	-------	----	----



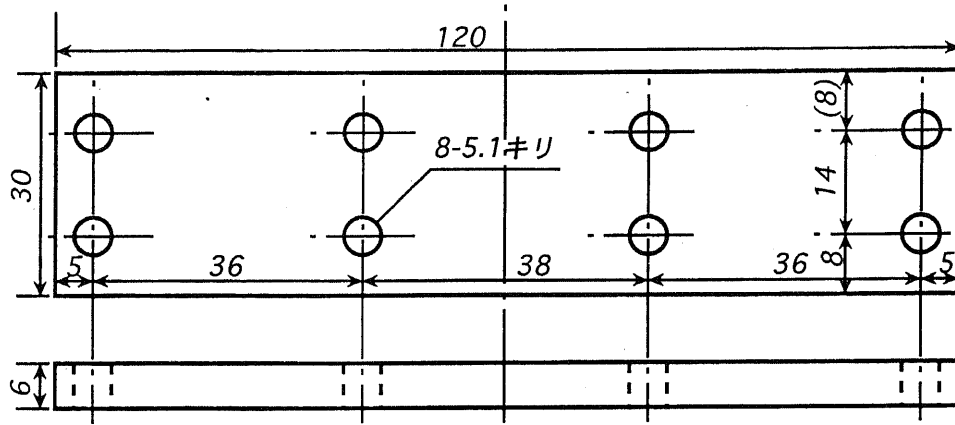
No.5	A2017-T4	胴体固定軸	実寸	12
------	----------	-------	----	----



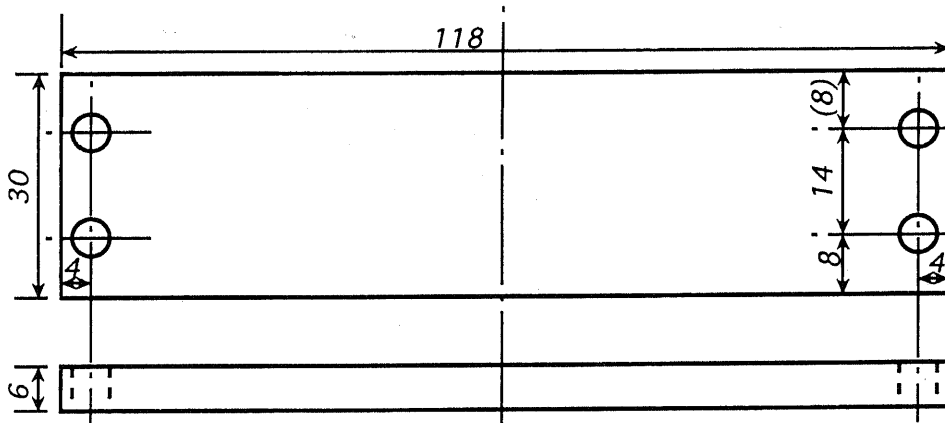
No.6	A2017-T4	胴体固定軸 2	実寸	4
------	----------	---------	----	---



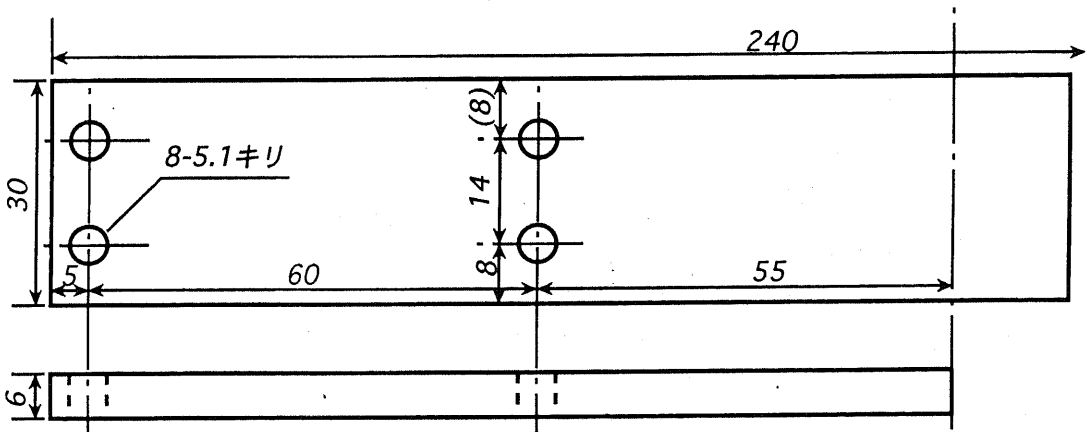
No.7	A2017-T4	すね・大腿部・足の裏固定軸	実寸	24
------	----------	---------------	----	----



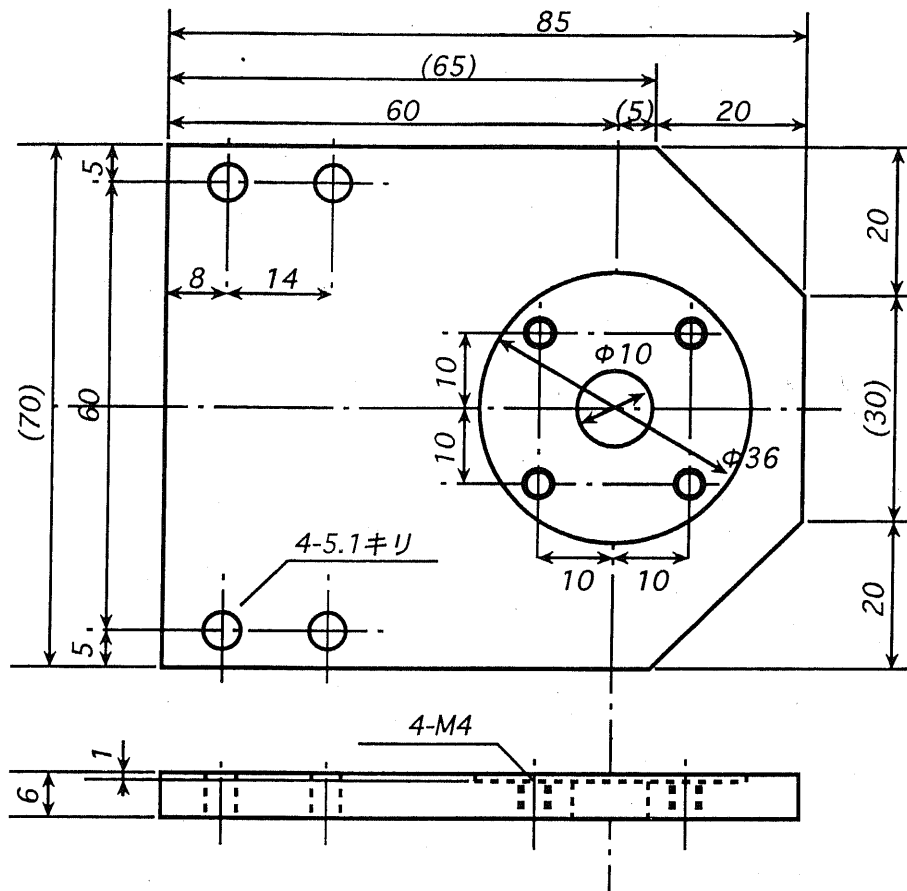
No.8	A2017-T3	足の裏	実寸	4
------	----------	-----	----	---



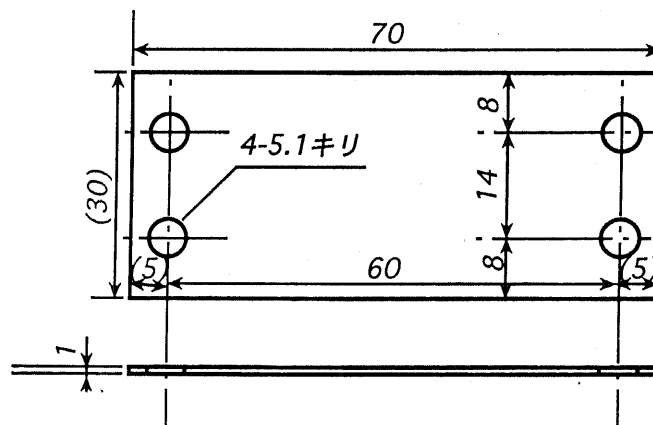
No.9	A2017-T3	胴体連結部下	実寸	2
------	----------	--------	----	---



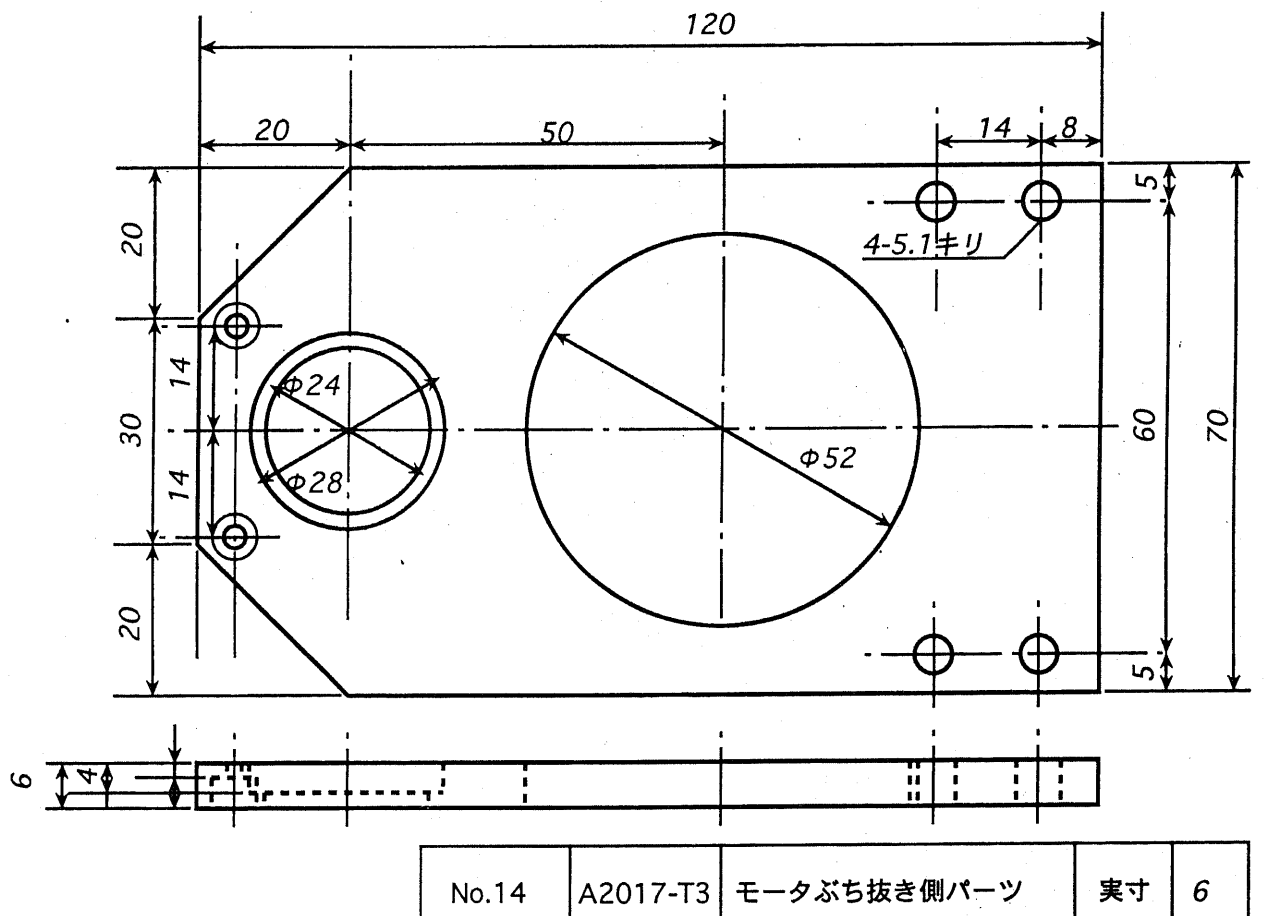
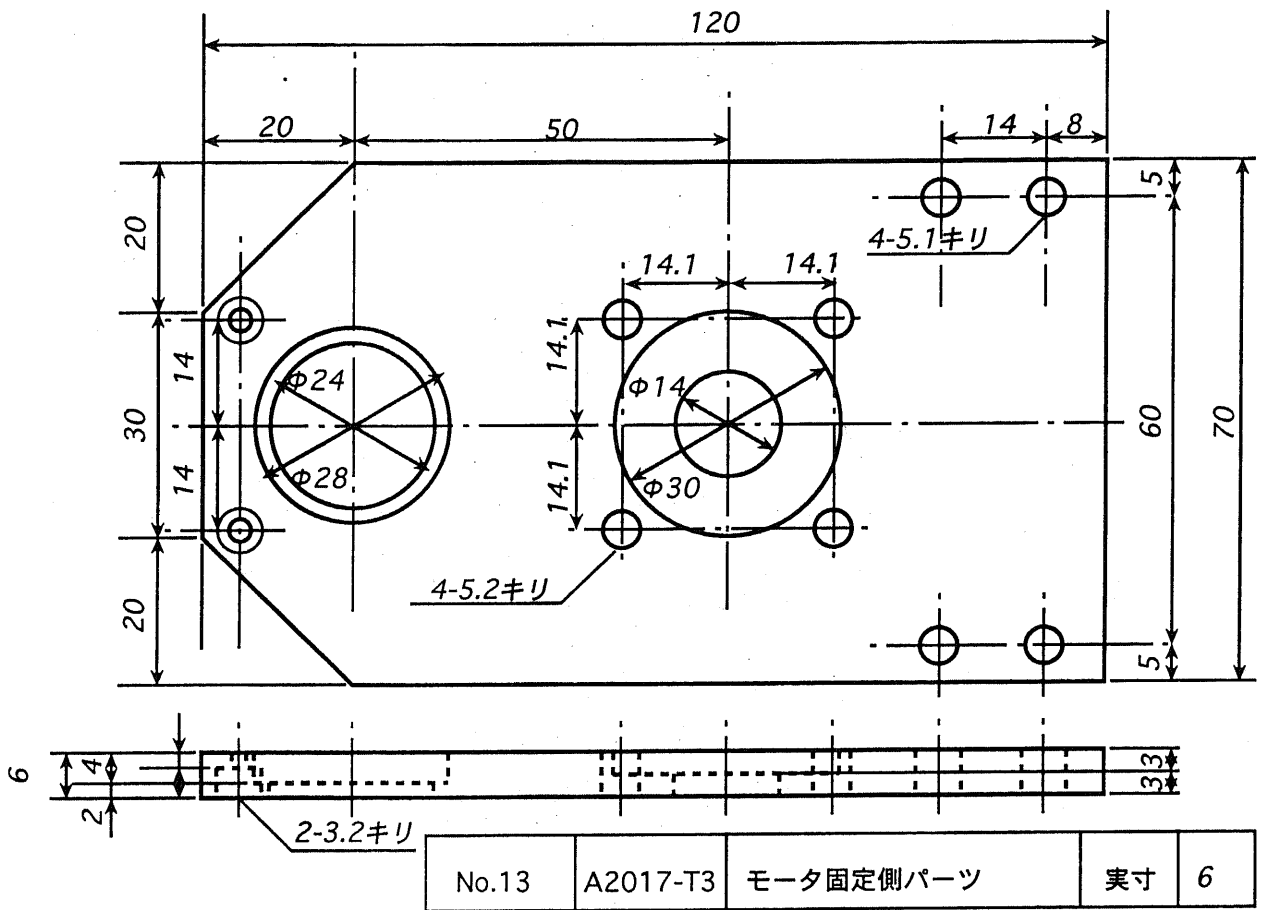
No.10	A2017-T3	胴体連結部上	実寸	2
-------	----------	--------	----	---

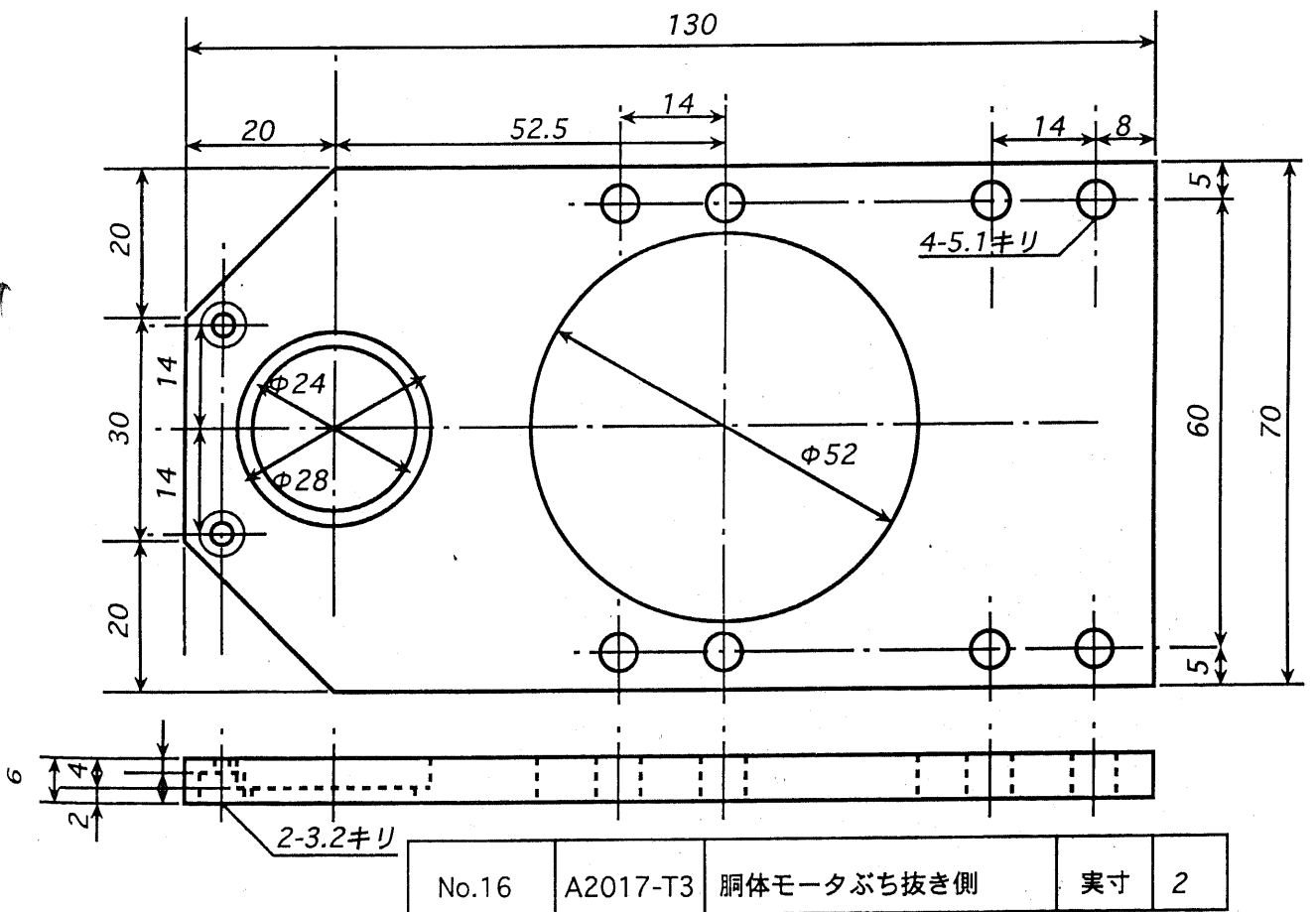
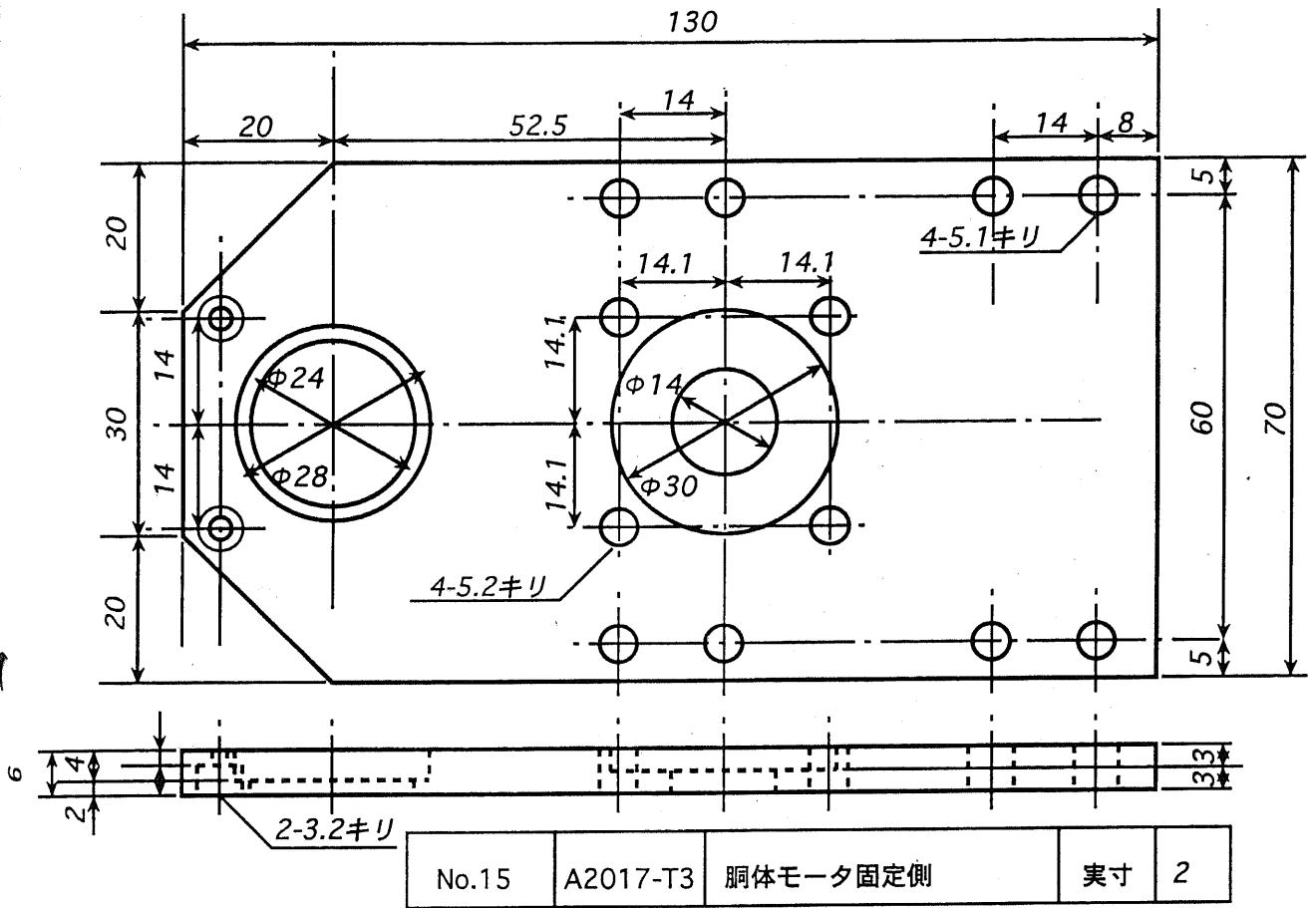


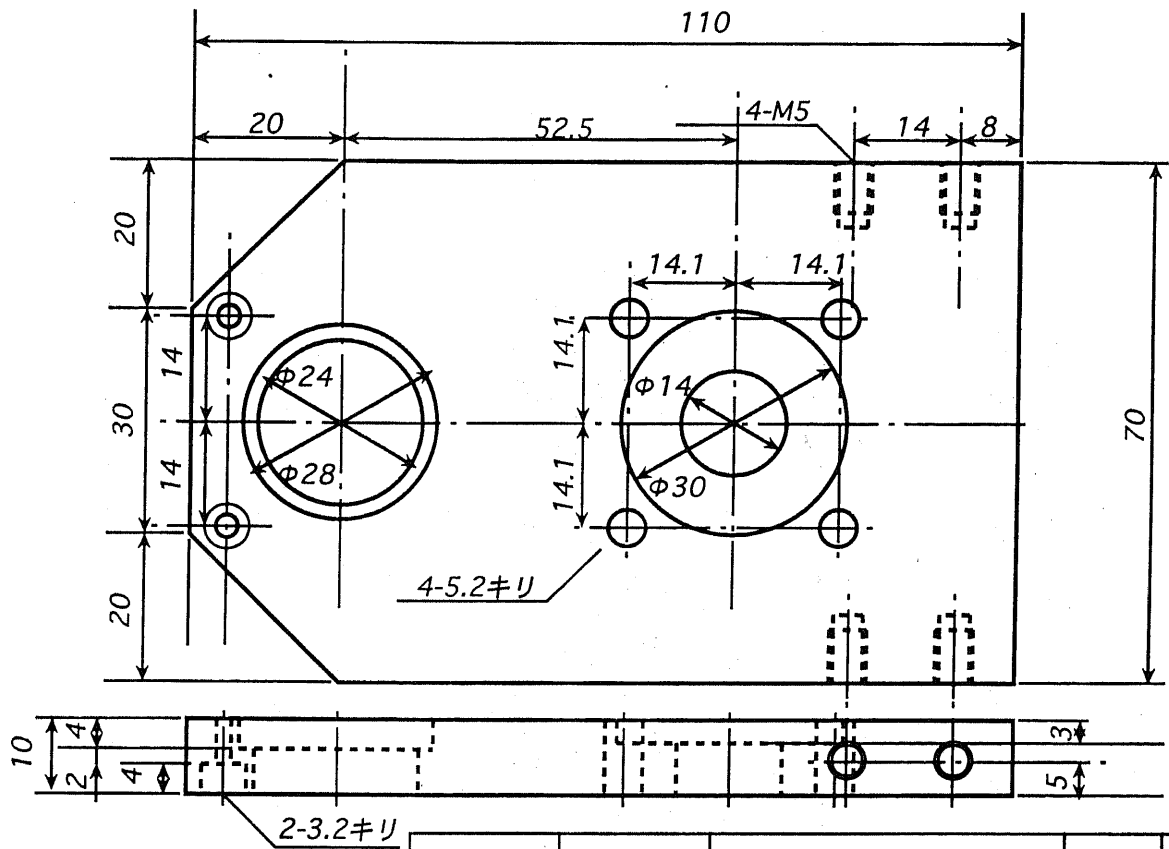
No.11	A2017-T3	ギア固定側パーツ	実寸	12
-------	----------	----------	----	----



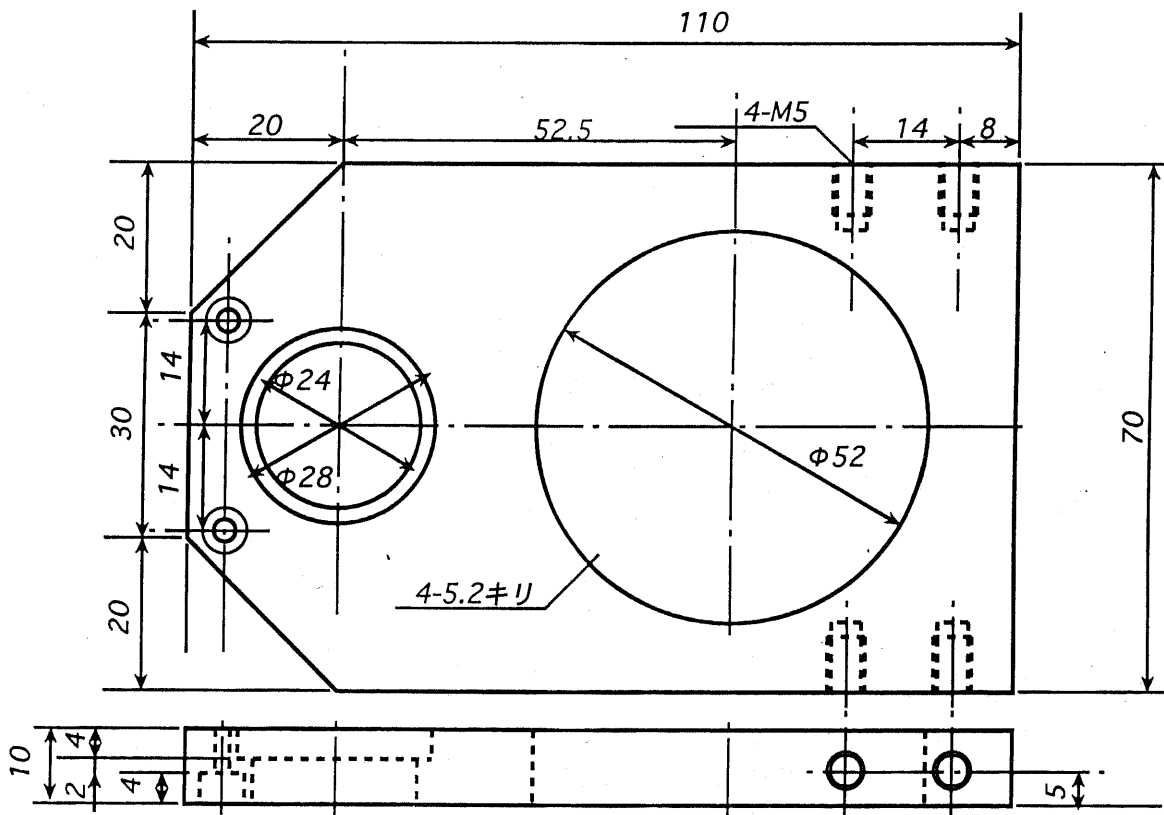
No.12	パネル板	すね・大腿部スペーサ	実寸	8
-------	------	------------	----	---





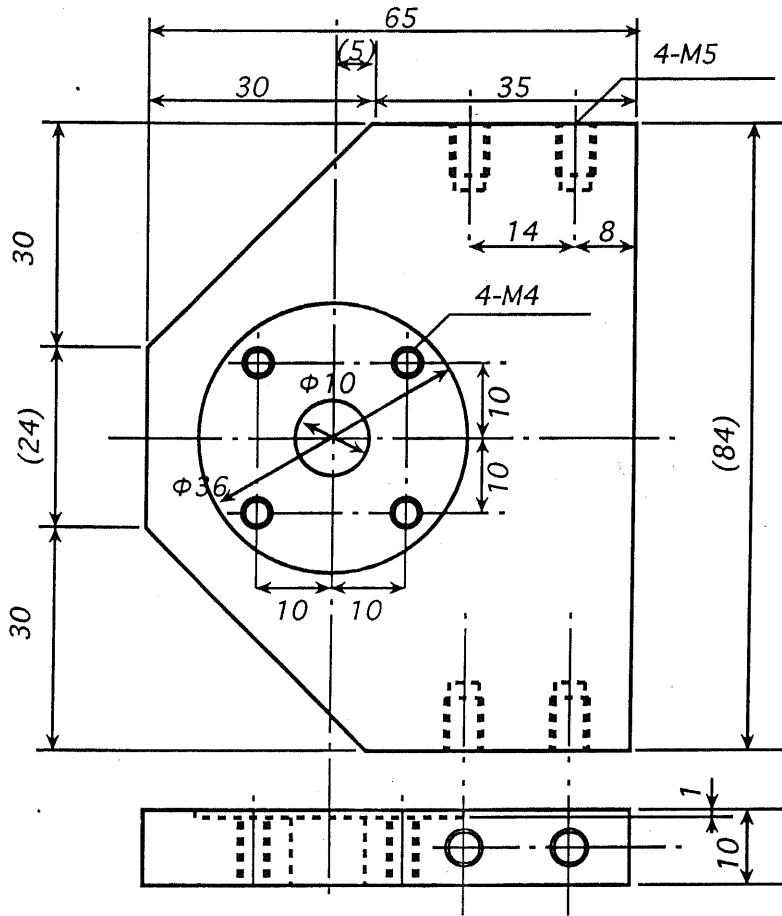


No.17	A2017-T3	足首下モータ固定側	実寸	2
-------	----------	-----------	----	---

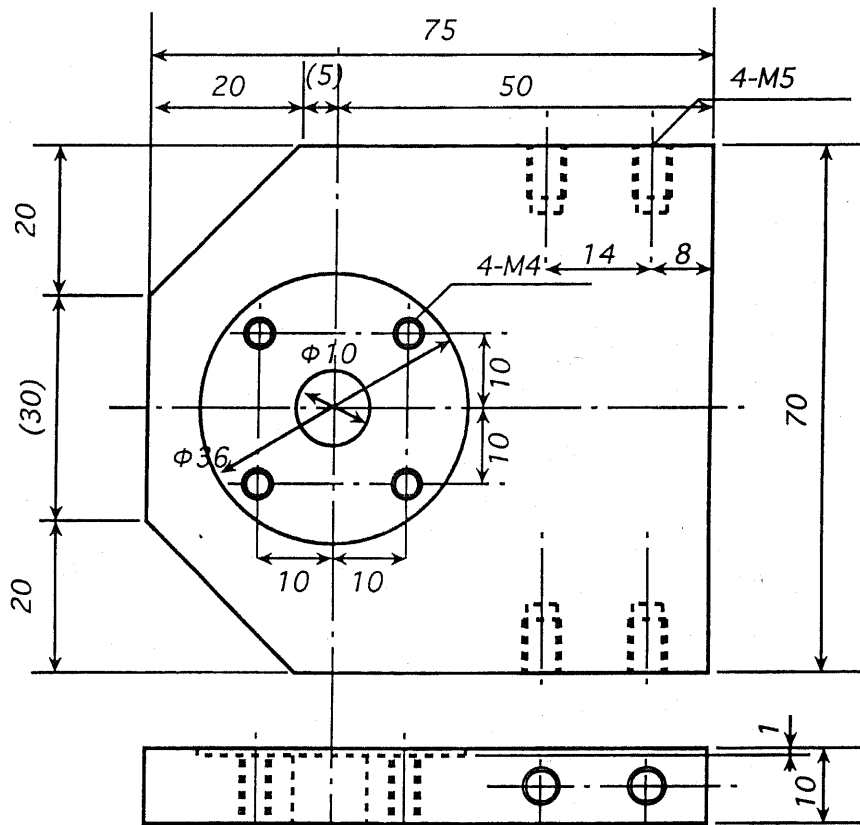


No.18	A2017-T3	足首下モータぶち抜き側	実寸	2
-------	----------	-------------	----	---

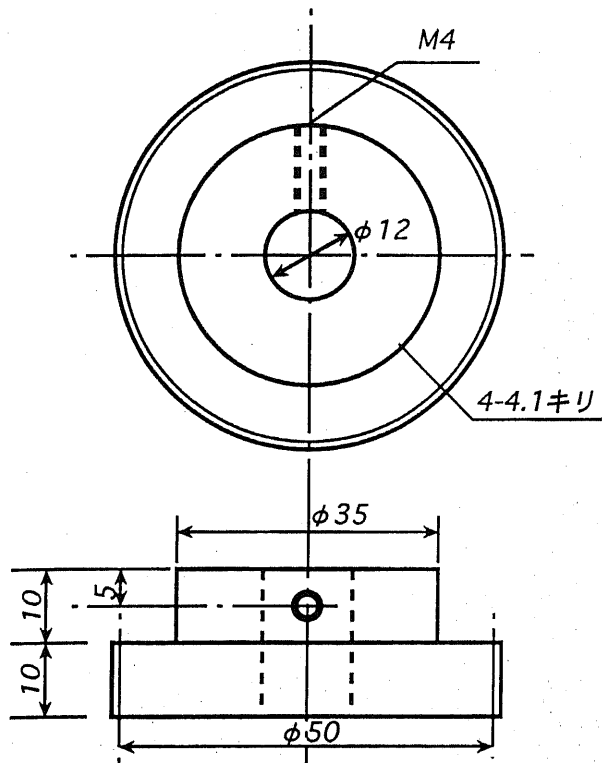




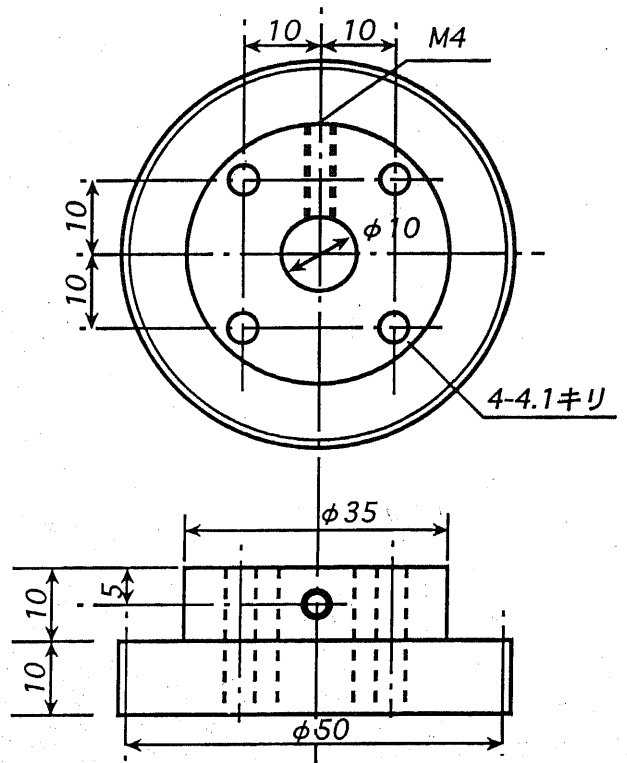
No.19	A2017-T3	足首ギア固定パーツ	実寸	4
-------	----------	-----------	----	---



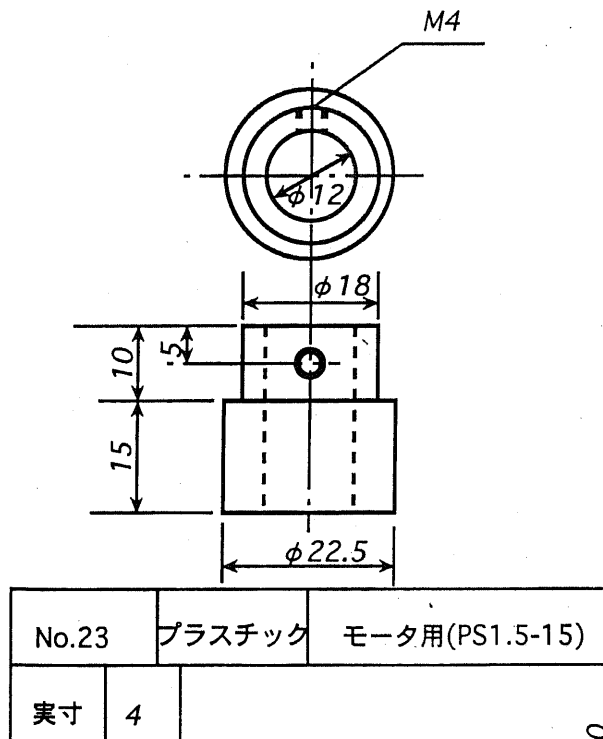
No.20	A2017-T3	胴体ギア固定パーツ	実寸	4
-------	----------	-----------	----	---



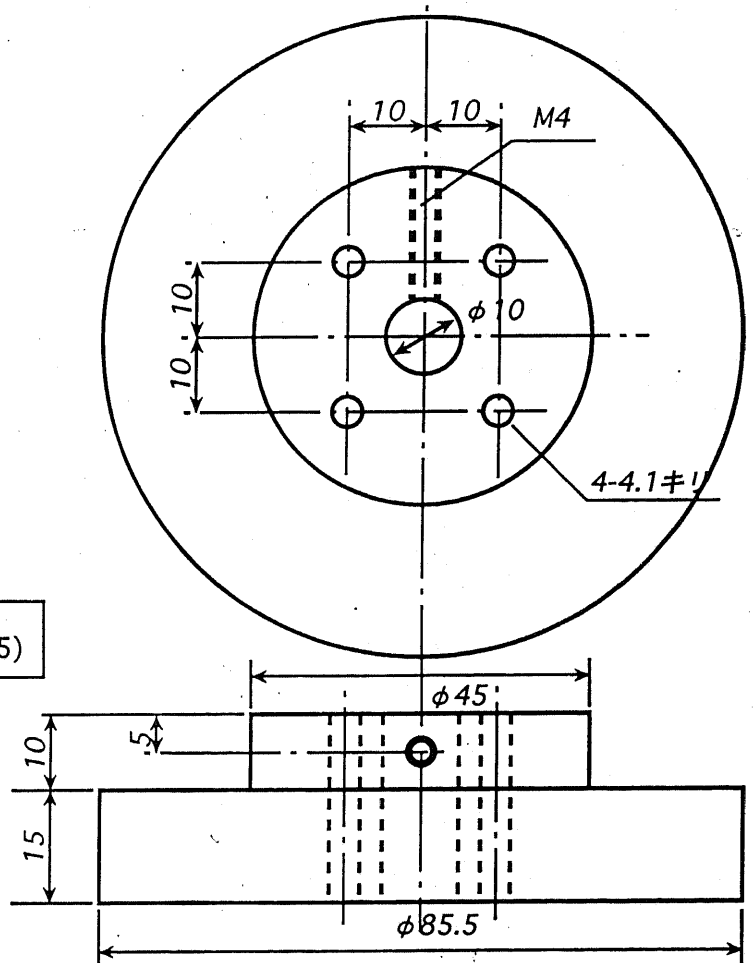
No.21	プラスチック	モータ用(PS1-50)	実寸	6
-------	--------	--------------	----	---



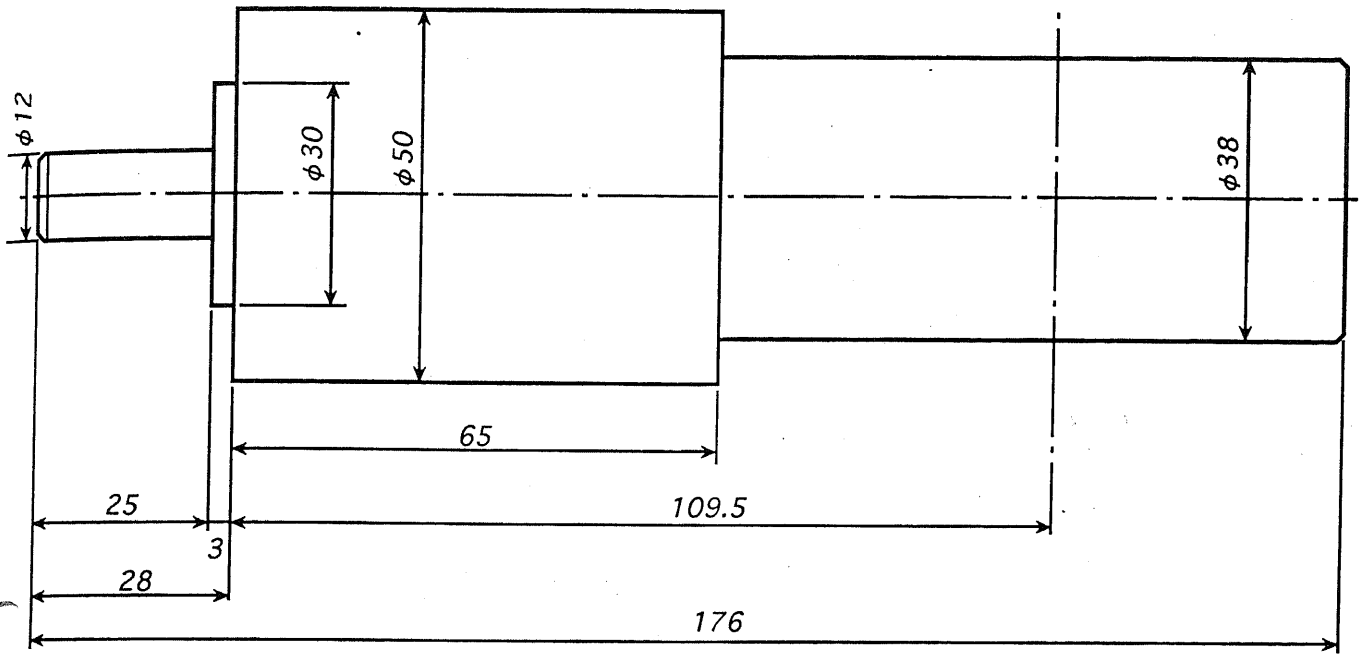
No.22	プラスチック	関節駆動用(PS1-50)	実寸	6
-------	--------	---------------	----	---



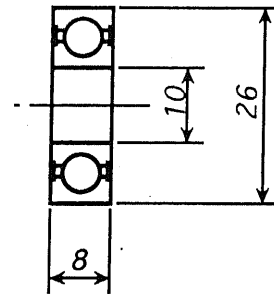
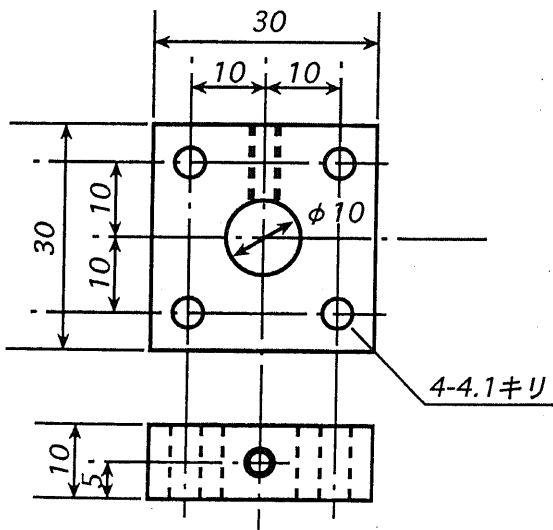
No.23	プラスチック	モータ用(PS1.5-15)	実寸	4
-------	--------	----------------	----	---



No.24	プラスチック	関節駆動用(PS1.5-55)	実寸	4
-------	--------	-----------------	----	---

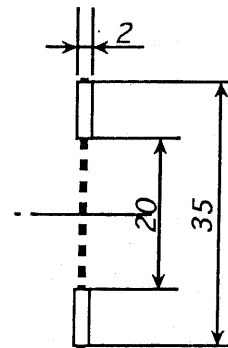


No.25	RH-14 (ハーモニックドライブ+DCモータ+エンコーダ)	実寸	10
-------	--------------------------------	----	----



No.27	6000ZZ (深溝玉軸受け) 並級	実寸	12
-------	--------------------	----	----

No.26	A2017-T3	軸・リンク固定パーツ	実寸	10
-------	----------	------------	----	----



No.28	FNTA2035 (スラスト ニードルベアリング)	実寸	20
-------	------------------------------	----	----