

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	4足歩行機械の動的歩行制御
Title(English)	
著者(和文)	米田完
Author(English)	KAN YONEDA
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第2462号, 授与年月日:1993年3月31日, 学位の種別:論文博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第2462号, Conferred date:1993/3/31, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

東京工業大学 平成 4 年度 学位論文

# 4 足歩行機械の動的歩行制御

東京工業大学 工学部 機械物理工学科

米田 完

# 目次

1. 序論	1
1.1 本研究の目的	1
1.2 本論文の背景	1
1.2.1 4足歩行機械の特徴	1
1.2.2 多足歩行機械の開発の歴史	2
1.2.3 4足歩行機械の歩容の研究	13
1.2.4 歩行機械の動的歩行の安定性制御の研究	14
1.2.5 歩行機械の接地力制御の研究	15
1.2.6 歩行機械の力計測装置の研究	16
1.3 本論文の内容と構成	16
1.3.1 従来の研究との対比	16
1.3.2 本論文の構成	20
1.3.3 本論文で対象とする機械	20
1.3.4 用語解説	20
1.3.5 記号一覧	22
2. 動的安定性の基準	26
2.1 一般的な運動計画の実現条件	26
2.2 従来の安定判別	27
2.2.1 ZMPを用いた安定判別法	27
2.2.2 ZMPの適用限界	29
2.3 新しい安定判別法	29
2.3.1 転倒安定性の導入	29
2.3.2 転倒安定性の判別方法	30
2.3.3 転倒安定余裕の評価方法	32
3. 動的歩容	34
3.1 基準動的歩容	34
3.2 静歩行との連続性をもつ動的歩容	35
3.2.1 拡張トロット歩容概念の導入	35
3.2.2 左右揺動補償軌道の導入	37
4. 動的歩行の軌道計画	41
4.1 動的安定軌道の生成法	41
4.1.1 一般的な地形の場合	41
4.1.2 階段の場合	42
4.1.3 平地の場合	43

4.2	胴体重心の左右揺動補償軌道	44
4.2.1	ウェーブ座標系の設定	44
4.2.2	前提条件	44
4.2.3	軌道の接続条件	46
4.2.4	軌道の生成	47
4.3	脚運動の連続軌道生成	49
4.3.1	前提条件	49
4.3.2	軌道の生成	53
5.	動的歩行のための接地力および姿勢制御	56
5.1	アクティブサスペンション制御の導入	56
5.2	フィードフォワード制御	57
5.2.1	2および3脚支持の場合	57
5.2.2	4脚支持の場合	58
5.3	フィードバック制御	60
5.3.1	空間インピーダンスの設定	60
5.3.2	3脚支持の場合	61
5.3.3	4脚支持の場合	62
5.3.4	2脚支持の場合	63
5.5	フィードフォワード制御とフィードバック制御の融合	64
6.	機械モデルの開発	65
6.1	直動型脚機構	65
6.1.1	直動型脚機構の導入	65
6.2.2	エネルギー効率についての考察	67
6.2.3	GDAに基づく直動脚機構の提案	67
6.2.4	直動脚の剛性、摩擦力特性	73
6.2.5	足先平行機構	73
6.2.6	直動型脚機構の特徴	74
6.2	節体幹型胴体機構	74
6.3	2段変速駆動機構	76
6.4	光学式力センサの機構	78
6.4.1	光学式力センサの原理	78
6.4.2	非線形力センサの開発	81
6.4.3	歩行機械用力センサの開発	84
6.5	機械モデルTITAN VIの仕様	84
6.6	制御系の構成	90

7. 歩行実験	95
7.1 左右揺動補償付き静動融合歩容の検証	95
7.1.1 平地直進歩行の実現	95
7.1.2 平地旋回歩行の実現	95
7.2 アクティブサスペンション制御の有効性の検証	98
7.2.1 予備実験による性能試験	98
7.2.2 平地歩行における安定性比較	98
7.2.3 階段歩行の実現	101
7.2.4 未知の不整地歩行の実現	104
8. 結論	107
8.1 4足歩行機械の制御	107
8.2 4足歩行機械の機構	108
8.3 4足歩行機械の今後の課題	109
付録 光学式6軸力センサとその軸力非線形干渉の校正処理	110
謝辞	114
参考文献	115
業績一覧	121

# 第1章 序論

## 1.1 本研究の目的

近年、ロボットの活躍の場は工場内のみでなく建設現場、各種プラント、さらに一般のオフィス、病院、また屋外へと広がりつつある。従来から工場内では据え置き型のロボットが多く使われているが、より多くの現場で作業を行なうためには、ロボット自体が移動する機能が必要になる。例えば、建設現場でのコンクリートならし作業や原子力発電所等の各種プラントにおける保守点検作業においては、作業地点を変えるために移動したり、場合によっては移動しながら作業をすることも必要である。また、山岳地での物資搬送等もロボット化が期待されている。これらの作業現場では平坦な通路のみでなく、不整地や階段での移動ができるものが望まれている。

そこで本研究ではこのような要求を満たす4足歩行機械の開発を目的とし、歩容計画、特に、動的に安定性を保持する期間を含む動的歩行(1.3.4参照)の実現法、動的歩行に不可欠な接地力制御、また、そのための力センサ系の構成法などを論じ、その有効性を機械モデルで検証する。

## 1.2 本論文の背景

### 1.2.1 4足歩行機械の特徴

不整地において高い対地適応性を発揮する移動ロボットを開発するには、その移動形態の選択を十分注意深く行う必要がある。これまでに、いろいろな形態の不整地移動ロボットが開発されてきたが、脚による移動形態は必ずしも実用性の高い形態であるとは言えない。単純に動物の形態を模倣するような不注意な設計では、移動のための駆動機構が多自由度で重くなってしまい、積載性を上げられないという重大な問題が生ずるためである。しかし、脚は以下の1)~4)に示すような脚でなければ発揮できない特有の機能もそなえている。

1) 脚の接地点は離散的であり、しかも対地適応的にその接地点を選択出来る。そのため階段の昇降、飛石を渡るような移動、地上の障害物を非接触で跨ぎ越える移動などに適する。

2) 足裏の接地面積を必要によっては大きくでき、単位足裏面積あたりの負荷荷重を低減できる。そして足裏面積が大きくても、足裏と地表とでまったくスリップを発生しない方向転換ができる。この特性があるため、砂地、生乾きのコンクリート、鉄筋メッシュ、グレーチング上などの脆弱で引っかかりやすい環境の移動に適する。

3) 脚は移動のためだけではなく静止時にも有効に利用できる。たとえば、静止して作業するとき、車輪走行型の建設機械はアウトリガーを広げて安定性を増しているが、歩行機械では脚が姿勢保持のためのアウトリガーとなり、たとえ不整地であっても安定に上体部を保持できる。また、足先を地表面に固定した支持状態で上体部を能動的に運動できる。そのため上体部に装備するマニピュレータの動作を助ける能動支持台になり得る。

4) 実用上重要なゆっくりとしているが滑らかな静的安定歩行と、振動的だが高速な動的歩行（動的に安定を保持する期間のある歩行）を自在に選択することにより状況に応じた歩行を実現できる。

これらの特性を生かすような応用を前提とし、機構設計とその制御法に十分な配慮を行えば、歩行ロボットは近い将来、十分実用的に利用できると考えられる。

なお、本研究では開発当初から4脚が歩行機械の脚の最適本数であると主張している<sup>11,15,19)</sup>。その理由は、実用上重要な静的安定歩行を実現するには常に3脚以上で支持しなければならないので、遊脚を含めて4脚以上必要であるが（ただし足の裏の面積を無視する場合）、軽量化のためには脚本数は少ないほど良いからである。そのため本論文においては4脚形態を前提にした議論を行なう。

### 1.2.2 多足歩行機械開発の歴史

ここでは3足以上を多足と呼ぶことにする。1960年以前の多足歩行機械はカムやリンク機構を使用した固定歩容型のものであった。コンピュータプログラムによって歩容が決定される最初の歩行機械は、1966年にオハイオ州立大のMcGheeによって作られたPhony Ponyであった<sup>50)</sup>。これは、Fig.1-1のような構造で、重量50kg、1脚につき2自由度で、電気ドリルのモータを使用し、正転、逆転、停止の3状態をコンピュータで指令し、歩行を実現した。1968年にはGeneral Electric社がPhoto 1-1の人間が搭乗して操縦する4足歩行機械を開発した<sup>48,57)</sup>。これは、重量1400kg、各脚3自由度で、90馬力のエンジンを搭載し、直動シリンダとクランクで油圧駆動されていた。操縦者は手と足でロボットの4脚を制御していた。これはバイラテラル制御になっており、操縦者はロボットの脚を感じる事ができた。しかし、このロボットの操縦は非常に難しく、相当の熟練を要していた。

1970年代になって、ロシアのOkhotsimskiらがアナログコンピュータによって制御されるPhoto 1-2の6足歩行機械を開発した<sup>60)</sup>。1977年、McGheeらはOSU Hexapodと呼ば

れるPhoto 1-3 の6足歩行機械を開発した<sup>54)</sup>。これは、重量140kg、各脚3自由度で、電気ドリルのモータとウォームギアで駆動し、PDP 11/70 コンピュータで制御され、傾斜センサからの信号を用いて胴体を常に水平に保つ制御を実現した。1979年には広瀬らは3次元パンタグラフ機構の脚を持つPhoto 1-4 の4足歩行ロボット PV-II を開発した<sup>13)</sup>。これは、足先のタッチセンサを用いて自動的に階段昇降を行なう最初のロボットであった。

1983年にSutherland はPhoto 1-5 の6足歩行機械を開発した<sup>62,69)</sup>。これは、18馬力のエンジンで駆動される油圧ポンプとマイクロコンピュータを搭載し、人間の搭乗できる最初の自立型歩行機械であった。1983年、Odetics 社はPhoto 1-6 の6脚移動機械 ODEX-1 を開発した<sup>64)</sup>。これは、これまでの6脚形態と異なり、脚が円周上に配置されているため、狭い場所での方向転換なども可能であり、屋内使用に適しているものであった。変形したパンタグラフ型の脚をモータで駆動し、バッテリーを搭載した自立型であった。指令は離れた位置の操縦者から無線で行なわれた。同じく1983年、機械技術研究所の中野らはPhoto 1-7 の固定歩容型6脚移動機械を開発した<sup>59)</sup>。これは、3本の脚がついた胴体が2つある形態であり、3脚の相対位置は変えられないが、アクチュエータを少なくすることができた。また、各脚は鉛直方向に大きな可動範囲をもち、胴体を水平に保ったまま、階段を登降することができた。

1984年、Raibert はエアシリンダを使ってホッピングするPhoto 1-8 の4足歩行機械を開発した<sup>63)</sup>。これは、1脚ホッピング機械の応用で、トロット歩行やバウンス歩行を実現した。1984年、オハイオ州立大のWaldron らは屋外荒れ地用歩行機械である Adaptive Suspension Vehicle (ASV) の1脚モデルによる基礎的実験を行ない<sup>74)</sup>、1985年末には全体システムを完成させた<sup>68)</sup>。これはPhoto 1-9 のように人間が搭乗して操縦し、動力源は900cc、68kWのモータサイクル用ガソリンエンジンで、18機の可変容量ポンプを駆動していた。これを各脚3つの油圧アクチュエータに直結して制御を行なった。各脚は2次元のパンタグラフ型に揺動が付加された形になっていた。重量は2700kgで最大速度は3.6m/sec であった。

1988年、日立製作所の藤江らは像や馬の歩容を参考にして動歩行を行なうPhoto 1-10 の4足歩行機械を開発した<sup>5)</sup>。これは油圧のロータリーアクチュエータを用い、ほ乳類型の脚形態であった。ただし、動歩行は平坦地直進に限られ、階段等の不整地では静歩行のみであった。1989年にはカーネギーメロン大学で惑星探査用の大型6足歩行機械が開発された<sup>45)</sup>。これはPhoto 1-11 のように円筒座標型の脚をもち、DCモータで駆



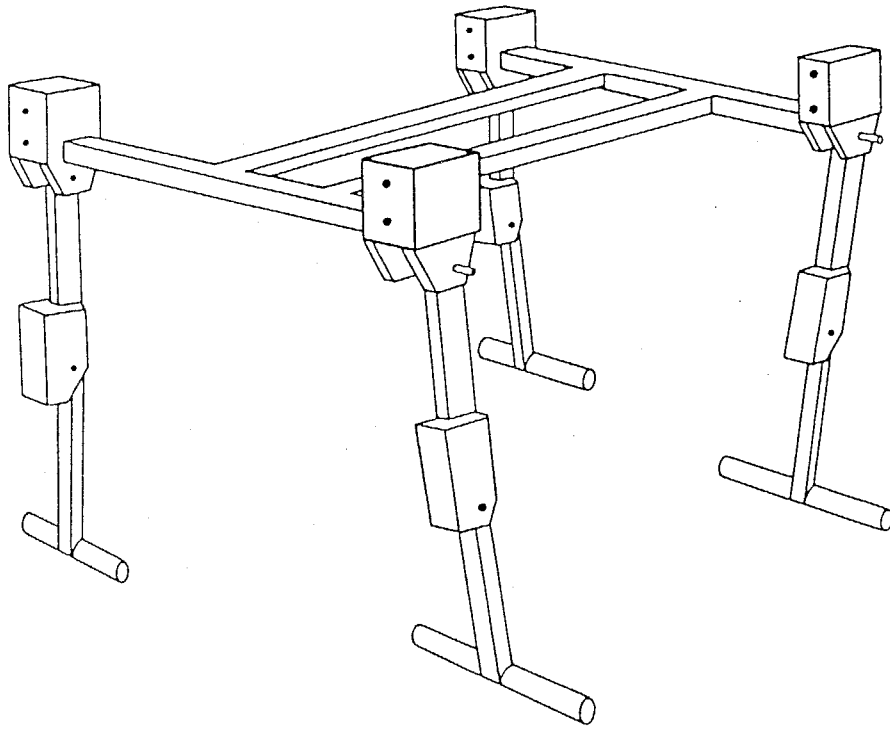


Fig.1-1 McGhee's quadruped named Phony Pony (USA,1966)  
The first walking machine controlled by a computer

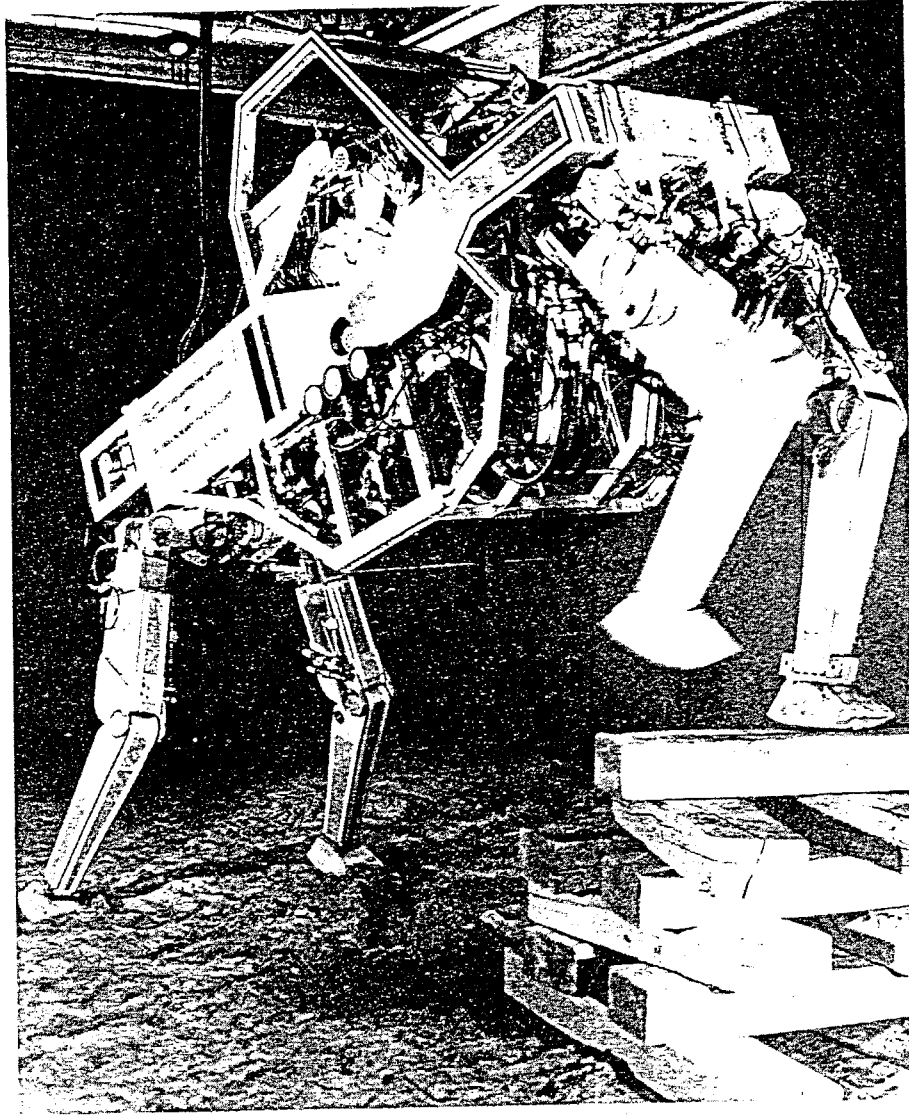


Photo 1-1 General Electric's quadruped with human operator (USA,1968)

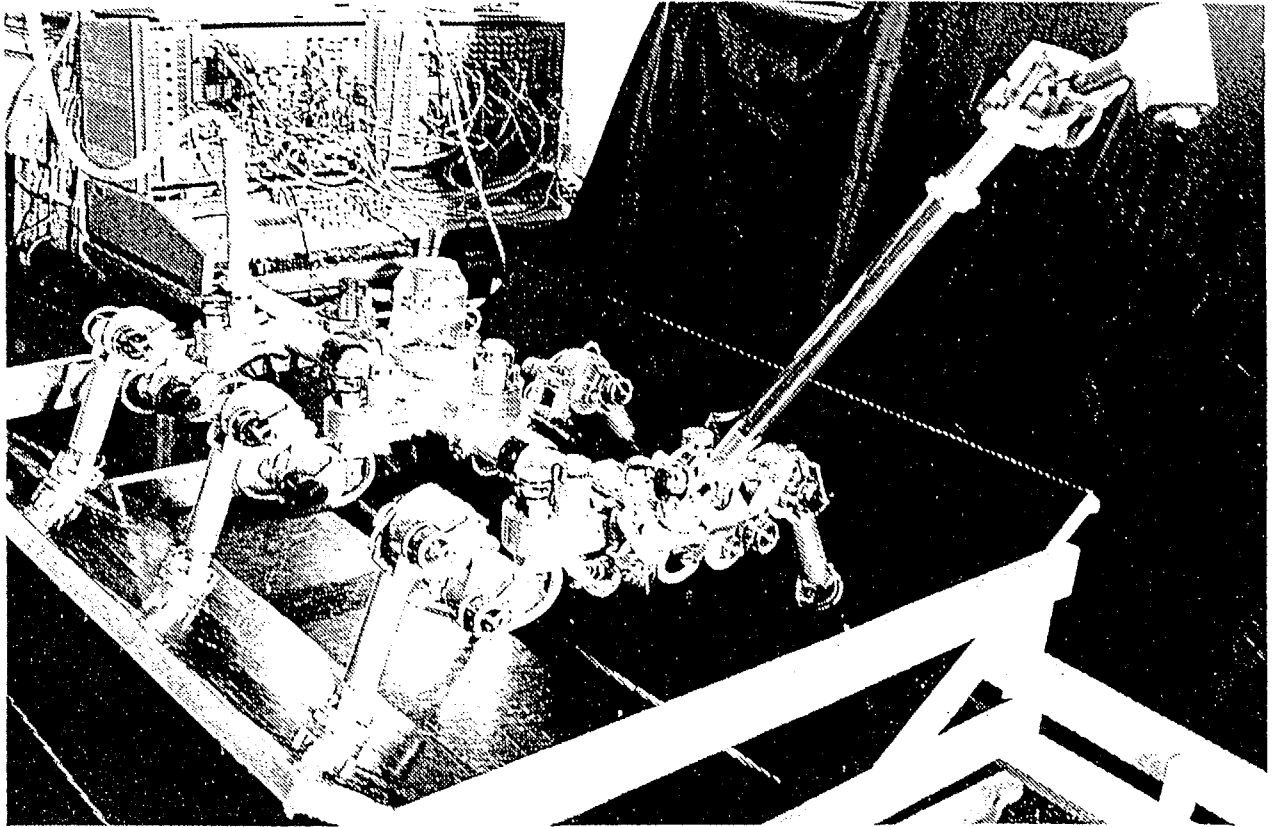


Photo 1-2 Okhotsimski's six-legged vehicle controlled by analogue computer (Russia,1970s)

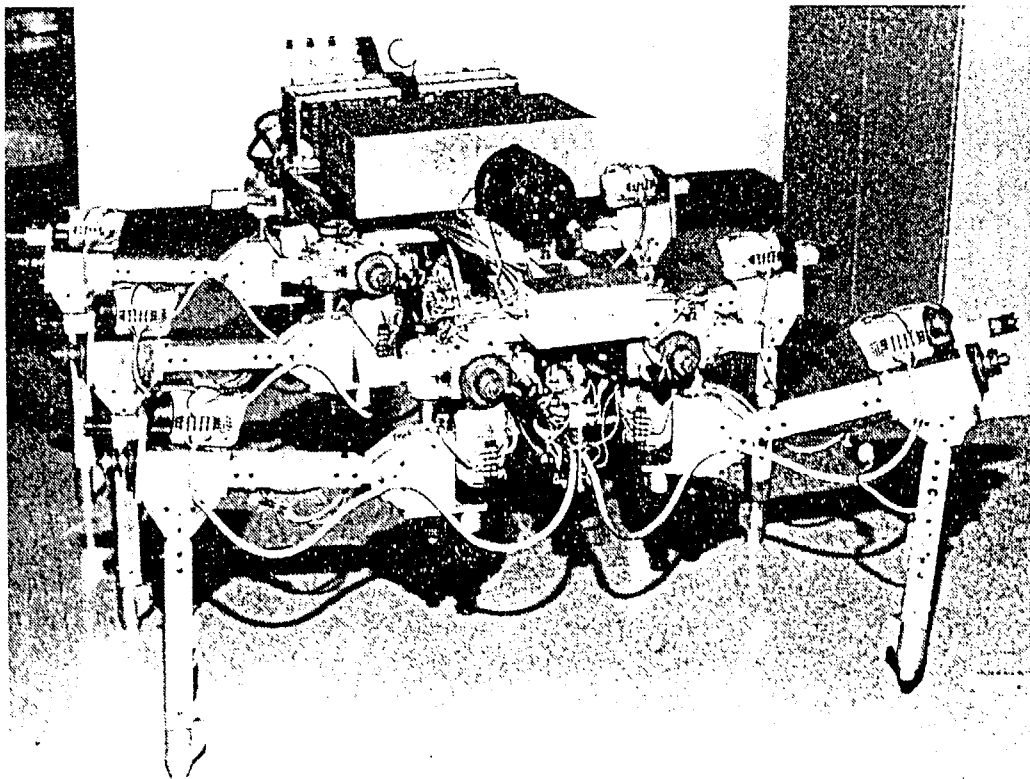


Photo 1-3 McGhee's six-legged vehicle named OSU Hexapod (USA,1977)

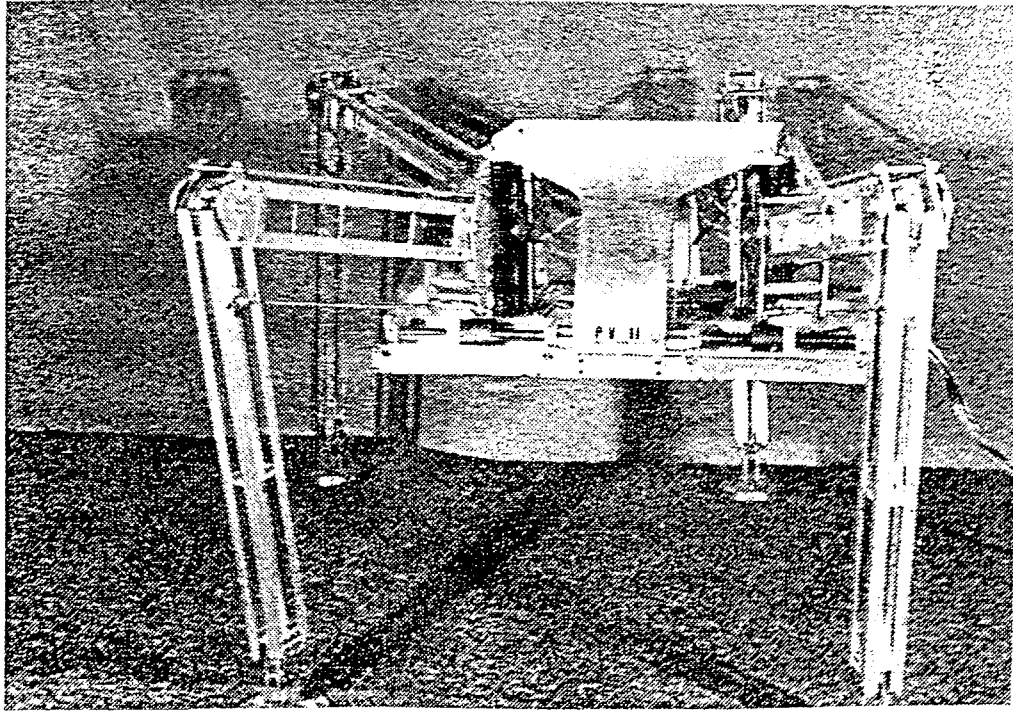


Photo 1-4 Hirose's quadruped named PV-II (Japan,1979)

The first walking machine that can climb stairs automatically



Photo 1-5 Sutherland's six-legged vehicle (USA,1983)

The first stand-alone walking vehicle.

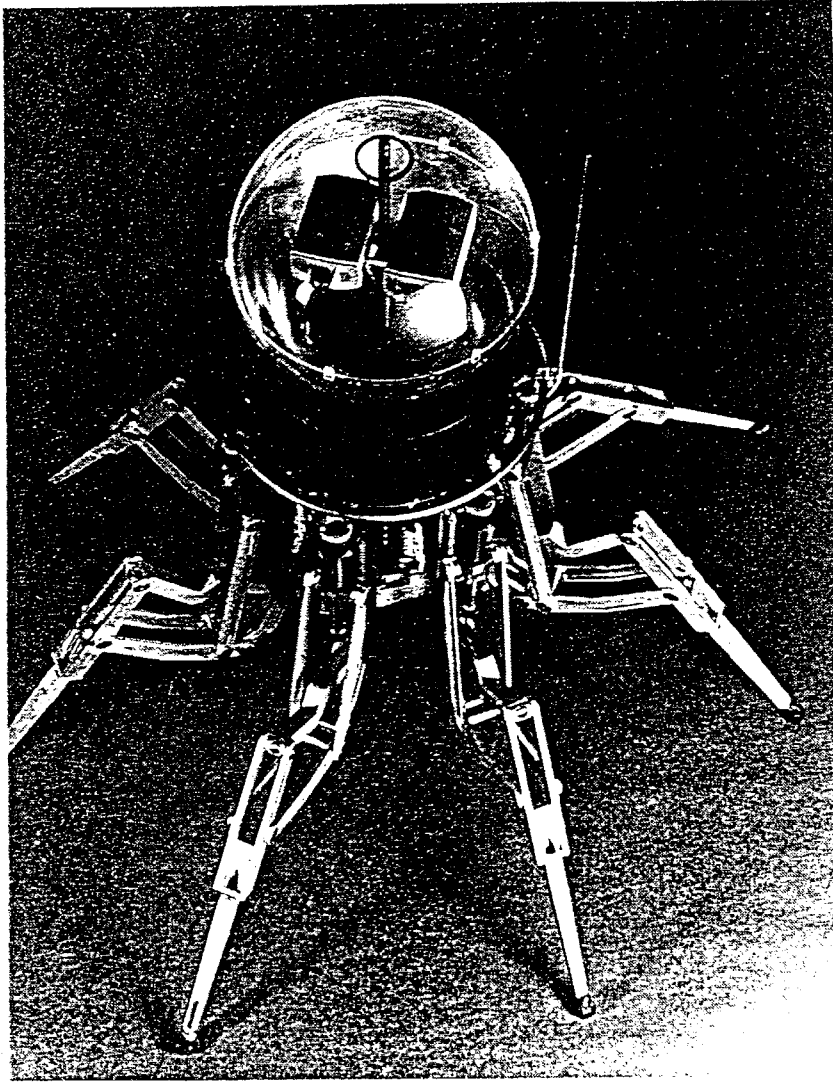


Photo 1-6 Odetics' six-legged vehicle (USA,1983)

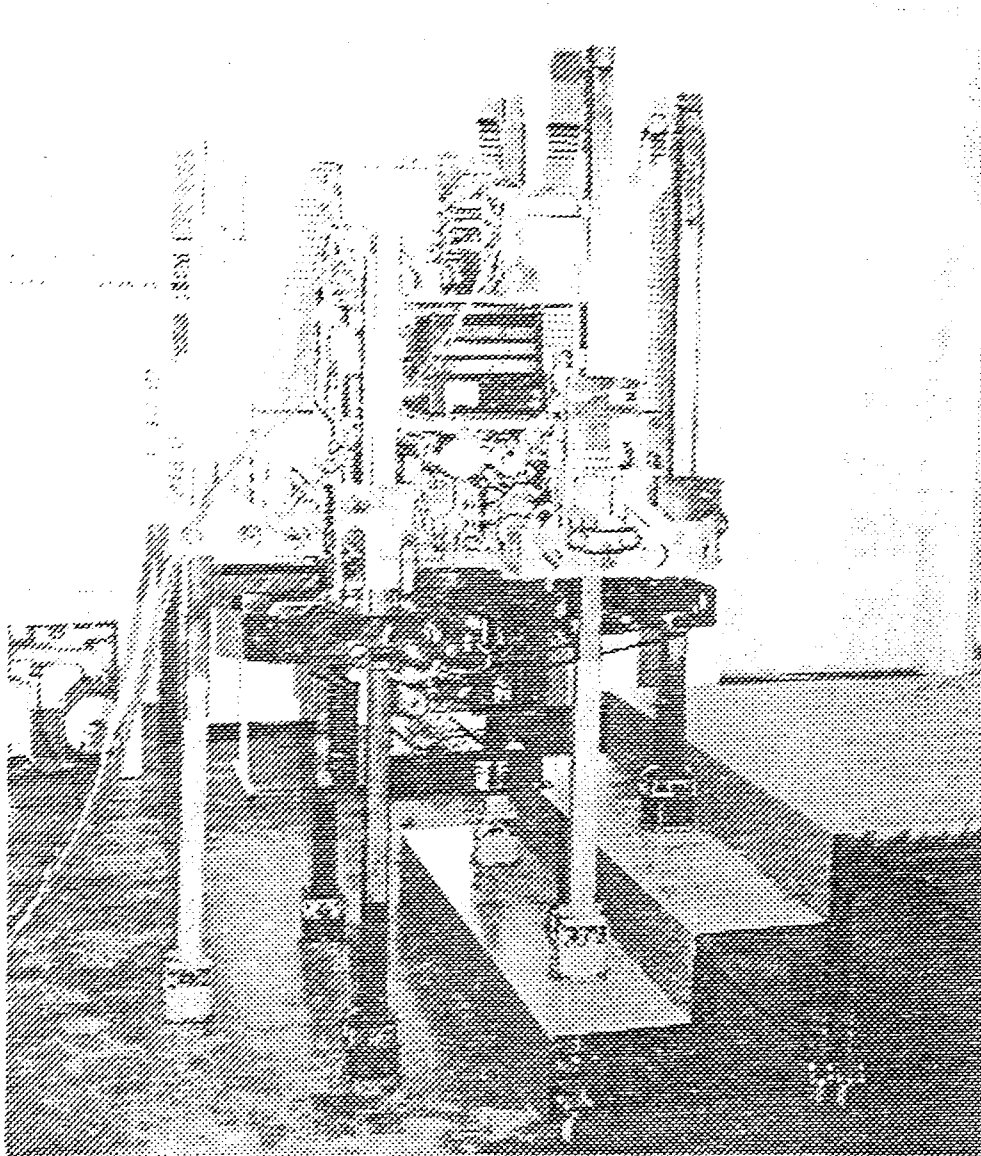


Photo 1-7 MEL's six-legged vehicle (Japan,1983)

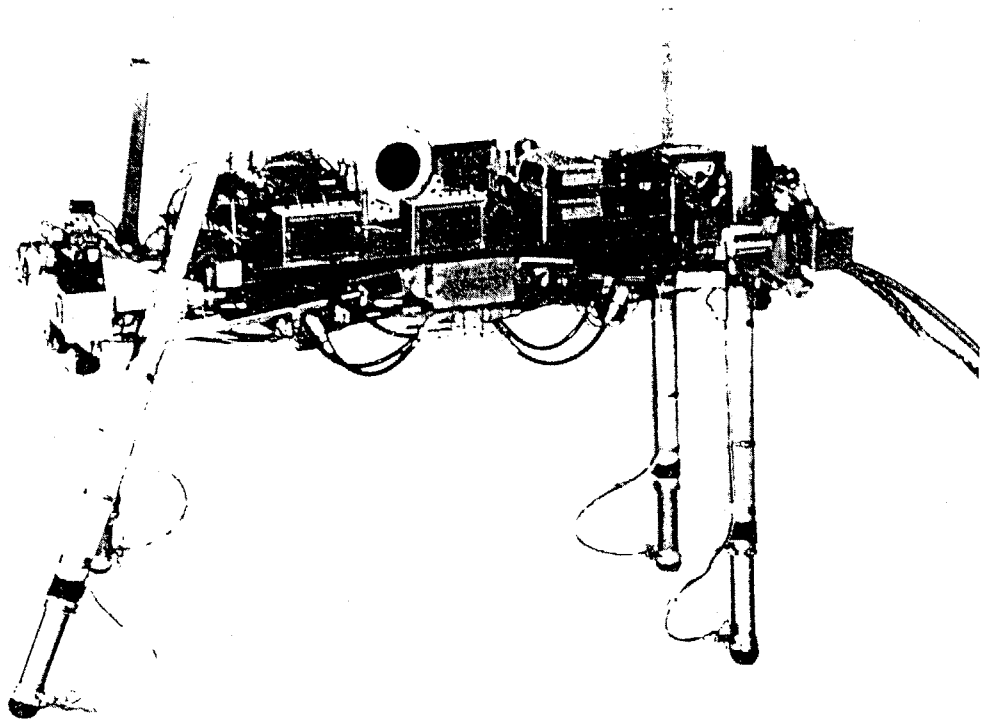


Photo 1-8 Raibert's hopping quadruped (USA,1984)

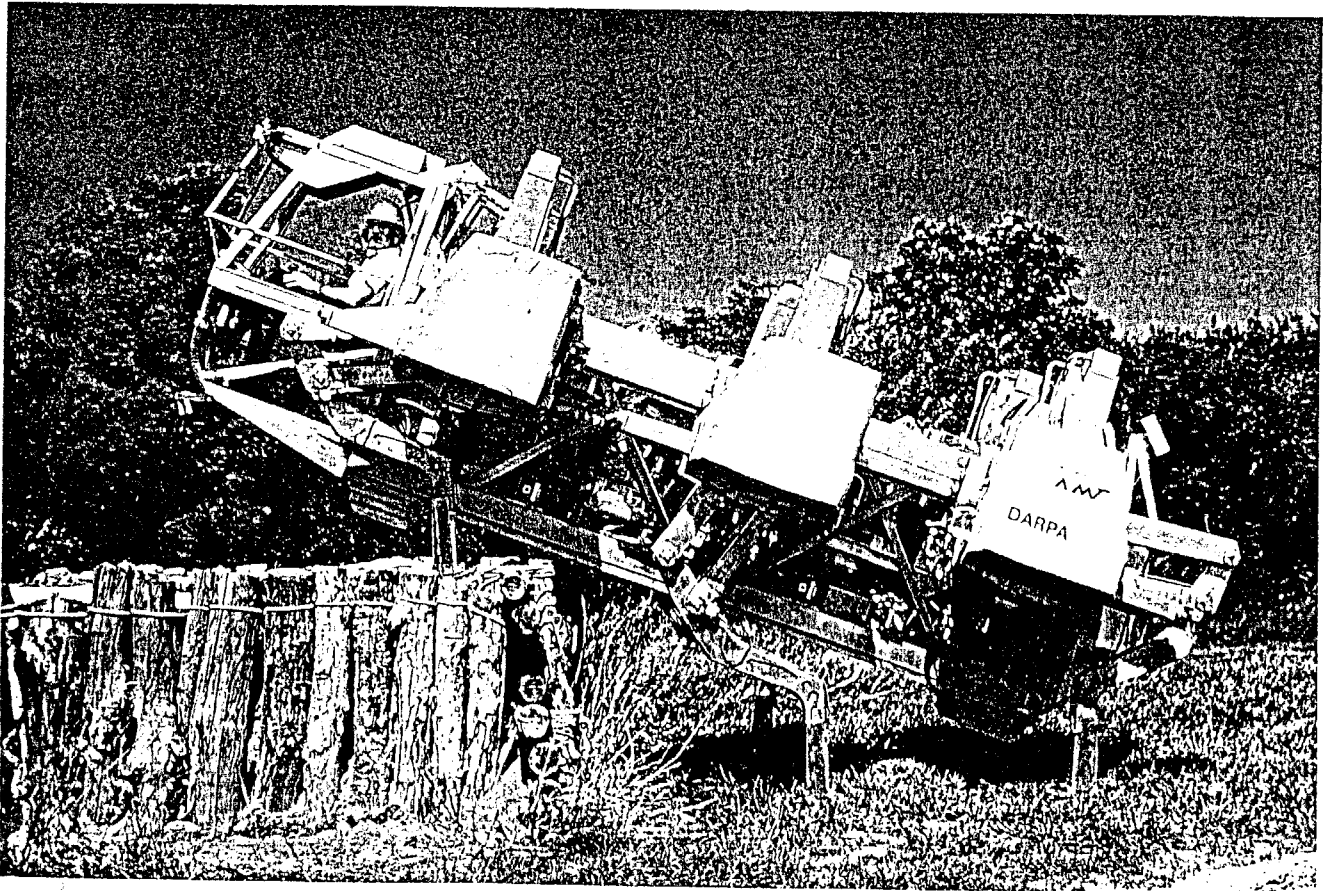


Photo 1-9 Waldron's Adaptive Suspension Vehicle (USA,1985)

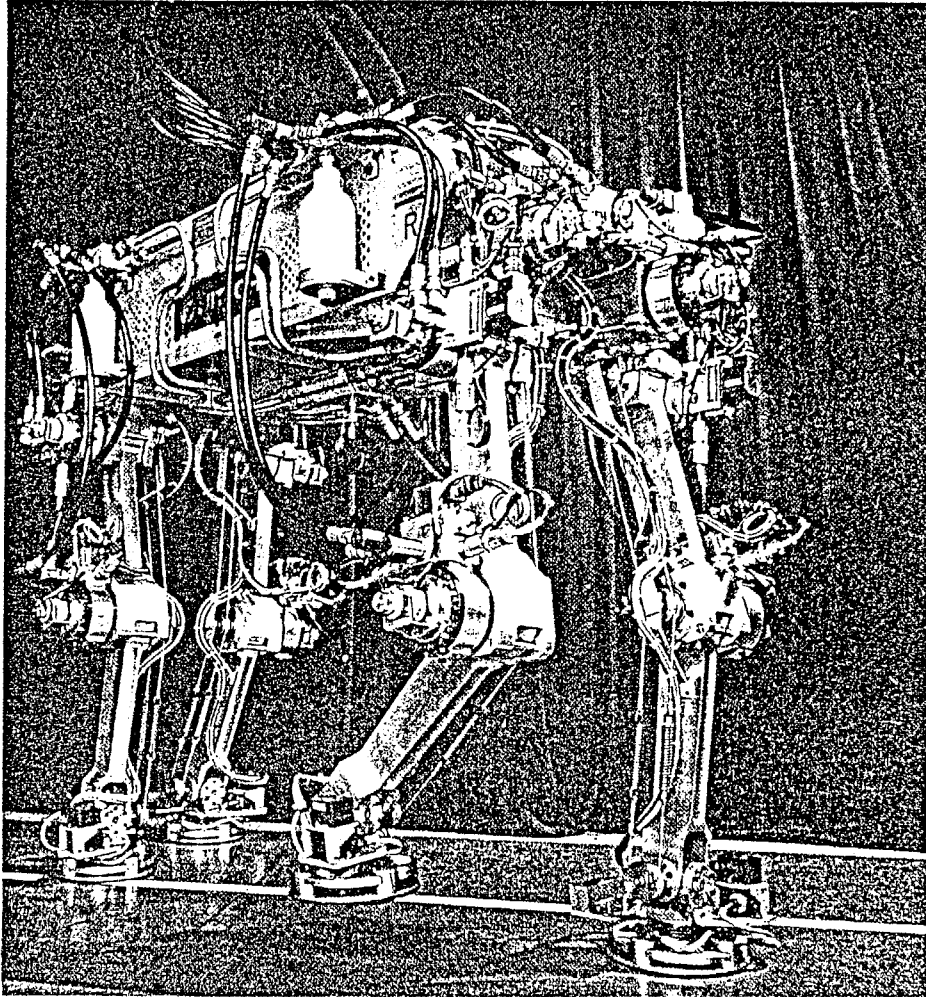


Photo 1-10 Hitachi's quadruped (Japan,1988)



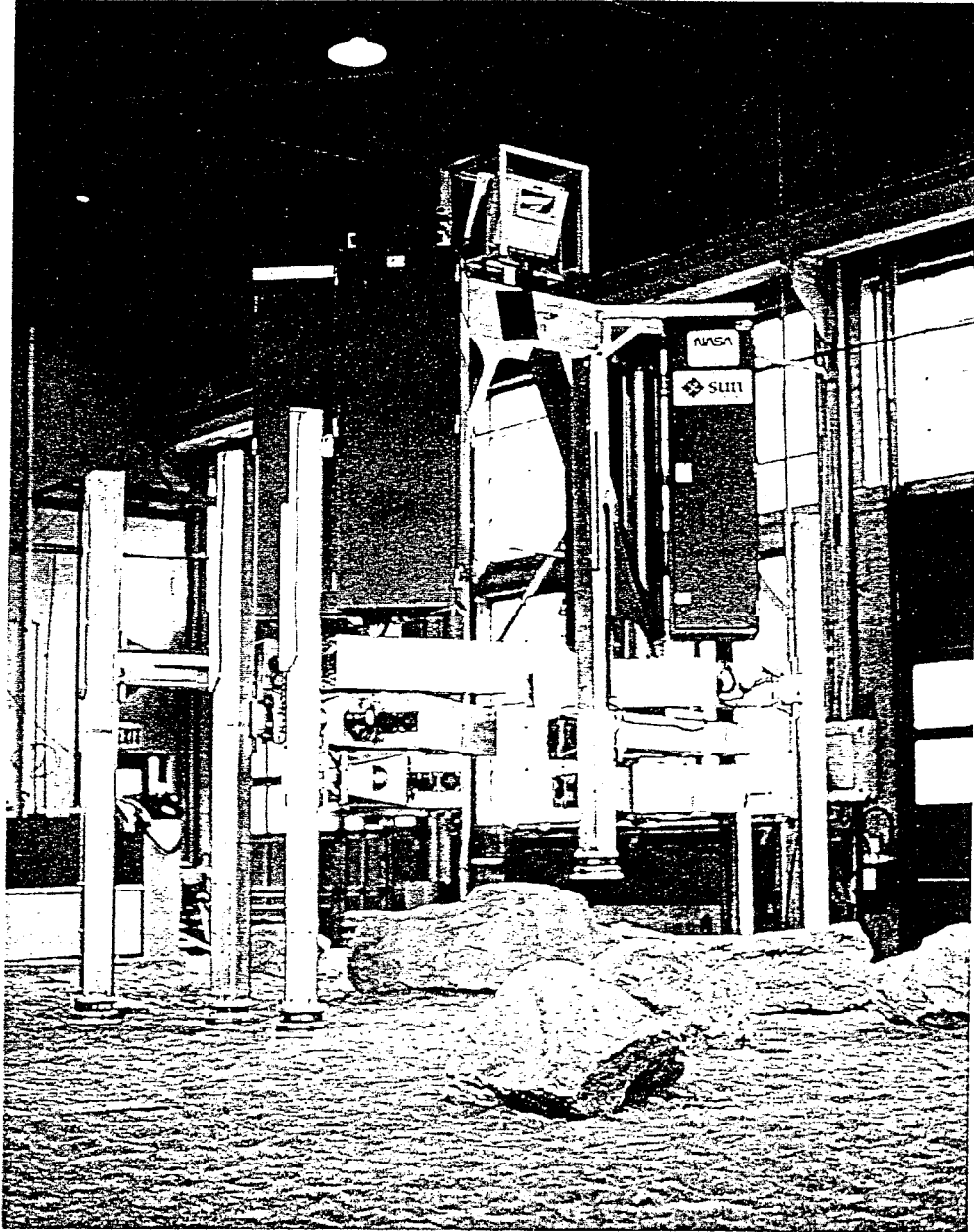


Photo 1-11 CMU's planetary rover (USA,1989)

動された。この機械の特徴は、後脚を胴体中央の隙間を通して最前脚とする歩容ができる点であった。これは、1歩のストロークを長くすることを目的としたものであった。

### 1.2.3 4足歩行機械の歩容の研究

4足歩行機械は、不整地であっても脚の伸縮により凹凸を吸収し、胴体を滑らかに移動させる機能、前後進のみでなく横方向移動や回転を組合せた様々な歩容をする機能を有することが望ましい。また、障害物を回避あるいは乗越えてゆく機能、すなわち、脚の接地点を地形に応じて自在に設定できる機能が必要である。さらに、移動速度に応じて静歩行（常に静的安定性を保持する歩行）によってゆっくりとしているが滑らかな移動を行う機能、動的歩行（動的安定性を保持する期間を含む歩行）によって振動的だがより高速な移動を行う機能を合わせ持つことが望ましい。このように、移動速度に応じて静歩行と動的歩行を自在に選択でき、不整地において障害物を回避しながら望みの方向に歩行することができれば、4足歩行機械は今後多くの分野で実用的に利用できると思われる。

従来、歩容の研究は動物学者の領域であったが、1960年代になって歩行機械のための歩容が研究されるようになった。1961年、Tomovic<sup>72)</sup>は支持脚、遊脚の概念を導入し、4脚動歩行を trot, pace, bound の3つの基本歩容に分類した。1965年、Hildebrand<sup>9)</sup>は4脚歩容を歩容線図 (gait diagram) で表現し、1968年にはMcGhee<sup>51)</sup>が、歩容についての数学的基礎を築き、stride length, duty factor, phase といった基本的な用語を定義した。また、McGhee and Frankの文献52)では、4足歩行の静的安定余裕が論じられた。さらに、McGheeらは文献53)で4脚歩容の脚を進める順序が5040通り考えられるものを対称性を考慮して45通りに整理し、その中で最も安定余裕の大きな歩容はクロール歩容であることなどを論じた。

その後、4足歩行機械の歩容制御法については、広瀬らにより、いくつかの研究が行なわれた<sup>12,13,16,18,20)</sup>。これらは支持脚の接地点を結んで作られる支持脚多角形の内部に重心の投影点が存在するという静歩行の安定制約条件を規範としたものであった。そして任意の方向への側行歩容、旋回歩容、障害物回避、階段歩行などについて論じた。また、安達らは脚に力センサを装備して、静歩行時に地面の傾斜に応じて重心を変位させる方法について論じた<sup>2)</sup>。

一方、動的歩行については、木村,下山,三浦<sup>39)</sup>、Raibert<sup>62)</sup>、佐野,古荘,岡島<sup>65)</sup>による

先駆的な研究が行なわれた。木村らは trot, pace, bound の3つの基本歩容について、一定速度で直進歩行する場合の歩行周期、移動速度、移動エネルギー等について論じ、trot とpaceについては、実際に機械モデルによって実現した。Raibertは1本足のホッピングマシンの研究の発展形として4足歩行を論じており、機械モデルによって trot と bound 歩容を実現した。また、佐野らは、いくつかの仮定のもとに支持脚切換現象を定式化し、滑らかな脚切り換えについて論じており、実際に機械モデルによって trot と pace を実現した。

しかし、これらはいずれも静歩行あるいは一定速度の動歩行のみについての考察であり、連続的な移動速度の変化を可能にするような歩容に関する研究はまだ行なわれていない状況にある。また、平地の直進歩行のみでなく、任意の曲線軌道をたどる歩容や不整地での歩容については、広瀬ら<sup>20</sup>が静歩行について考察しているのみで、動歩行については全く論じられていないのが現状である。

#### 1.2.4 歩行機械の動的歩行の安定性制御の研究

歩行機械が転倒することなく安定して歩行を継続できるためには、脚の接地位置や胴体の運動を適切に制御しなくてはならない。静歩行の場合には、支持脚の接地点を水平面に投影した点を結んで作られる多角形（支持脚多角形と呼ぶ）の内部に重心の投影点が存在することが、安定の条件である。しかし、動的歩行においては、この安定条件は使えないため、各研究者が様々な方法で安定な動的歩行の実現を試みてきた。

Raibert<sup>62</sup>)はホッピングによる4足歩行について論じ、ホッピングの高さ、胴体姿勢、前進速度の3つに分けて制御を行なった。また、佐野ら<sup>63</sup>)はゲインの高い位置制御だけでなく自由回転や定電流の制御モードを取り入れることで滑らかな歩行を実現した。

一方、動的歩行の研究は2足歩行ロボットについて数多く行なわれた。三浦、下山<sup>56</sup>)は2足歩行の安定制御に現代制御論を適用し、位置と速度の位相空間を考え、着地点の変更によって運動を収束させる手法をとっていた。有本<sup>3</sup>)は運動を速いモードと遅いモードに分けてそれぞれの安定性に注目し、各関節ごとのローカルフィードバックで速いモードを安定化し、左右に運動する錘を用いて遅いモードを安定化する制御を試みた。また、古荘<sup>7</sup>)や佐野、古荘<sup>66</sup>)は、支持脚の足首回りの角運動量に注目し、足首トルクによる蹴りの効果を制御して歩行の安定化を試みた。

1972年、Vukobratovic and Stepanenko (は文献73) で、歩行機械が床から受ける力をモーメント無しで代表できる点であるZMP(zero moment point)の概念を提案した。これ

は歩行機械の運動を計画した際に、その運動が安定して実行できるかどうかを判別できるものである。これを用いて高西らは文献71)で2足歩行ロボットが階段を昇る軌道の安定判別を行なった。

また、近年ではMulti-body dynamicsの運動解析ソフトが普及し、これによって運動計画をチェックすることができる。例えば、文献10)では4足歩行機械の軌道と倒れ込み運動との関係を解析している。しかし、このようなシミュレーションによる方法では運動計画そのものを立案することはできないという問題を残している。

### 1.2.5 歩行機械の接地力制御の研究

歩行機械が不整地上で安定な歩行を行なうためには各脚の力配分を制御し、凹凸地形でも浮いたりせず均等な接地力を得るとともに、滑りや転倒を防止しなければならない。このような接地力制御については従来から6足歩行機械についての研究が行なわれてきた。Klein and Briggsは文献40)で各脚をアクチュエータによってアクティブにコンプライアンス制御した。Orin and Ohは文献61)で脚の数が力の釣り合い条件式より多い場合の不静定問題について、最大接地圧を最小化するように線形計画法を用いた。これに対し、Kleinらは文献41)で、より計算の速い疑似逆行列を用い、各脚の接地圧の自乗和の最小化を計る制御を導入した。さらにKleinらは文献42)で、無限に存在する解の中で現在発生している力に最も近いものを採用することで、連続的で滑らかな力指令値を生成する手法を導入した。また、デジタル制御のサンプリングが遅い場合には脚の相互干渉によって発振することをシミュレーションで解明し、力が冗長な数の脚については位置制御を行なうのが有効であると論じた。また、Waldronは文献75)で脚の力を外部力と内部力とに分けて取り扱い、内部力を調整する方法について論じた。金子,谷江,堀内は文献37)で柔らかい路面での脚の沈み込み量を計測し、自重支持のための接地力を確実に発生させ、安定した歩行を実現した。Shih, Frank, and Ravaniは文献67)で各ジョイントにコンプライアンスを持たせた場合の脚相互の干渉について論じた。さらに、Klein and Kittivatcharapongの文献43)では、脚相互のつっぱり力のような内部力を調節して接地点での摩擦力の限界であるfriction cone内におさめる方法を論じた。Gorinevsky and Shneiderは文献8)で各脚をアクティブコンプライアンス制御し、柔らかい地面の場合も沈み込み量を制御するなどして、不整地での安定した歩行を実現している。また、力指令値の連続性を確保するために、不静定となる期間の力指令値を前後の期間の線形補完で生成する方法も論じられた。

これらの研究ではいずれも6足歩行機械の静的な力の配分について論じられており、4足歩行機械の動歩行の際の力制御については全く検討されていないのが現状である。

### 1.2.6 歩行機械の力計測装置の研究

歩行機械の接地力を制御するためには力センサが不可欠である。歩行機械に装備する力センサについては、従来から様々な研究が行なわれている。高西ら<sup>70)</sup>は2足歩行ロボットの油圧シリンダの側面に歪ゲージを張り付けて内圧による変形を計測し、作用力を算出した。佐野,古荘ら<sup>66)</sup>は2足歩行ロボットの関節駆動用ベルトの張力差によってたわむ部材<sup>38)</sup>を取付け、この変形を歪ゲージで計測し、足首トルクを算出した。また、安達ら<sup>1)</sup>は脚先端にたわみ部分を設け、ホール効果による変位センサを使用して力を計測した。しかしいずれも分解能が限られているので、自重を支える大きな力を計測するように設計すると、接触力程度の小さな力を計測することは難しいという問題を残していた。

以上の研究では、いずれも1方向の力のみを検出していたが、不整地歩行の制御においては3軸方向の力と3軸回りのモーメントを計測できることが望ましい。このような6軸力センサは文献<sup>85,46,6)</sup>で開発され、市販されているものもある。そして、李,高西,加藤<sup>47)</sup>は市販の歪ゲージ方式の6軸力センサを2足歩行ロボットの足首部分に装備して外乱に対応した動的歩容を行なった。しかし、市販されている6軸力センサは構造が複雑で重いという欠点がある。また、複数の軸力が同時加わった場合の干渉についての補正が不十分であり、精度が低いという問題を残していた。

## 1.3 本論文の内容と構成

### 1.3.1 従来の研究との対比

本論文では、以上のような研究の現状をふまえ、動的安定性、動的歩容、不整地歩行のための制御法などについて検討する。以下にその概要を示す。

はじめに動的歩行の安定性について論じる。前述のように、従来の4足歩行機械の動的安定制御の研究<sup>39,62,65)</sup>では平地での基準動歩行しか行なっていなかった。また、これらの制御法はいずれも胴体の運動が振動的であり。物資搬送などの実用的な使用には適していないものであった。一方、文献<sup>71)</sup>の2足歩行機械の研究で述べられているZMP<sup>73)</sup>を使った安定歩行軌道生成法は、4足歩行機械にも適用することができる。この方法では、歩行機械の多くの自由度のうち、脚先の位置、胴体の高さなど、いく

つかの自由度の運動はあらかじめ任意の軌道に設定した後、残りの自由度の運動を計算して適切に設定することで安定性を確保することができる。このため、胴体の上下動、回転といった物資搬送に適さない運動はおこさないようにあらかじめ設定することが可能であり、4足歩行機械をより実用的なものとすることができると考えられる。しかし、本論文では、このZMPの概念は水平面上を移動する場合にのみ有効であり、不整地には適応できないことを指摘し、新たな安定判別基準を導入する。これは凹凸のある不整地はもちろん、壁や天井も含んだ3次元地形を移動する吸着ロボットにも適応できる一般性の高いものである。

次に歩容、特に移動速度に応じた脚の進め方について論じる。従来、4足歩行機械の歩容制御法は、静的歩行に関しては広瀬ら<sup>11-20)</sup>が論じている。一方、動的歩行に関しては、木村,下山,三浦<sup>39)</sup>、Raibert<sup>62)</sup>、佐野,古荘,岡島<sup>65)</sup>の研究があるが、いずれも一定速度で直進する基準歩容について論じられている。移動速度を自在に設定できるようにするためには、静歩行と動的歩行の両方を連続して行なわなくてはならない。なぜなら、静歩行では脚を振り出す速度に対して移動速度が低いため、脚の動作速度の限界によって速度の低い歩行しかできない。一方、動的歩行では、静的に不安定な状態を長く維持することはできないので、速度の低い歩行は歩幅の小さい、振動的な歩行になってしまい、好ましくないからである。

静歩行と動的歩行を切り換えることは一見簡単に思われる。しかし、歩容を替えながら歩行速度を連続的に変化するには、離散的なシーケンス運動である脚運動を接地面との不要なスリップを生成しないように正しいタイミングで切り換えてゆくことを必要とし、それほど簡単ではない。そこで本論文では、静歩行と動的歩行を融合した新しい歩容概念を導入し、静歩行と動歩行を融合した歩容の生成法をできるだけ体系的に論ずることとする。はじめに、4足歩行機械の動的歩行を実現するためには、トロット歩容に基づく動的歩容の生成が望ましいことを指摘し、クロール歩容とトロット歩容を統一的に表現できる拡張トロット歩容の提案、および、あらかじめ動力学計算を行なってフィードフォワード的に胴体重心の軌道を修正する左右揺動補償の提案を行う。

次に、動的安定性を確保するための軌道計画について論じる。従来の研究では、安定条件によってすでに計画された軌道の安定性を判別することはできるが、安定性が確保できる軌道を生成する解析的な方法は見いだされておらず、数値計算が必要であった。このため、リアルタイムで軌道計算を行なうことが難しく、センサを用いた障

害物回避など、その場での応答に支障があった。そこで、本論文ではある程度の近似を行なうことによって解析的に計算が可能な軌道生成アルゴリズムについて論じる。ここで用いる安定条件は従来のZMPによるものではなく、本論文で新たに導入した不整地に対応した安定条件である。

また、動的歩行の際の高速脚運動の軌道計画についても検討する。これは、脚のダイナミクスを考えて、胴体運動とは独立に絶対座標系上で生成され、後に胴体座標系に変換される。

次に、不整地歩行のための制御法について論じる。従来の研究では、4足歩行ロボットの不整地歩行については広瀬ら<sup>20)</sup>によって論じられている。しかし、これらは静歩行の場合についての考察である。一方、動的歩行の制御についての従来の研究<sup>39,62,65)</sup>はいずれも平坦地の場合の考察しか行なわれておらず、これらをそのまま不整地歩行に適用させることはできない。

また、これまでに6足歩行機械について不整地においても滑らかな脚の接地を得るための制御法についてはいくつかの研究<sup>8,40,41,42,43,67,61,75)</sup>が行なわれている。これらのうち、アクティブコンプライアンスの概念、滑らかな接地力変化を得る方法、不静定な力の設定方法など、一部は4足歩行機械にも適応できる。

また、不整地歩行中は胴体姿勢を計測して常に水平に保たなくてはならない。静歩行の場合の胴体姿勢制御は、4足歩行機械については文献20)で、6足歩行機械については文献37), 8)などで行われているが、いずれも動的歩行については行なわれていない。静的歩行では常に3脚以上が接地しているのに対し、動的歩行では2脚支持期間を含むため、制御できない方向が生ずることを考慮しなくてはならない。また、3脚支持中でも、そのうちの1脚は接地力が微小である場合が多いので、これも考慮する必要がある。さらに、従来の姿勢制御は応答が遅いものであったが、動的歩行では応答を速くする必要がある。

そこで本論文では、これらの研究を踏まえ、さらに新しい方法も導入して、4足歩行機械の動歩行のための、動的効果を考慮した新しいアクティブサスペンション制御法について検討する。本論文のアクティブサスペンション制御は、足先の接地力をあらかじめ動力学で計算するフィードフォワード制御と、空間インピーダンスを設定して胴体姿勢の補正を行なうフィードバック制御を融合した制御法である。

次に、機械モデルの機構について論じる。従来の4足歩行機械の研究では、動物のような関節型の脚も作られているが、脚の途中が階段との接触をおこしやすく、これ

を回避するために新たな自由度や制御が必要となる。そこで、本論文では階段との干渉の少ない直動伸縮型の脚を用いる。また、文献14)で提案された、水平方向と鉛直方向の駆動を分離するGDAの原理を用いると効率の良い脚駆動をおこなうことができるため、本論文でもこれを採用する。また、動的歩行を行なうためには、遊脚時に高速な運動が必要となる。しかし、支持脚時には自重を支える大きな力を発生することも必要である。そこで、本論文では新たに2段変速型の駆動法を導入し、高速性と強力性を同時に実現することを試みる。

また、本論文で導入するアクティブサスペンション制御法を用いて不整地での滑らかな歩行を行なうためには、脚先端に力センサを装備しなくてはならない。しかし、従来の歪ゲージを用いた力センサは歩行機械に装備するには性能が不十分である。なぜなら、歩行機械の制御においては1kg以下の小さな接触力から自重を支持する100kg以上の大きな力まで計測しなくてはならない。しかし、従来の力センサはダイナミックレンジが狭く、最大荷重に定格をあわせると小さな力の計測精度が下がってしまう。また、歩行機械の脚先には、様々な方向からの力やモーメントが作用するため、これらを精度良く分離して計測しなければならない。このため、歩行機械の脚先には3軸方向の力と3軸回りのモーメントを分離して計測できる6軸力センサを装備することが望ましい。しかし、従来の6軸力センサは、複数の軸力間の非線形な干渉について考慮されておらず、十分な精度が期待できない。また、従来の力センサは、ダイナミックレンジを広くするために精度を高めたり、測定方向以外の力による干渉量を小さくしようとすると、重量が増加してしまう。しかし、動歩行を行なう歩行機械の脚はできるだけ軽量であることが望ましい。そこで、本論文では、歪ゲージ方式に代わる新たな方式として、光学式の計測法を導入し、歩行機械に適した力センサの構成法について考察する。なお、理想的には、ダイナミックレンジが広く、干渉が少なく、かつ6軸力が計測できるセンサが望ましいが、未だ実現されていないため、本論文の機械モデルには、機能を縮小したセンサを用いる。これは、ダイナミックレンジが広く、他の軸力の干渉が少ないことを実現しているが、計測する方向は1方向のみとなっている。この場合でも、極端な傾斜をもつ斜面が続くといった特殊な地形以外では、導入する制御法は十分適用できると考えられる。また、6軸力センサの詳細については付録で述べる。

最後に、機械モデルを用いて実際に歩行を実現させる。本論文で導入した歩行制御法により、平地において移動速度を連続的に変化させる歩行や、平地から階段への連



続した動的歩行、そして未知の不整地での動的歩行が実現できることを示す。これらはいずれも従来の研究では実現できなかったものである。

### 1.3.2 本論文の構成

本論文では、第2章で動的歩行の安定性について検討し、「転倒安定性判別」と呼ぶ新しい安定評価法を提案する。第3章では4足歩行機械を任意の移動速度で、任意の方向に移動させるための歩容について検討し、静歩行と動的歩行を連続して表現する「静動融合歩容」と呼ぶ新しい概念を導入する。第4章では、第2章で提案した安定判別法を用いた胴体左右揺動補償軌道の生成法、および脚軌道の生成法について論じる。第5章では、不整地においても滑らかな脚の接地を実現し、外乱がある場合にも胴体の姿勢を維持する制御法について検討を行ない、新しい制御法を導入する。第6章では、不整地での動的歩行を行なうための機械モデル TITAN VI の設計について検討を行なう。第7章では、第5章までに論じた制御法と第6章で論じた機械モデルを用いて歩行実験を行ない、その有効性を検証する。第8章では、本論文で導入した歩行制御法および機械モデルの機構について結論を述べ、今後の課題についても触れる。

### 1.3.3 本論文で対象とする歩行機械

本論文では不整地において自在に歩行することを目標としているため、歩行機械の4つの脚はそれぞれ3自由度を有するものとする。これによって、遊脚の接地点は3次元空間内の任意の位置に設定できる。また、地面に接地した脚の自由度によって胴体は地面に対して並進3自由度、回転3自由度を有することとなる。また、足先は基本的に点接触とし、足先の角度をアクチュエータによって変える機構はないものとする。このため、3脚以上で支持している状態では静的安定性を保持することが可能であり、2脚支持の状態では動的安定性保持が必要となる。

また、本論文では4足歩行機械の不整地での動的歩行に必要な制御アルゴリズムのうち、視覚、地図等による経路決定、着地点決定などは、すでに完了していることを前提とする。また、階段のような大きく高さの違う地形については概略の高さが既知であるとする。ただし、正確な高さや小さな凹凸は未知とする。

なお、本論文では、Fig.1-2のように歩行機械の進行方向にx軸、左にy軸、上方にz軸をとった座標系を用いる。そして、同図に示すように脚の番号を定義する。これはx、

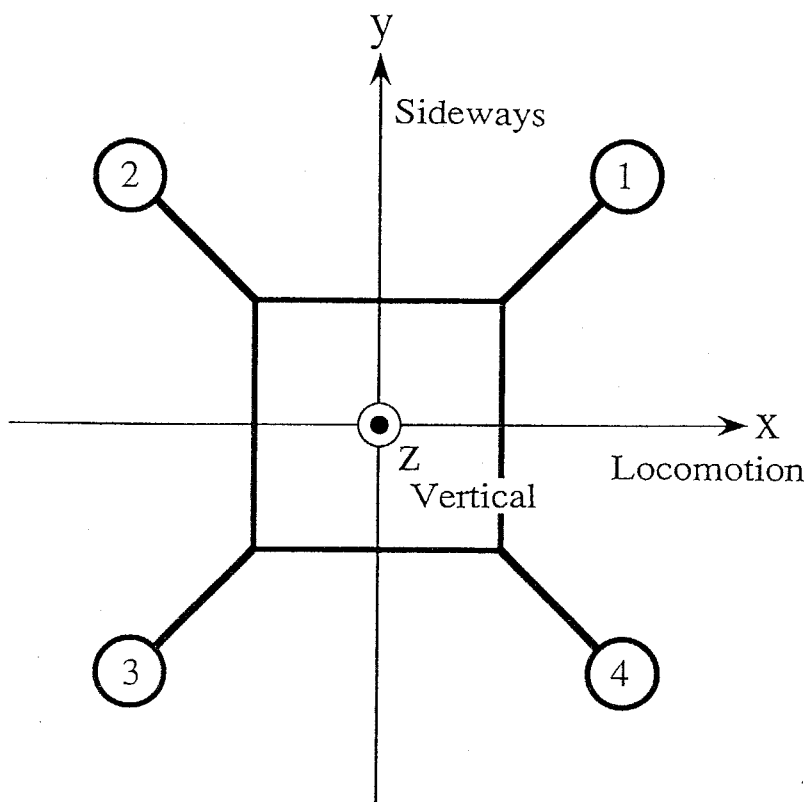


Fig.1-2 The coordinate system and leg numbers of the quadruped walking vehicle discussed in the paper

y 平面での各象限番号に対応している。

#### 1.3.4 用語解説

動歩行：常に動的にバランスをとる歩行。

動的歩行：動的にバランスをとる期間がある歩行。

静歩行：常に静的にバランスをとる歩行。足裏面積のない4足歩行機械では常に3脚以上が接地している歩行。

デューティ比：1周期のうちの支持脚である時間を1周期の時間で除した値であり、0から1までの間の値である。

GDA：( Gravitationally Decoupled Actuation ) 水平方向と鉛直方向の駆動を分離した効率の良い脚駆動法。6.1.1および文献14)参照

ペース歩容：左前と同時に左後、右前と同時に右後の脚を上げて歩く動歩行。3.1参照

トロット歩容：左前と同時に右後、右前と同時に左後の脚を上げて歩く動歩行。3.1参照

バウンス歩容：左前と同時に右前、右後と同時に左後の脚を上げて歩く動歩行。3.1参照

クロール歩容：左前、右後、右前、左後の順で脚を上げて歩く最も安定性の高い<sup>53)</sup>静歩行。

重心の速度：歩行機械の重心の速度ベクトル

移動速度：歩行機械の重心の速度の目標移動方向の成分

脚の復帰速度：遊脚を前方へ復帰させる速度の目標移動方向の成分

接地力：各脚が床から受ける力。本論文では鉛直方向成分のみを扱っている。

ウエーブ：1歩行周期の半分。3.2.1参照

ZMP：平地においてのみ定義される動的重心の投影点である。2.2.1および文献73)参照

#### 1.3.5 記号一覧

記号	内容	参考箇所
A	運動方程式の係数	(4-7)
a	a 番の脚	
$B_0, B_1, B_2$	運動方程式の係数	(4-7)
$C_1, C_2$	運動方程式の解係数	(4-21)(4-22)

$D_x, D_y, D_z$	$x, y$ 軸回りと $z$ 方向の減衰定数	5.3.1
$E$	回転変換行列	文献49)
$F_\alpha$	歩行機械の加減速に必要な力	2.1
$F_0$	接地点以外の各部に働く外力	2.1
$F_G$	各部に働く重力の合力,	2.1
$\bar{F}$	計画通りの運動を実現するために床から得るべき力	(2-1)
$F_j$	$j$ 番目の脚が床から受ける力	2.1
$f_j$	$j$ 番目の脚が床から受ける摩擦力	2.1
$f, \bar{f}$	左右の前脚	3.1
$\bar{F}_{ffx}, \bar{F}_{ffy}, \bar{F}_{ffz}$	計画通りの運動をするために床から得るべき力の各成分	5.2.1
$F_{ffa}, F_{ffb}, F_{ffc}$	$a, b, c$ 番目の脚のフィードフォワード目標力	(5-4)
$F_{ffi}$	$i$ 番目の脚のフィードフォワード目標力	5.2
$F_{bi}$	4脚支持直前の $i$ 番目の脚のフィードフォワード目標力	5.2.2
$F_{ni}$	4脚支持直後の $i$ 番目の脚のフィードフォワード目標力	5.2.2
$F_{min}$	接地力目標値の下限	5.4
$g$	重力加速度	
$H$	平地では重心の高さ、不整地では(5-12)式の値	4.1.2
$H_d$	脚軌道計画において垂直下降させる高さ	4.3.2
$H_u$	脚軌道計画において垂直上昇させる高さ	4.3.2
$H^*$	脚軌道計画における最高地点の高さ	4.3.2
$j$	脚番号	
$k_x, k_y, k_z$	設定する $x, y$ 軸回りと $z$ 方向のバネ定数	5.3.1
$k$	$z$ 軸方向の単位ベクトル	
$k$	ウエーブ番号	4.2.1
$L_i$	各脚先の $z$ 軸方向の重心からの距離	5.3.1
$M_\alpha$	歩行機械の加減速に必要なモーメント	2.1
$M_0$	接地点以外の各部に働く外からのモーメント	2.1
$M_G$	歩行機械の各部に働く重力の合計モーメント	2.1
$\bar{M}$	計画通りの運動をするために床から得るべきモーメント	(2-1)
$M'$	原点以外の $Q$ 点を中心に考えたモーメント	(2-10)

$m$	歩行機械の質量	
$\overline{M_x}, \overline{M_y}, \overline{M_z}$	計画通りの運動のために床から得るべきモーメントの各成分	5.2.1
$M_t$	発生させたいモーメントの支持脚線に垂直な成分	(5-19)
$M_{ab}$	発生させたいモーメントの支持脚線 a b 方向の成分	2.3.2
$N_j$	j 脚の接地点における垂直抗力	2.1
$n_j$	j 脚の接地点における地面の法線方向の単位ベクトル	2.1
$N_{Jz}$	j 脚の接地点における垂直抗力の地面に垂直な成分	2.1
$P_j$	j 脚の接地点の位置ベクトル	2.1
$P_1, P_2$	1, 2 脚の接地点の位置ベクトル	2.3.2
$p_1, p_2$	1, 2 脚の接地点の位置ベクトル	2.3.2
$P$	重心の位置ベクトル	(4-1)
$Q, q$	力の作用点とその位置ベクトル	2.2.1
$r, \bar{r}$	左右の後脚	3.1
$r_a, r_b$	重心から支持脚への垂線の足と脚 a, b の接地点との距離	Fig.5.3
$T$	歩行サイクル(4 歩)の時間	
$t_1, t_2, t_3$	左右 1 ウエーブ中の 1, 2, 3 相の終了時刻	4.2.4
$T_s$	1 回の遊脚時間	4.3
$t_{x1}, t_{x2}, t_{x3}, t_{x4}$	遊脚運動の進行方向速度の切り換え時刻	4.3
$t_{z1}, t_{z2}, t_{z3}, t_{z4}$	遊脚運動の鉛直方向速度の切り換え時刻	4.3
$T_b, T_n$	4 脚支持開始時刻と終了時刻	5.2.2
$V_G$	胴体の移動速度	3.1
$V$	脚の振りだし速度	3.1
$V_{max}$	脚の最大振りだし速度	3.1
$V_{x0}, V_{z0}$	ウエーブ開始時の x, z 方向の重心速度	(4-1)(4-14)
$V_{y3}, V_{y1}$	ウエーブ中の第 1 相と第 3 相の y 方向の重心速度	4.2.3
$V_r$	遊脚運動中の最大脚速度	4.3
$V_z(t), V_x(t)$	x, z 方向の遊脚運動関数	4.3
$W_k, W_{k+1}$	k 番目、k+1 番目のウエーブ	4.2.1
$WT_k$	k 番目のウエーブの開始時刻	4.2.1
$x_G$	重心の x 座標	

$x_j$	j 脚の x 座標	5.2.1
$x_a, x_b, x_c$	a, b, c 脚の x 座標	
$y_G$	重心の y 座標	
$y_{G1}(t), y_{G2}(t), y_{G3}(t)$	1, 2, 3 相の重心の y 座標関数	4.2
$y_{G0}$	ウエーブ開始時の重心の y 座標	(4-15)
$y_j$	j 脚の y 座標	5.2.1
$z_0$	ウエーブ開始時の重心の z 座標	(4-1)
$\alpha_x, \alpha_z$	1 ウエーブ中の重心の x, z 方向の一定加速度	(4-1)
$\alpha_{Lx}, \alpha_{Lz}$	遊脚の x, z 方向の最大加速度	4.3.2
$\beta$	デューティ比 (1 歩行サイクル中の脚の接地時間の割合)	
$\Delta F_i$	i 番目の脚のフィードバック目標力	(5-4)
$\Delta M_x, \Delta M_y$	x, y 軸まわりのフィードバックモーメント	5.3.1
$\Delta F_z$	z 軸方向のフィードバック力	5.3.1
$\Delta F_{bi}$	4 脚支持直前の i 番目の脚のフィードバック目標力	5.3.3
$\Delta F_{ni}$	4 脚支持直後の i 番目の脚のフィードバック目標力	5.3.3
$\kappa$	2 つの支持脚を結んだ線の x z 平面内の傾斜	(4-5)
$\mu_j$	脚 j の接地点の摩擦係数	(2-5)
$\lambda_x, \lambda_y$	脚の x, y 方向のストローク(振りだし距離)	4.3.1
$\theta$	傾斜度安定余裕を見るための地形の傾斜角	(2-21)
$\theta_x, \theta_y$	胴体の x, y 軸回りの傾斜角	5.3.1
$\dot{\theta}_x, \dot{\theta}_y$	胴体の x, y 軸回りの傾斜角速度	5.3.1
$\psi_0$	2 脚支持時の支持脚線と x 軸のなす角度	Fig.5.3

## 第2章 4 足歩行機械の動的安定軌道

歩行機械を実用的な速度で歩行させるには動的効果を考慮して制御する必要がある。本章では、まず、理想的な安定性評価法の条件を示す。そして、前述したZMPの概念では、どのような条件によって安定判別を行なっているかを示し、この概念は平地にのみ適用でき、不整地には適応できないものであることを明らかにする。一方、あらゆる地形に対応できる理想的な安定判別の原理に基づいて完全な計算を実行することは困難であることを示す。そこで、いくつかの現実的な仮定を行ない、不整地にも対応でき、実際に計算の行なえる新しい概念の評価法として「転倒安定性」を提案する。

### 2.1 一般的な運動計画の実現条件

はじめに運動計画の実現条件とはどのようなものであるかを明らかにしておく。歩行機械全体の運動方程式を記述するとき、歩行機械に働く力は重力、床からの力、接地点以外の各部に直接働く外力である。すなわち、歩行機械の各部の加減速に必要な力とモーメントの合計を $F_\alpha, M_\alpha$ とし、各部に働く重力を合計した力とモーメントを $F_G, M_G$ 、接地点以外の各部に直接働く外力の合計を $F_0, M_0$ とすると、床から得るべき力とモーメントは、

$$\bar{F} = F_\alpha - F_G - F_0 \quad (2-1)$$

$$\bar{M} = M_\alpha - M_G - M_0 \quad (2-2)$$

と表せる。ここで、座標系は慣性座標系であれば、原点の位置などは任意に設定できる。ただし、以降の計算に統一して用いるのものとする。そして、 $\bar{F}$ は設定した座標の原点に働くべき力であり、 $\bar{M}$ は原点回りのモーメントである。一方、実際に足先が床から受ける力は

$$F = \sum F_j \quad (2-3)$$

$$M = \sum p_j \times F_j \quad (2-4)$$

と表せる。ここで  $p_j$  は足先の接地点の座標である。ここでは面状の接触も点接触の集合として扱う。  $F_j$  は各接地点で受ける床からの力である。この時、  $F_j$  を垂直効力  $N_j$  と摩擦力  $f_j$  とに分離して考えると、

$$N_j \cdot n_j \geq \mu_j \quad (n_j \text{ は接地面の法線ベクトル}) \quad (2-5)$$

$$\frac{|f_j|}{|N_j|} \geq \mu_j \quad (2-6)$$

という制約がある。  $\mu_j$  は各接地点での静止摩擦係数である。そして

$$\bar{F} = F, \quad \bar{M} = M \quad (2-7)$$

が実現できることが計画通りの運動が可能になる条件である。この問題は  $n$  点支持の場合、未知数  $3n$  個に対して方程式が 6 個で、さらに不等式の制約条件がついている問題となり、この問題の解の存在を判定することに帰着する。

以上の議論はどのような地形にも適用できる一般的なものである。例えば壁面を移動するロボットにも適用できる。(2-1)(2-2)式において、各脚を壁に押しつける外力という形で吸着力を付加すればよい。さらに一般的にはマニピュレータハンドによる把持の安定性と全く同じ問題であり、これについてはすでに多くの研究がなされている。しかし、これを一般的に解決することは難解な場合が多い。このため、歩行機械の制御では、特有の簡便な安定性評価法が提案されている。その一例が ZMP である。

## 2.2 従来の安定判別

### 2.2.1 ZMP を用いた安定判別法

ここではまず、ZMP とはどのようなものであるかをはっきりさせておく。ZMP は文献73)に示されているが、摩擦力が考慮されておらず、記述が不十分であるので、ここにもう 1 度概念を整理して示しておく。

前節の  $F$  の作用点は原点であったが、作用点を  $Q$  点 (位置ベクトル  $q$ ) とすれば、  $F$  は並進力であると同時に  $M' = q \times F$  の原点回りのモーメントをもつ。ここで、  $M = M'$  にすることができれば、  $F$  と  $M$  は  $Q$  点に働く  $F$  のみで代替させることができ、モー



メントはゼロにできる。このときQ点は真のゼロモーメントポイントである。しかし、 $M'$ はFと直交する方向に限られ、一般にはMとM'は一致しない。

一方、床からの力は垂直効力  $N_j$  と摩擦力  $f_j$  に分ければ

$$M = \sum p_j \times N_j + \sum p_j \times f_j \quad (2-8)$$

$$F = \sum N_j + \sum f_j \quad (2-9)$$

$$M' = q \times \sum N_j + q \times \sum f_j \quad (2-10)$$

と表せる。ここで、ZMPの概念を導入するには複数の着地点がすべて1つの水平面内にある場合に限定しなければならない。そして原点、Q点共にその水平面内にとれば、(2-8)(2-10)式は共に右辺第1項が水平面内のベクトル、右辺第2項が鉛直方向のベクトルである。よって  $M=M'$  の条件は

$$\sum p_j \times N_j = q \times \sum N_j \quad (2-11)$$

$$\sum p_j \times f_j = q \times \sum f_j \quad (2-12)$$

となる。ここで、(2-11)式は

$$\begin{aligned} \sum p_j \times N_j &= \sum (N_{jz} p_j \times k) = \sum (N_{jz} p_j) \times k \\ &= \frac{\sum N_{jz} p_j}{\sum N_{jz}} \times \sum N_{jz} k = \frac{\sum N_{jz} p_j}{\sum N_{jz}} \times \sum N_j \end{aligned} \quad (2-13)$$

であり、 $\sum (N_{jz} p_j) / \sum (N_{jz})$  ( $N_{jz} > 0$ ) は各  $P_j$  を頂点とする多角形の内部の点を表すから(2-13)式と(2-11)式を比較してQ点は多角形の内部にあることが  $N_{jz} > 0$  の必要十分条件である。このときQ点に働くFはMの水平面内の成分を代替し、一般にはこのQ点をZMPと呼んでいる。また、摩擦力は垂直効力に比較して小さく、摩擦係数  $\mu$  による制約は無視できるとする。すなわち、鉛直方向のモーメントは任意に発生できるものとする。

以上の考察により、各部の運動計画から要求される力 $F$ とモーメント $M$ が接地力として得られるための条件は、 $M$ の水平成分を代替できる $F$ の水平面上の作用点 $Q$ （計画上のZMP）が接地点を結ぶ多角形の内部にあることである。

### 2.2.2 ZMPの適用限界

この安定判別法は不整地にそのまま適用することはできない。その理由は、

[1] 不整地歩行では接地点が1つの面上にないので、ZMPが乗るべき平面が定義されない。

この問題は本質的ではなく、 $M$ の水平成分を代替できる $F$ の作用点は $F$ に平行な直線上の任意の点として存在するので定義を拡張すればよい。

[2] 接地面が水平でないので垂直効力の向きが各接地点で異なる。

このため(2-8)(2-10)式の右辺が水平と鉛直方向に分離できないので、 $M=M'$ の条件が(2-11)(2-12)式のように分解できない。

[3] 原点から $Q$ 点へのベクトルをすべて水平にとることはできない。

階段のように接地面が水平で $N_j$ がすべて鉛直向きであっても(2-10)式の右辺第2項が鉛直方向のベクトルにならない。このため、上述のような水平と鉛直に分離した判定はできない。たとえ水平方向のモーメントをゼロにする点に働く力 $F$ を接地力として実現しても、残りの鉛直方向のモーメントを摩擦力のみで発生できる補償はない。例えば、階段で2脚支持の場合を考えると、高さのちがう2点に働く水平方向の摩擦力は鉛直方向のモーメントだけでなく、水平方向のモーメントも同時に発生してしまう。

[4] 摩擦力の制限は無視できない。

水平面と異なり、傾斜面等では自重を支えるための力の一部を摩擦力で発生することになるため、大きな摩擦力となる。このため、摩擦係数の制限を無視していると限界を越えてスリップすることもあり得る。

## 2.3 新しい安定判別法

### 2.3.1 転倒安定性の導入

どのような状況でも一般的に適応できる安定判別条件は2.1節で述べたが、このような計算を実際実施することは困難である。そこで、歩行機械に特有の実用的な方法を提案する<sup>79)</sup>。

歩行機械が安定性を失う状況は2通りある。1つは転倒、もう1つは滑落である。しかし、通常の歩行では、接地点での摩擦係数は十分大きく、滑落してバランスを失う状況は少ないと考えられる。そこで、ここでは転倒について検討する。はじめに、2点で支持している歩行機械について考える。この機械が転倒するとした場合、転倒開始時の運動は、接地している2点を結ぶ軸回りの回転になることは明らかである。すなわち、接地力として必要なこの2点回りのモーメントがゼロであることが安定の条件となる。

次に、3点支持の歩行機械が転倒する状況を考えよう。この場合、転倒開始時の運動は、1点が浮き上がり、他の2点を結ぶ線を軸とする回転である。同様に4点以上で支持している場合も、ある2点を残して他の点は浮き上がり、接地している2点を結ぶ軸回りに回転する。すなわち、どの場合も転倒する際には必ず2点支持の状態を経て倒れていることがわかる。そこで、この2点支持状態に入る瞬間に注目し、歩行中のある瞬間に、ある2つの支持脚を残して他の脚が消失したと仮定したとき、その時の胴体の位置(角度)、速度(角速度)、加速度(角加速度)から倒れ込みの生ずる向きを判別する。そして、消失したと仮定した脚の中に、実際にはその転倒を支える脚がある場合には2点支持状態にはならず、安定であり、無い場合には、2点支持状態が続き、計画どおりの運動にならないので不安定と判定する。このように転倒する際に必ず通過する2点支持状態に注目した安定性の判別方法を今後、「転倒安定性判別」と呼ぶことにする。

なお、転倒安定性判別は2.1節で述べた未知数より方程式の数が少なく、不等式条件のある問題において、いくつかの不等式を等式化して解が定まるようにし、得られた解が残りの不等式を満足するように処理する線形計画法で用いる方法と等価と解釈できる。ただし、歩行機械の場合、摩擦力の制限が線形の式ではないので線形計画法をそのまま安定性判別に適用することはできない。

### 2.3.2 転倒安定性の判別方法

初めに点接地の脚2本で支持する場合を考える。2つの接地点を $P_1, P_2$ 、位置ベクトルを $p_1, p_2$ とする。また、歩行機械の運動計画から動的効果を考慮して求まる接地力として得るべき力は原点に働く力 $\bar{F}$ と原点回りのモーメント $\bar{M}$ とする。このとき歩行機械が計画通りの運動をするための条件は $F$ と $M$ が $P_1, P_2$ に働く2つの接地力で代替できることである。仮にこの接地点が回転3自由度をもつ完全束縛対偶であるとす

ると、この2つの力の値を変化させれば並進力は任意に出せる。また、モーメントについては、線分 $P_1P_2$  回りのモーメントは発生できず、他の方向には任意の大きさのモーメントが発生できる。すなわち、計画された運動に要求される接地力の合計を計算したとき、線分 $P_1P_2$  回りのモーメントがゼロであることが安定の条件である。ここで、原点で生成すべき $F$ と $M$ の組合せが $P_1$ 点で $F$ と $M'$  を生成することと等価とすると、

$$M' = \bar{M} - p_1 \times \bar{F} \quad (2-14)$$

である。 $M'$  の $p_1 - p_2$ 方向の成分は、

$$M_{12} = (\bar{M} - p_1 \times \bar{F}) \cdot (p_1 - p_2) \quad (2-15)$$

である。よって、計画した運動について、(2-15)式の $M_{12}$ がゼロであれば計画通りの運動が実現できるが、そうでないときは線分 $P_1, P_2$ 回りに回転して倒れ込んでしまう。

次に先の2本に加えて他の脚が接地している場合を考えよう。他の脚の接地点を $P_3, P_4 \dots$ その位置ベクトルを $p_3, p_4 \dots$ とする。線分 $P_1P_2$  回りのモーメントがゼロでない場合も、倒れ込みが生ずる向きが、いずれかの脚を床に押しつける方向であれば実際にはその脚で支えられ、転倒しない。反対にすべての脚を床からはがす方向であれば、転倒してしまう。すなわち、各接地点の床面から空中への法線ベクトルを $n_3, n_4 \dots$ とすると、

$$\{(p_1 - p_2) \times n_j\} \cdot M_{12} (p_1 - p_2) < 0 \quad (2-16)$$

となる脚 $j$ があれば安定であり、(2-16)式を満たす脚 $j$ が無ければ、歩行機械は線分 $P_1, P_2$ 回りに回転して倒れる。

同様にして、一般に、 $n$ 点接地の時に線分 $P_a, P_b$  ( $a, b = 1, 2, 3 \dots$ ) 回りに転倒しない条件は、

$$M_{ab} = (\bar{M} - p_a \times \bar{F}) \cdot (p_a - p_b) \quad (2-17)$$

としたとき、

$$\{(\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_k) \times \mathbf{n}_j\} \cdot M_{ab}(\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_{k'}) < 0 \quad (2-18)$$

となる脚  $j$  が存在することである。  $a = 1 \sim n$ 、  $b = 1 \sim n$  ( $a \neq b$ ) のすべての組合せについて (2-18) 式を満たす脚  $j$  が存在すれば、2つの接地点をむすんで作られるすべての直線回りに転倒しない。このとき、先に仮定した接地点が浮き上がらない条件はすでに満たされている。よって、歩行機械はどの方向にも転倒しない。以上が転倒安定性判別の方法である。

### 2.3.3 転倒安定余裕の評価方法

従来から、歩行機械の安定性にどれ位の余裕があるかを示す定量的な評価は、歩容決定の際の重要な指針とされ、いくつかの研究がなされてきた。最も一般的なものは、McGhee and Frankが文献52) で提案した「安定余裕」で、重心の床面への投影点が、支持脚の接地点を結んで作られる多角形の辺からどれだけ内側にあるかを指針としている。しかし、この方法では例えば重心が高いことは安定の面からは不利であるという効果が考慮されていない。そこで、広瀬ら<sup>12)</sup>は歩行面にどれ位の傾斜を与えても姿勢を保持できるかという傾斜度安定余裕を提案している。これにより、重心が低いことも安定性向上に貢献することとなる。また、文献12)では脚のコンプライアンスによる重心の移動についても考慮している。しかし、これら2つの文献では、水平面上の歩行のみを取扱い、不整地については検討されていない。一方、Messuri and Klein<sup>55)</sup>は、歩行機械を転倒させるのに最小限必要なポテンシャルエネルギーを安定余裕として評価し、傾斜面を歩行する際の安定性についても論じている。

しかし、以上の研究はいずれも動的効果を考慮しておらず、静歩行の場合にのみ適応していた。動的効果を考慮することは水平面上の歩行であれば、上記の文献52)の「安定余裕」の概念を拡張することで容易に行なうことができる。すなわち、重心位置のかわりにZMPを考え、その床面への投影点から、支持脚多角形の辺までの最短距離によって評価することができる。しかし、2.2節で示したように、ZMPの概念は平地にしか適応できないものであるため、不整地での安定余裕評価はできない。

そこで、本論文では、不整地に対応し、かつ動的効果も考慮した安定余裕の評価法を導入する。これは、広瀬ら<sup>12)</sup>の傾斜度安定余裕に動的効果を付加し、さらに不整地に

も対応するように拡張したものであり、その評価手順は次のようになる。

初めに地形を傾斜させた場合に、いくつかある接地点から選択した2つの接地点 a, b 回りに転倒する可能性があるかどうかを判別する。例えば、水平面上の凸多角形の各頂点に接地している場合、a, bが多角形の辺であれば外側に転倒する可能性があるが、対角線であれば転倒しない。転倒可能な条件は、a, b以外のすべての接地点 j について(2-18)式を満たさない  $M_{ab}$  が存在することである。すなわち、すべての j ( $\neq a, b$ ) について

$$\{(\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_a) \times \mathbf{n}_j\} \cdot M_{ab}(\mathbf{p}_a - \mathbf{p}_b) \quad (2-19)$$

の符号が等しいことが必要である。この条件を満たすような接地点 a, b 回りの転倒余裕を考えると、地形の回転方向は、

$$\mathbf{q} = \frac{\{\mathbf{F}_G \times (\mathbf{p}_a - \mathbf{p}_b)\} \times \mathbf{F}_G}{|\{\mathbf{F}_G \times (\mathbf{p}_a - \mathbf{p}_b)\} \times \mathbf{F}_G|} \quad (2-20)$$

とすれば最も小さな角度で転倒させられる。地形を回転させた場合の重力は、回転変換の行列<sup>49)</sup>を E とすれば、

$$\mathbf{F}_G' = \mathbf{E}^{\theta s} \mathbf{F}_G, \quad \mathbf{M}_G' = \mathbf{E}^{\theta s} \mathbf{M}_G \quad (2-21)$$

である。これを(2-1)(2-2)式の重力の項に代入し、それをさらに(2-17)式に代入して  $M_{ab} = 0$  となる  $\theta$  を求める。すなわち、

$$\{(\mathbf{M}_{ab} - \mathbf{E}^{\theta s} \mathbf{M}_G - \mathbf{M}_0) - \mathbf{p}_a \times (\mathbf{F}_\alpha - \mathbf{E}^{\theta s} \mathbf{F} - \mathbf{F}_0)\} \cdot (\mathbf{p}_a - \mathbf{p}_b) = 0 \quad (2-22)$$

となる  $\theta$  を求め、これを接地点 a, b 回りの傾斜度安定余裕とすればよい。転倒可能な a, b の組合せの中で最小の傾斜度安定余裕を求めれば、これによって計画した運動の安定性を定量的に評価することができる。

## 第3章 動的歩容

本章では静止状態から静的安定歩行そして動的安定歩行をすべて含む「静動融合歩容」と呼ぶ新しい歩容概念を導入する。そして、動歩行時に動的安定性を生成するためフィードフォワード的に胴体重心の軌道を修正する「左右揺動補償」の導入を行う。

### 3.1 基準動的歩容

一般に4足歩行機械の移動速度 $V_G$ は、遊脚時の脚の振り速度を $V$ 、デューティ比を $\beta$ とすると、

$$V_G = \frac{1-\beta}{\beta} V \quad (3-1)$$

と示される<sup>86)</sup>。ただし、ここでは脚の加減速時間や上下動に必要とする時間は無視している。一方、歩行時の安定余裕を高めるためには、デューティ比 $\beta$ は大きくしておく、脚をできる限り支持脚状態に保つべきである。そのため、ある移動速度を得るためには、(3-1)式から脚のサイクル運動の遊脚相での速度を最大振り速度 $V_{max}$ に設定し、デューティ比 $\beta$ をできるだけ大きな値に保つようにして歩行することが望ましい。そこで、以降、遊脚相での脚の振り速度 $V$ は機構的上限值 $V_{max}$ とする。

さて、(3-1)式で $\beta$ が1であると静止状態を示す。 $\beta$ が1から減少していくと、 $\beta = 0.5$ までは移動速度が増大してゆき $\beta = 0.5$ で最大速度 $V_G = V_{max}$ が得られる。 $\beta$ を0.5より小さくしても移動速度 $V_G$ の最大値は $V_{max}$ より大きくできない。そのため以降の歩容決定は $1 \geq \beta \geq 0.5$ の範囲でデューティ比を調整するものとする。周知のように $1 > \beta \geq 0.75$ の範囲内では常に3脚以上を接地させることができ、静歩行が行える。そして静歩行で最も安定性の良い基準歩容はクロール歩容である<sup>52)</sup>。

$0.75 > \beta \geq 0.5$ の範囲では2脚支持期が必ず生じ、動的歩行が必要となる。 $\beta = 0.5$ の動的歩容は6組、左右対称性を考えると3組存在する。これらはトロット歩容、ペース歩容、バウンド歩容と呼ばれている<sup>72)</sup>。これらの歩容の説明のため以降 $f \overline{f} r \overline{r}$ という記号を使用することにする。ここでは $f$ はある指定された前脚、 $\overline{f}$ は $f$ に対し左右逆側の前脚、 $r$ は $f$ 側の後脚、 $\overline{r}$ は $f$ と左右逆側の後脚を示す。この記号によるとトロット歩容は $f \overline{r}$ 、 $\overline{f} r$ の組合せ、ペース歩容は $f r$ 、 $\overline{f} \overline{r}$ の組合せ、バウンド歩容は $f \overline{f}$ 、 $r \overline{r}$ の組合せを同時に動かす歩行である。これらのうちトロット歩容は以下に示す2つの特徴により、4足歩行機械の動的歩行の基準として最適であると考

えられる。

トロット歩容の第1の特徴は安全性の高さである。Fig.3-1 の様なトロット歩容においては歩行機械全体は支持脚  $f$ 、 $\overline{r}$  を結ぶ直線（以降支持脚対角線と呼ぶ）を回転軸とする倒立振子になる。このため転倒のモードは、支持脚対角線まわりの回転のモードのみに束縛される。一方、遊脚  $\overline{f}$  あるいは  $r$  は地表面に沿って復帰動作を行なっている。そのためたとえ転倒が生じたとしても、どちらかの遊脚がタイミングがずれて接地するだけで完全に転倒してしまうことが防止できる。

この特性はトロット歩容による動的歩行の実現を予想外に単純化する。なぜなら、ある軌道運動を実現するときまずフィードフォワード的に胴体の軌道運動を補償する。これだけでも歩行は十分持続できると考えられるが、もしも地表の凹凸などの影響で歩行パターンが大きく乱れた場合には、それを姿勢センサや足先の力センサで実時間で検出し、フィードバック的に修正する。という2段階の制御系の構成を可能にするからである。

なお、ここでの議論ではすべて足裏の面積は考えず点接地しているとしている。足裏の面積がある場合、本論文で導入した歩容はその分より安定に実現できることになる。よって本論文では、一般の歩行機械の安定性を最悪条件で検討していると考えられる。

トロット歩容の第2の特徴はクロール歩容との整合性の良さである。この点については次節で論ずる。

以上の様な理由から、本研究ではトロット歩容を4足歩行機械動的歩行の基準歩容として考えることにする。

## 3.2 静歩行との連続性をもつ動的歩容

### 3.2.1 拡張トロット歩容概念の導入

前節にのべたように、動的歩行の基準としてはトロット歩容が望ましい。また、文献53)にあるように、静歩行の中で最も安定性の高いのはクロール歩容(用語解説参照)である。このため、静歩行と動的歩行を移動速度に応じて自動的に選択できる歩容を考えるには、クロール歩容とトロット歩容を共通する一つの歩容概念に統合化しておくことが望ましい。そのため「拡張トロット歩容」と呼ぶ歩容を新たに導入することにする。

Fig.3-2はクロール歩容とトロット歩容の歩容線図を示している。各脚ごとに脚の上



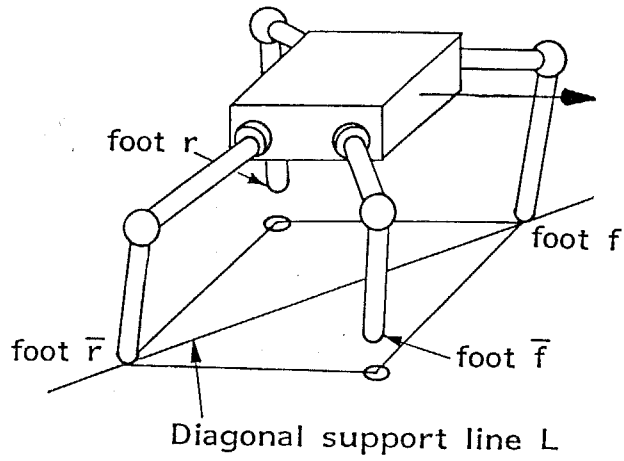


Fig.3-1 A trot gait of quadruped

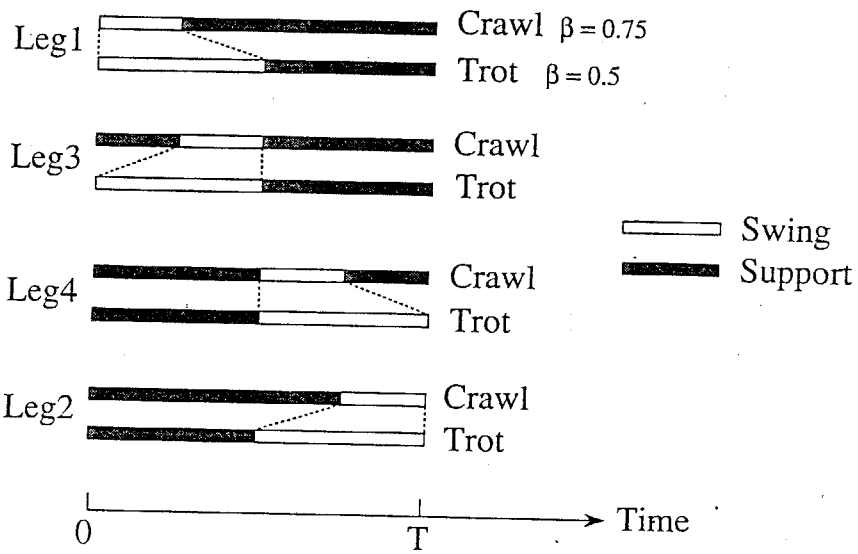


Fig.3-2 Foot diagrams of crawl and trot gait

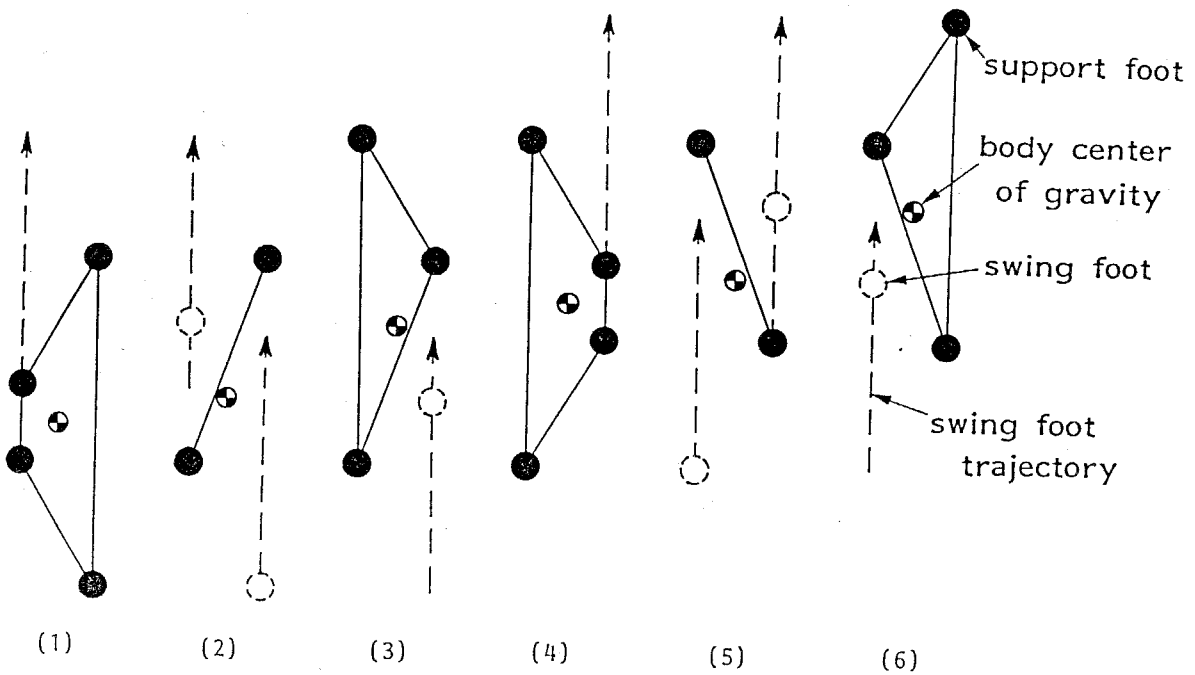


Fig.3-3 An example of generalized trot gait of  $\beta=0.6$

下のタイミングを波線のようにつないでゆくと、2つの歩容の中間の歩容を考えることができる。デューティ比を0.75から0.5までの連続的な歩容概念が得られる。さらに、この波線を上方に延長することによってデューティ比を0.75以上1.0まで拡張することができる。このデューティ比1.0から0.5までの連続した歩容概念を「拡張トロット歩容」と呼ぶことにする。

この歩容の内容は、「ウェーブ切替点」と「ウェーブ」という新しい概念を使用して定義することができる。ウェーブ切替点とは、クロール歩容あるいはトロット歩容において後脚が復帰動作を完了した時点である。またウェーブとはウェーブ切替点の間の期間である。一般に、クロール歩容、トロット歩容ともウェーブ切替点は1サイクル運動中2回形成される。またウェーブ切替点では一瞬4つの接地点が台形をなす台形脚配置が構成される。例えばFig.3-3はデューティ比 $\beta = 0.6$ の歩容であるが、ここでは(1)(4)の2カ所で台形脚配置が形成されている。このようなウェーブとウェーブ切替点の定義を用いると、 $1 > \beta \geq 0.5$ の範囲のクロール歩容からトロット歩容に至る歩容は統一的に以下のように表現できる。

「後脚  $r$  の復帰動作完了で始まるウェーブにおいて、前脚  $f$  はそのウェーブの開始点で遊脚化を開始し、 $(1 - \beta)T$  時間後接地する。また、後脚  $r$  はそのウェーブの終了時点でちょうど接地するように、終了地点の  $(1 - \beta)T$  時間前から遊脚化を開始するというようにして生成される歩容。」ただしここで、 $T$ は歩行の1サイクル時間である。

このような定義によると、 $\beta = 0.75$ の場合は典型的なクロール歩容となり、 $\beta = 0.5$ ではトロット歩容となる。つまりクロール歩容からトロット歩容までが統一的に表記できたことになる。

### 3.2.2 左右揺動補償軌道の導入

歩行機械の動的歩容制御を行なう場合、あらかじめ動力学計算を行ない、2章で述べたような安定性のある運動を計画することが有効である。ここでは、拡張トロット歩容による動的歩行を行なうとき、フィードフォワード的に与える胴体重心軌道の補償法について検討する。

$x$ 軸を指令軌道とするような $\beta = 0.5$ のトロット歩容を考えよう。このとき支持脚対角線が地表に残すパターンは Fig.3-4 (a)のように斜めに交差を繰り返すものとなる。このようなトロット歩容では、転倒することなく単に歩行を続けることが目的であれ

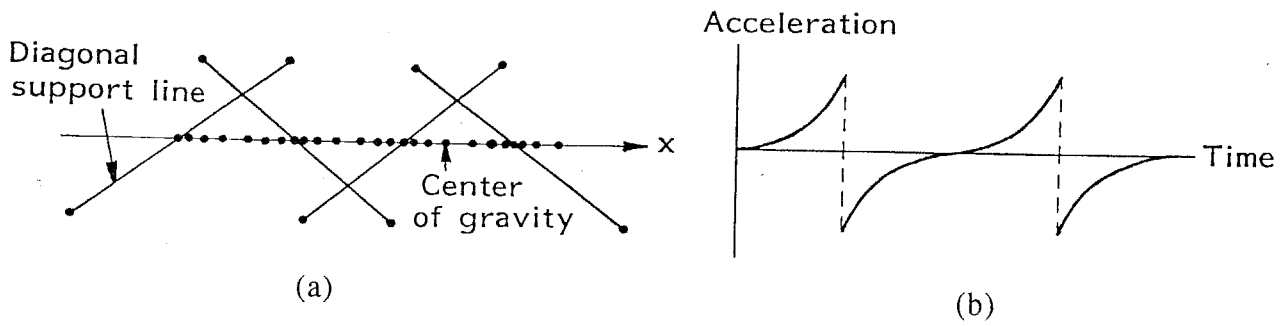


Fig.3-4 Example of straight-line body motion keeping zero moment around diagonal support lines by forward and backward acceleration

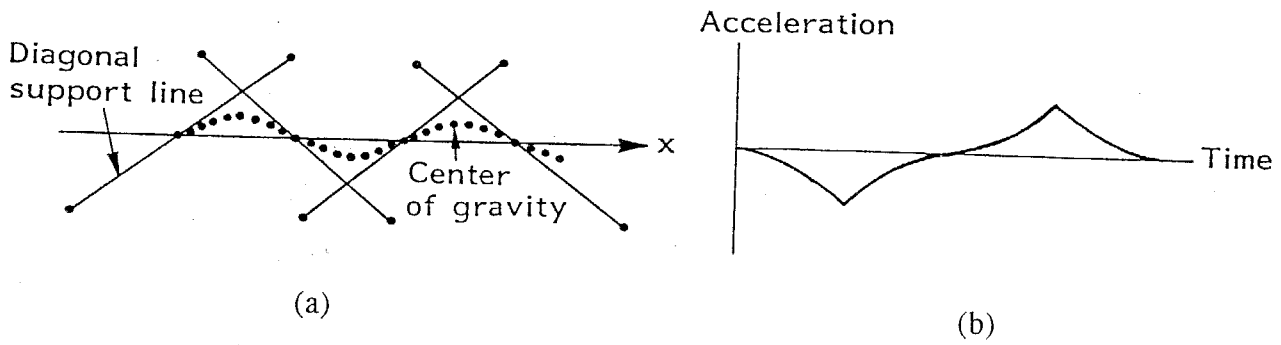


Fig.3-5 Proposed path incorporating sway to keep zero moment around diagonal support lines

ば、胴体重心の動的制御は必ずしも必要ない。このことは、3.1節で Trot 歩容の安定性としてすでに論じた。ただし、指令軌道をそのまま追従しようとする、歩行機械の胴体は支持脚対角線回りの倒立振子的な計画外の運動を繰り返すことになってしまう。そのため支持2脚を切り替えるごとに、遊脚が計画したタイミングと異なる時点で接地し、胴体が不必要に振動してしまうことになる。この不具合を無くし、動的歩行中においてもなめらかな運動を生成できるようにするには、指令された胴体重心の軌跡をあらかじめ補償しておくフィードフォワード制御が有効である。この方法では、歩行機械の多くの自由度のうち、脚先の位置、胴体の高さなど、いくつかの自由度の運動はあらかじめ設定した後、残りの自由度の運動を利用して安定性を確保することができる。このため、胴体の上下動、回転といった物資搬送に適さない運動は起こさないようにあらかじめ設定することが可能であり、4足歩行機械をより実用的なものとすることができると考えられる。

動的効果を考慮して胴体重心の軌道を補償するためには、2章で述べたような転倒安定性があり、しかも胴体運動を指令された軌道の近傍で、できる限りなめらかに保つような胴体軌道の生成することが望ましい。転倒安定性を確保するための補償は、胴体重心の3方向の加速運動と3軸まわりの角加速度運動のいずれか、あるいはそれらの組み合わせを調整して行なうことができる。

これらの補償軌道の中で、最も基本的なものが Fig.3-4 である。これは胴体重心軌道の上下左右の2方向運動、そして胴体の3軸回転運動は指令された通りに保ち、進行方向（x軸方向）への加減速運動のみの補償で転倒安定性を確保しようとするものである。なお、Fig.3-4の例では指令された胴体軌跡はx軸に沿う直線運動であり、胴体の回転運動はないと指令されているとしている。そして Fig.3-4 (a) は指令軌道、Fig.3-4 (b) は補償運動を行うときの胴体重心のx軸方向の加減速パターンである。この手法では、補償軌道は指令された軌道と一致する。しかし、軌道に沿った加減速パターンがかなり大きく変動するという欠点を有している。それは、Fig.3-4 (b) に示されているように4脚接地した瞬間の台形脚配置状態で、胴体重心の加減速の方向を完全に切り換えなければならないためである。このことは歩行機械各部に働く力が不連続に変化することになり、機械が多少のコンプライアンスを有することを考慮すると、運動がスムーズに行なわれないと考えられる。

より望ましい胴体重心の軌道制御法として、本論文では Fig.3-5 に示す手法を提案する。これは、左右方向（y軸方向）の加速度のみを調整し、左右方向に揺動する補償

軌道を生成するものである。Fig.3-5 (a) の破線が補償軌道である。Fig.3-5 (b) はこの補償軌道の左右方向の加減速パターンである。この歩行は、重心軌道を進行方向に対して左右に揺動させるものであるため、以降「左右揺動補償」と呼ぶことにする。左右揺動補償の特徴は以下の通りである。

1) 加速度変化が、Fig.3-4の手法より連続的で平滑である。Fig.3-4の手法では移動速度が小さくても補償のための加速度は小さくならず、特に移動速度が小さい場合は速度変動が大きくなり、支持脚線上での速度はゼロに近く、その中間では大きな速度になる。これに対し、左右揺動補償では、移動速度が小さい場合は、補償のための加速度も小さくなり、速度変動は小さい。

2) 静歩行との整合性がよい。移動速度をゼロに近づけてゆく極限状態を考えると、Fig.3-4の手法では重心の投影点が支持脚線上にないので、常に動歩行であり、静歩行はできない。一方、左右揺動補償軌道の場合には、移動速度をゼロに近づけてゆくと、支持脚線に沿った三角波状の軌道が生成され、静歩行が可能である。

3) 胴体重心の高さをある程度とり、左右方向の足の接地幅を狭くすると、左右への揺動が少ないほとんど直線的な歩行ができる。馬などの哺乳動物はこのような形態的な特徴を有しており、このことで滑らかな Trot 歩行を実現しているものと考えられる。

これらの利点から、本論文では動的歩行実現のための手法としては左右揺動補償を主として考察することにする。補償軌道生成の具体的な手法については第4章で詳しく述べる。

## 第4章 動的歩行の軌道計画

本章では、前章までに提案した左右揺動補償を行なった静動融合歩容を実現するための軌道計画法について論じる。従来の研究では、動的安定性を持つ軌道の生成は数値計算を行なう必要があり、実時間での軌道生成は不可能であったが、本論文では、実用性を高めるため、解析的に生成することを試みる。なお、ここでは不整地に対応するため、第2章で導入した、「転倒安定性判別」を用いる。

### 4.1 動的安定軌道の生成

#### 4.1.1 一般的な地形の場合

前述の転倒安定性を用いて動的に安定な重心軌道を生成する方法を検討する<sup>83)</sup>。本来、転倒安定性による判別は2脚以上の任意の本数の脚が接地している場合に適応できるが、ここでは前述の左右揺動補償によって安定を保つための軌道を求めることとし、動的安定軌道が不可欠な2脚支持状態に限定する。静動融合歩容における3、4脚支持期間との融合については、4.2節で論ずる。

重心の位置を

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} V_{x0}t + \frac{1}{2}\alpha_x t^2 \\ y_G \\ z_0 + V_{z0}t + \frac{1}{2}\alpha_z t^2 \end{pmatrix} \quad (4-1)$$

とすると、その運動に必要な並進力は

$$\bar{\mathbf{F}} = \begin{pmatrix} m\alpha_x \\ m\ddot{y}_G \\ m[\alpha_z + g] \end{pmatrix} \quad (4-2)$$

であり、胴体の回転はないものとする、重心回りのモーメントはゼロで、原点回りのモーメントは

$$\bar{\mathbf{M}} = \mathbf{P} \times \bar{\mathbf{F}} \quad (4-3)$$

であるから、安定の条件は

$$\begin{aligned}
0 &= (\overline{M} - P_a \times \overline{F}) \cdot (P_a - P_b) \\
&= ([x_a - x_b][\alpha_z + g] - [z_a - z_b]\alpha_x)m y_G + (-[x_a - x_b]z_0 - [x_b z_a - x_a z_b])m \ddot{y}_G \\
&+ (-[x_a - x_b]V_{z_0} + [z_a - z_b]V_{x_0})m t \ddot{y}_G + \frac{1}{2}([z_a - z_b]\alpha_x - [x_a - x_b]\alpha_z)m t^2 \ddot{y}_G \\
&+ (y_a - y_b)(V_{z_0}\alpha_x - [\alpha_z + g]V_{x_0})m t - \frac{1}{2}(y_a - y_b)g m t^2 \alpha_x \\
&+ ([y_a - y_b]z_0 \alpha_x + [y_b z_a - y_a z_b]\alpha_x + [\alpha_z + g][x_b y_a - x_a y_b])m
\end{aligned} \tag{4-4}$$

となる。しかしこのままでは  $y$  の 2 階微分と  $t$  や  $t^2$  との積の項があるため、解析的には解けない。そこで次のような条件を満たす場合に限定する。

#### 4.1.2 階段の場合

ここでは、前記の微分方程式を解析的に解くため、2脚支持状態の支持脚の着地点を sagittal plane へ投影した 2 点間の傾斜に合わせて胴体が移動すると仮定する。すなわち、前後方向と鉛直方向の速度比が常に支持脚の傾斜度に等しく、

$$\begin{aligned}
z_a - z_b &= \kappa(x_a - x_b) \\
V_{z_0} &= \kappa V_{x_0} \\
\alpha_z &= \kappa \alpha_x
\end{aligned} \tag{4-5}$$

であるとする。すると、先の(4-4)式は次のように簡略化される。

$$0 = y_G + A \ddot{y}_G - B_2 t^2 + B_1 t + B_0 \tag{4-6}$$

ただし、

$$\begin{aligned}
A &= \frac{z_0}{g} + \frac{x_a z_b - x_b z_a}{(x_a - x_b)g}, \quad B_2 = -\frac{y_a - y_b}{x_a - x_b} \cdot \frac{\alpha_x}{2}, \quad B_1 = -\frac{y_a - y_b}{x_a - x_b} V_{x_0}, \\
B_0 &= \frac{(y_b z_a - y_a z_b)\alpha_x + \{(x_b y_a - x_a y_b)(\kappa \alpha_x + g) + (y_a - y_b)z_0 \alpha_x\}}{(x_a - x_b)g}
\end{aligned} \tag{4-7}$$

である。さらに、

$$\kappa = 0, \quad z_b = z_a = 0, \quad z_0 = H \tag{4-8}$$

( $H$  は重心の高さ) の場合は、

$$A = \frac{H}{g}, \quad B_2 = \frac{y_a - y_b}{x_a - x_b} \cdot \frac{\alpha_x}{2}, \quad B_1 = \frac{y_a - y_b}{x_a - x_b} V_{x0}, \quad (4-9)$$

$$B_0 = \frac{[y_a - y_b]H\alpha_x + [x_b y_a - x_a y_b]g}{(x_a - x_b)g}$$

となって、従来の平地の場合の方程式と一致する。

(4-6)式の一般解は

$$y_G(t) = C_1 e^{\frac{t}{\sqrt{A}}} + C_2 e^{-\frac{t}{\sqrt{A}}} + B_2 t^2 + B_1 t + 2AB_2 + B_0 \quad (4-10)$$

であり、それぞれの係数は

$$A = \frac{z_0}{g} - \frac{x_a z_b - x_b z_a}{(x_a - x_b)g}, \quad B_2 = \frac{y_a - y_b}{x_a - x_b} \cdot \frac{\alpha_x}{2}, \quad B_1 = \frac{y_a - y_b}{x_a - x_b} V_{x0},$$

$$B_0 = -\frac{(y_b z_a - y_a z_b)\alpha_x + \{(x_b y_a - x_a y_b)(k\alpha_x + g) + (y_a - y_b)z_0\alpha_x\}}{(x_a - x_b)g} \quad (4-11)$$

である。係数  $C_1, C_2$  は任意の定数であり、動的安定を保つ軌道は唯一ではなく、自由度を持っていることがわかる。この任意定数は、前後の軌道との境界条件に応じて、適切に定めることができる。これについては、4.2節で詳しく論ずる。

#### 4.1.3 平地の場合

先の(4-11)式において、

$$H = z_0 - \frac{x_a z_b - x_b z_a}{x_a - x_b} \quad (4-12)$$

とおくと、

$$A = \frac{H}{g}, \quad B_0 = \frac{x_a y_b - x_b y_a - (y_a - y_b)A\alpha_x}{x_a - x_b} \quad (4-13)$$

となり、文献 33) に示した ZMP を用いて求めた平地の軌道と同じ表記になる。すなわ



ち、 $H$  の値が平地と同じであれば、軌道も同じになる。(4-12)式の右辺第1項はウェーブ開始時の重心高さ、第2項は2つの着地点の間を対に内分する点の高さ、すなわち、2つの支持点を結ぶ直線とウェーブ座標系の  $y z$  平面との交点の  $z$  座標である。このことから、Fig.4-1のように  $H$  が平地と変わらない歩容では、軌道は平地と同じである。例えば、連続した階段を基準歩容で昇ってゆく場合は  $H$  が一定である。ZMPを用いて求めた平地の軌道との差異については、次節に具体例を示す。

## 4.2 胴体重心の左右揺動補償軌道生成

### 4.2.1 ウェーブ座標系の設定

拡張トロット歩容において、前述のように、ある後脚接地時からもう一方の後脚接地時までの間を1ウェーブと定める。左右揺動補償をする前の目標軌道は一般的な歩行軌道に幅広く対応できるように、一定の旋回半径や旋回角度を定めるのではなく、任意の曲線軌道とする。これを1ウェーブごとの線分のつなぎあわせで近似して実際の目標軌道とする。この軌道に沿って各ウェーブ毎に設定する座標系上で軌道を生成し、それらをつなぎ合わせて全体の軌道とすることを試みる<sup>82)</sup>。

ウェーブ座標系  $\Sigma_{k+1}$  は、Fig.4-2のようにウェーブ開始時の重心位置から目標軌道に下した垂線の足の位置を原点とする。そして目標軌道の方向に  $x$  軸、それと垂直な水平方向に  $y$  軸をとる。また、ウェーブ終了時  $WT_{k+2}$  の目標位置が目標軌道上に与えられている。また、支持脚位置も同座標系上に設定しておく。境界条件もすべてウェーブ座標系で表さなくてはならない。そこで、前ウェーブ終了点での位置を新ウェーブ座標系に変換しておく。また時刻  $t$  はウェーブ切換時  $WT_{k+1}$  からの経過時間とする。

ウェーブ座標系  $\Sigma_{k+1}$  上にはFig.4-3のようにウェーブ  $W_{k+1}$  初期の静歩行期間、中期の動歩行期間、そして終了期の静歩行期間をそれぞれ第1, 2, 3相と名付けて設定しておく。第1, 3相では、 $y$  軸方向の運動は等速とする。第2相の  $y$  軸方向運動は、第1相と第3相との連続性を考慮した上で、動的安定が保たれるようにする。

### 4.2.2 前提条件

立案する胴体重心の左右揺動補償軌道の詳細を論ずるため、まずいくつかの前提条件を示しておくことにする。

i) 既知パラメータはウェーブ  $W_{k+1}$  での胴体重心の目標軌道、この区間でのデューティ比  $\beta$ 、ウェーブ初期の4脚支持期間、ウェーブ開始時の重心の位置、速度、姿勢、

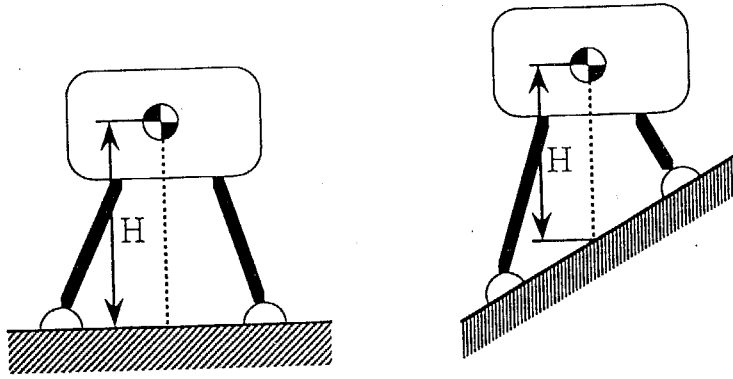


Fig.4-1 A parameter H of plane walk and stair climbing

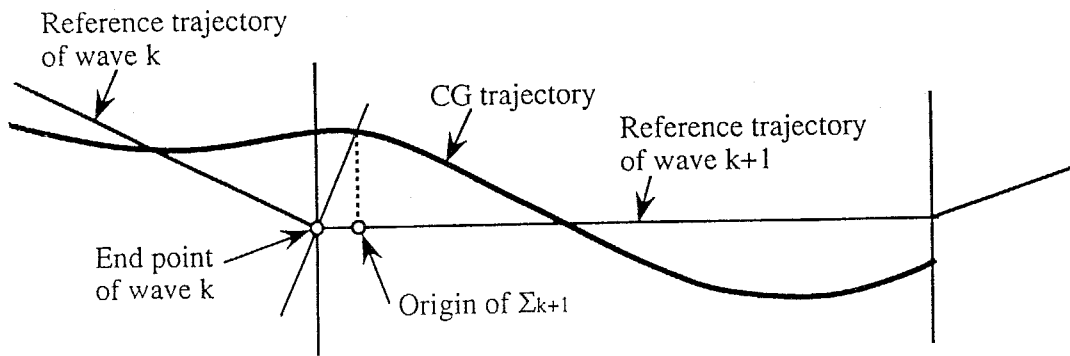


Fig.4-2 A wave coordinate  $\Sigma_{k+1}$

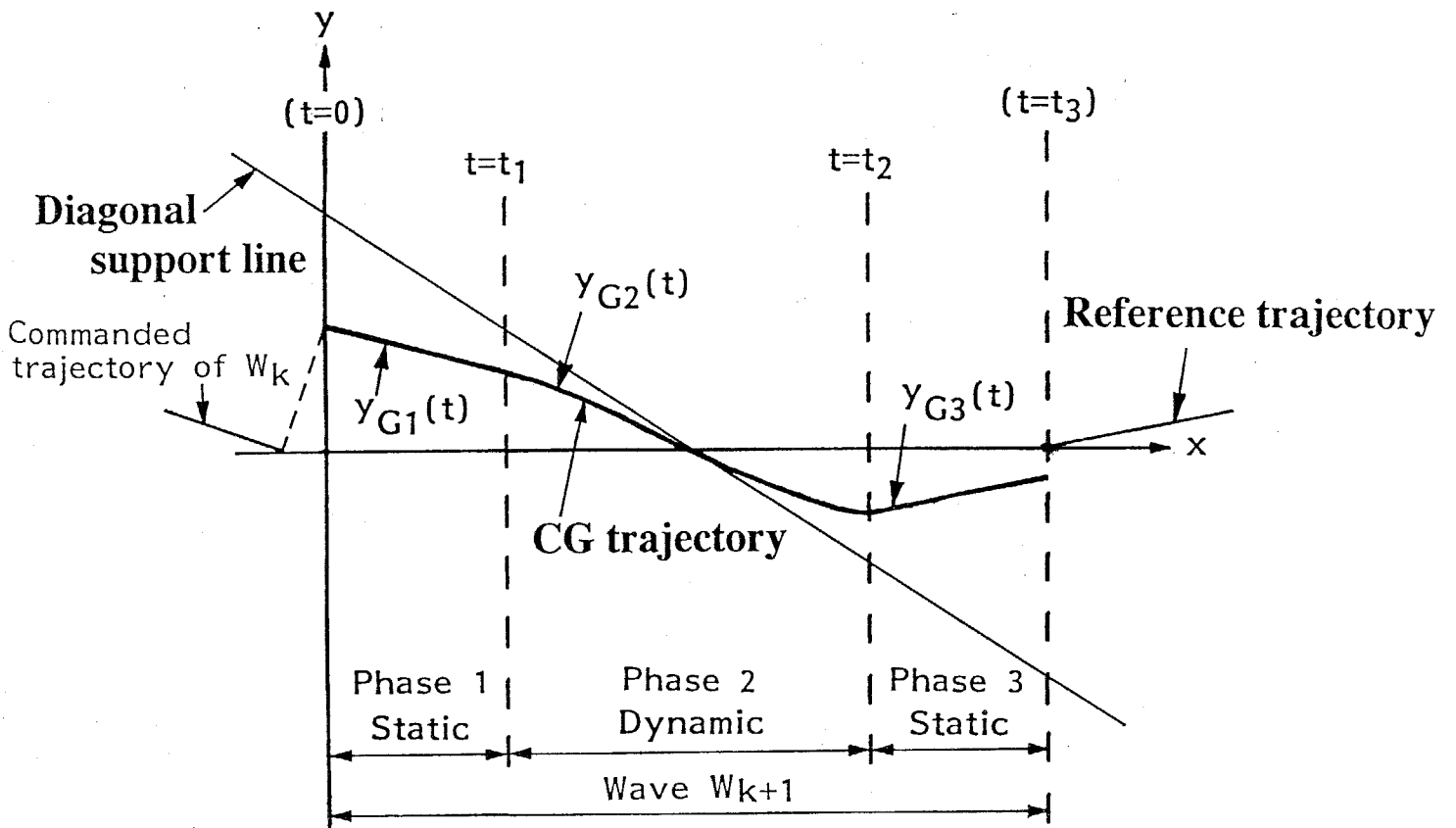


Fig.4-3 Planned trajectory of CG during wave  $W_{k+1}$

ウェーブ終了時の目標位置、そして支持脚位置である。

ii) 胴体重心の目標軌道に沿った方向の加速度は、ウェーブ $W_{k+1}$ の期間では一定であるとする。

iii) 胴体重心が $y$ 軸方向に生ずる補償軌道の速度は、ウェーブ $W_{k+1}$ の期間で連続的に変化するものとする。

iv) 脚の振り運動が胴体に及ぼす動的効果は第1近似として無視する。これは胴体と脚の運動計画を独立して行うことで補償軌道計算の演算アルゴリズムを著しく単純化できること。また、この近似による安定軌道の変動誤差のオーダーは、筆者らの試作した機械モデルの諸元の場合、足先移動量の約3%程度であり比較的小さく<sup>76)</sup>、本制御系は軌道のフィードフォワード補償だけでなく、レベルCのフィードバック的な動的平衡調整と組み合わせるため、あまり問題にならないと考えられるためである。

#### 4.2.3 軌道の接続条件

3つの相に分類される単一ウェーブ区間での左右揺動補償軌道は以下のような考え方で接続する。

第1相、第3相の軌道運動は、境界条件を満足する範囲内ならば任意に設定できる。しかし、このうち第1相の補償軌道を直前のウェーブとの連続性まで考慮して設定しようとする、指令された目標軌道によっては大きく屈曲した補償軌道が生成され、重心が静的安定領域を外れることがある。このことはいくつかのシミュレーション実験で明らかとなった。またそのような補償軌道を生成しようとする、演算がかなり複雑になってしまう。

ところが拡張トロット歩容では、すでに指摘したようにウェーブ切替点で4脚支持状態が形成される。本研究では後で述べるように、支持脚切り換え時の脚の力配分を連続的にするため、短い時間ではあるが4脚支持の期間を設定している。そのため、その時点では若干胴体運動が変動しても安定性が大きく悪化してしまうことは防止できる。そこで第1相の初期状態（ウェーブ切替時 $WT_k$ ）においては特に速度の連続性は考えず、できるだけ単純な補償軌道を選択することにする。

一方、第3相についてはウェーブ切替時 $WT_{k+1}$ 以降の軌道と滑らかにつながることを望ましい。次のウェーブの胴体軌道はまだ未知であるが、目標軌道の方向と速度が与えられているものとする。第3相の終了条件は次ウェーブの目標軌道に沿うようにしておくべきである。また、その軌道もできるだけ単純化し演算を高速化すべきである。

さらに、これらの歩容決定法は静歩行が出来る状況、つまり第2相が狭くなった場合には自動的に目標軌道をたどり、常に動的安定保持を行なう歩容では自動的に第2相のみが生成されるものが望ましい。

以上のような立場で、左右揺動補償のy軸方向の軌道運動計画をまとめると以下のようなになる。

- 1) ウェーブ $W_{k+1}$ の第1相では、y軸方向の運動は等速とする。
- 2) 第2相のy軸方向運動は、初期条件を第1相の速度と等しくし、終端条件を第3相の速度と等しくする。そしてx,z軸方向速度と同期して運動することで動的安定が保たれるようにする。
- 3) 第3相でのy軸方向速度は一定の値 $V_{y3}$ に保持する。ここで、 $V_{y3}$ は、連続した軌道生成において軌道を目標軌道近くで収束させるために適切な値を与えなければならない。また、次のウェーブ軌道との連続性も考慮しなければならない。標準的な軌道についてシミュレーションを行なって検討した結果、次のウェーブ $W_{k+2}$ の目標軌道の進行速度に合わせるとよい。すなわち直線歩行においてはゼロ、曲線軌道では次のウェーブの目標軌道上の速度を現在のウェーブ座標系で表した時のy方向成分とする。

#### 4.2.4 軌道の生成

以上の考察を考慮した左右揺動軌道の具体的な生成手順は以下の通りである。

まず、胴体重心の進行方向(x軸方向)と上下方向(z軸方向)の座標は前提条件のii)から第1,2,3相すべてにおいて、

$$x_G = V_{x0}t + \frac{1}{2}\alpha_x t^2$$

$$z_G = V_{z0}t + \frac{1}{2}\alpha_z t^2 \quad (4-14)$$

と与えることにする。ここで、初速度 $V_{x0}$ はウェーブ切替時 $W_{Tk}$ の胴体重心のx方向の速度である。加速度 $\alpha_x, \alpha_z$ は与えられたウェーブ切替時 $W_{Tk}$ と $W_{Tk+1}$ の速度とその間の経過時間から計算される定数である。

各相での胴体重心のy方向座標は以下のように求める。第1相の胴体重心のy座標 $y_{G1}(t) \{ t=0 \sim t_1 \}$ は、前節の1)から

$$y_{G1}(t) = y_{G0} + V_{y1} t \quad (4-15)$$

と与える。ただし  $y_{G0}$  はウェーブ切替時  $W_{Tk}$  の重心の  $y$  座標である。また、 $V_{y0}$  は設定する初速度であり、ここでは未知数である。

第2相の胴体重心の  $y$  座標  $y_{G2}(t) \{ t = t_1 \sim t_2 \}$  は、前節で示したように求められ、(4-10)(4-11)式のようになる。式中の  $C_1$  と  $C_2$  は未知の定数である。

さらに第3相では、前節の3)から左右方向速度  $y_{G3}(t) \{ t = t_2 \sim t_3 \}$  を  $V_{y3}$  に設定するので、

$$y_{G3}(t) = Y_{G3} + V_{y3} (t - t_2) \quad (4-16)$$

となる。ここで  $Y_{G3}$  は未知の定数である。

以上、(4-21)(4-15)(4-16) 式に含まれる未知の定数は合計4つであった。これらの未知定数は、前提 iii) の左右方向運動の連続条件を満足するため、時刻  $t_1$ 、 $t_2$  について以下の4つの関係が成り立つことで誘導できる。

$$y_{G1}(t_1) = y_{G2}(t_1) \quad (4-17)$$

$$\dot{y}_{G1}(t_1) = \dot{y}_{G2}(t_1) \quad (4-18)$$

$$y_{G2}(t_2) = y_{G3}(t_2) \quad (4-19)$$

$$\dot{y}_{G2}(t_2) = 0 \quad (4-20)$$

誘導した結果を以下に示す。

$$C_1 = \frac{A(2B_2 t_2 + B_1 - V_{y3}) \left(1 + \frac{t_1}{\sqrt{A}}\right) e^{\frac{t_1}{\sqrt{A}}} - B_2 t_1 + 2AB_2 + B_0 - y_{G0}}{\left(1 + \frac{t_1}{\sqrt{A}}\right) e^{\frac{2t_2 - t_1}{\sqrt{A}}} + \left(1 - \frac{t_1}{\sqrt{A}}\right) e^{\frac{t_1}{\sqrt{A}}}} \quad (4-21)$$

$$C_2 = C_1 e^{\frac{2t_2}{\sqrt{A}}} + A(2B_2 t_2^2 + B_1 - V_{y3}) e^{\frac{t_2}{\sqrt{A}}} \quad (4-22)$$

$$V_{y1} = \frac{C_1}{\sqrt{A}} e^{\frac{t_1}{\sqrt{A}}} - \frac{C_2}{\sqrt{A}} e^{\frac{-t_1}{\sqrt{A}}} + 2B_2 t_1 + B_1 \quad (4-23)$$

$$Y_{G3} = y_{G2}(t_2)$$

(4-24)

以上により、各ウェーブの軌道が求められ、これをつないでゆくと全体の連続した軌道が得られる。誘導した胴体重心の左右揺動補償軌道は支持脚の座標や胴体の目標軌道が変化してもそれに対応した胴体重心軌道生成が可能であり、汎用性のある歩容生成法である。例として直進歩行で移動速度ゼロから400 [mm/sec]まで連続的に加速してゆく場合の軌道をFig.4-4に示す。デューティー比は0.8から0.5まで変化している。また、半径1mの旋回歩行の軌道をFig.4-5に示す。このときのデューティー比は初めが0.6でその後、減少して4歩目以降は0.51で、移動速度は150 [mm/sec]である。各ウェーブ座標系で生成された軌道が滑らかに連続して全体の軌道を構成している。次に、平地から階段を昇りはじめる場合の軌道をFig.4-6(a)に示す。デューティー比は0.5で移動速度は260 [mm/sec]である。先程と同様に滑らかな軌道が生成されている。拡大図には波線は本来なら平地にしか適用できないZMPを用いて求めた軌道も示しているが、右側の部分はすべての脚が階段に乗った状態で、前章に示したHの値 (Fig.4-1参照) が平地と等しいため、軌道は全く同じである。しかし、左側の拡大図では、階段にさしかかる部分であるため、Hの値は平地と異なり、軌道は僅かではあるが異なっている。また、Fig.4-6(b)には階段1段に2歩の歩容の場合である。この場合は常にHの値が平地と異なるため、本論文の手法による軌道とZMPによる軌道は異なっている。ただし、Fig.4-6では、この2つの軌道との差はごくわずかである。

### 4.3 遊脚運動の連続軌道生成

#### 4.3.1 前提条件

レベルBTRでの遊脚連続軌道の生成法を検討するため、いくつかの前提条件を検討しておくことにする。

- 1) 上位指令系から、遊脚を始める時点と接地時点での足先の絶対座標位置は与えられているとする。遊脚期の時間 $T_s$ 、遊脚の最大振り上げ高さ $H^*$ も指令されているとする。
- 2) 遊脚が上下方向 (z軸方向) および水平方向 (x, y軸方向) に出し得る最大加減速度が機構的条件から規定され、それぞれ $\alpha_{Lz}$ 、 $\alpha_{Lx}$ であるとする。
- 3) 最大振り上げ高さ $H^*$ は、障害物回避特性を向上するため遊脚中できるだけ長時間

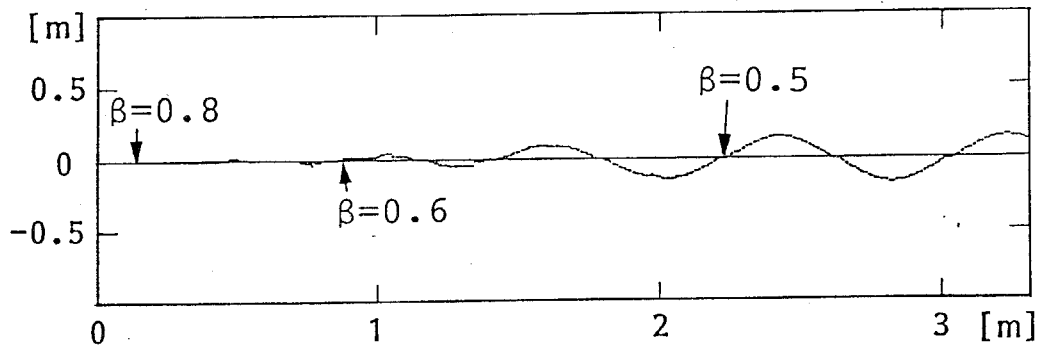


Fig.4-4 Top view of trajectory of body's center of gravity as it accelerates from a statically stable crawl (at left) to a dynamically stable trot (at right)

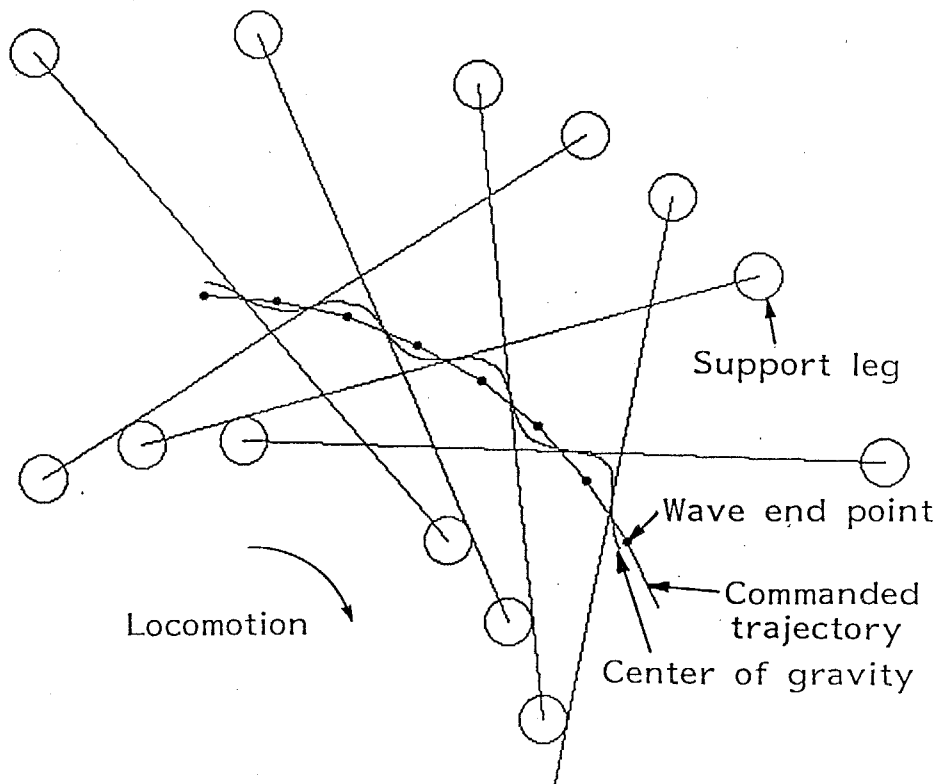


Fig.4-5 Top view of trajectory of body's center of gravity and of foot placement during a walk along a circular path

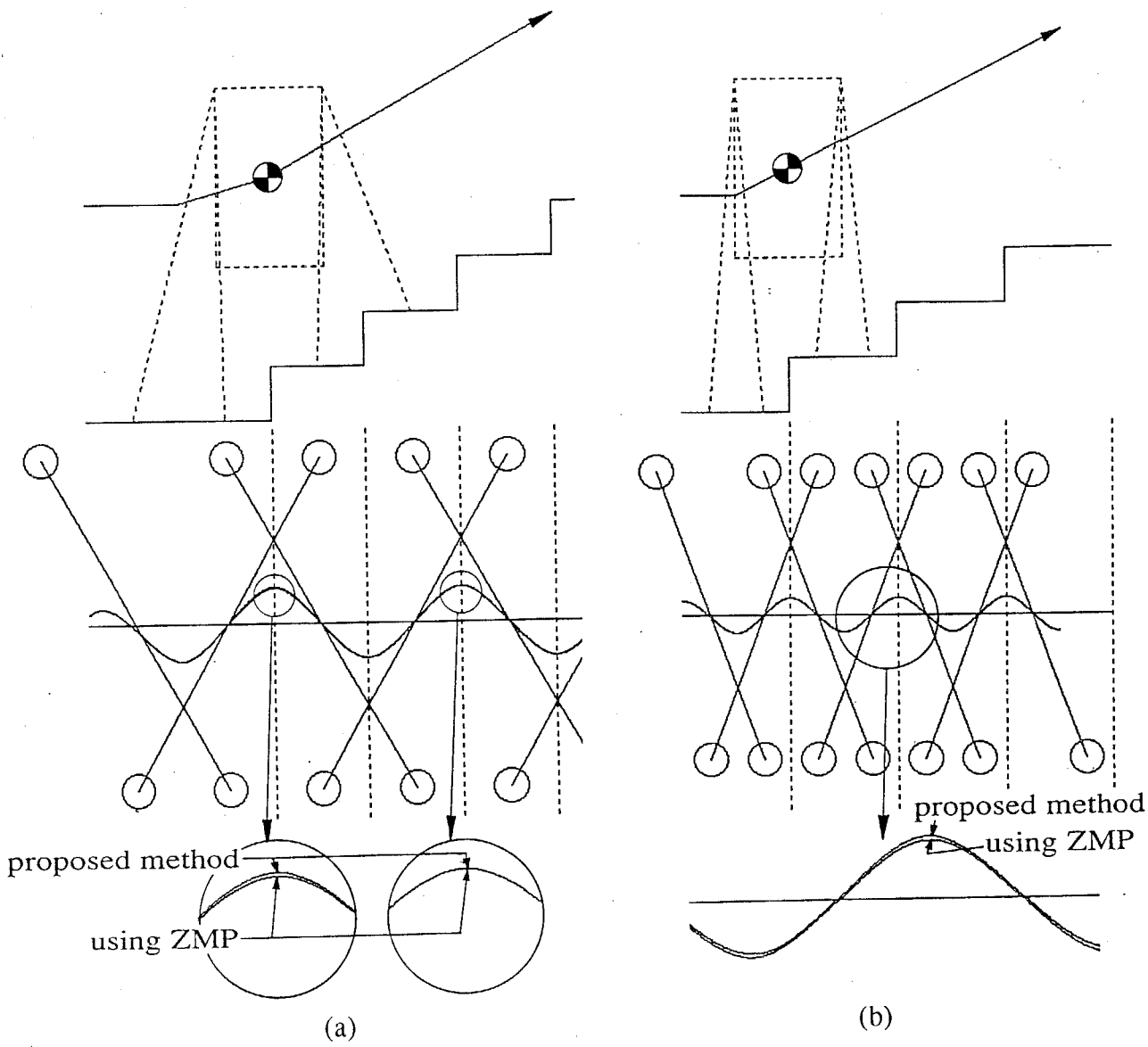


Fig.4-6 Top view of trajectory of body's center of gravity and of foot placement during a walk on stairs



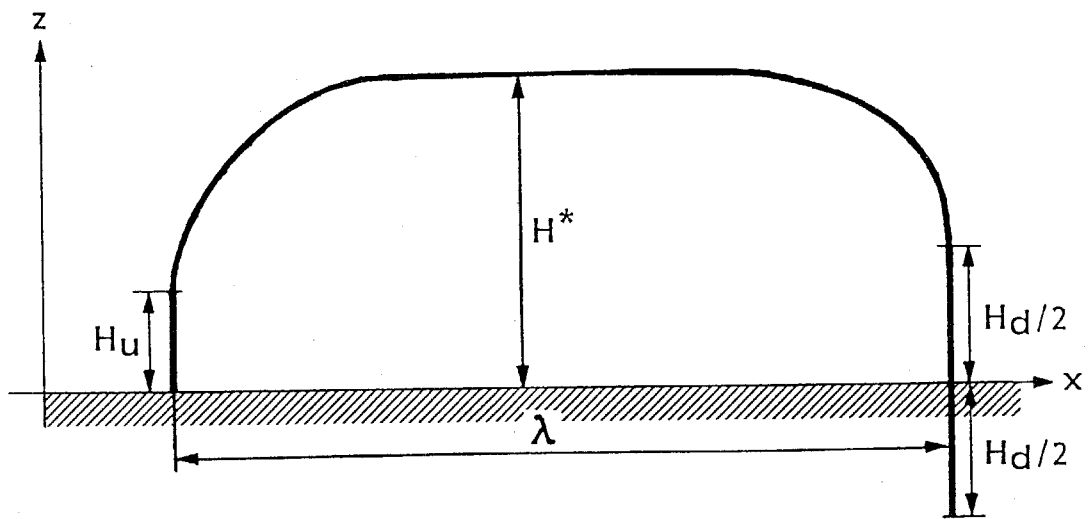


Fig.4-7 A trajectory of swing leg on absolute coordinates

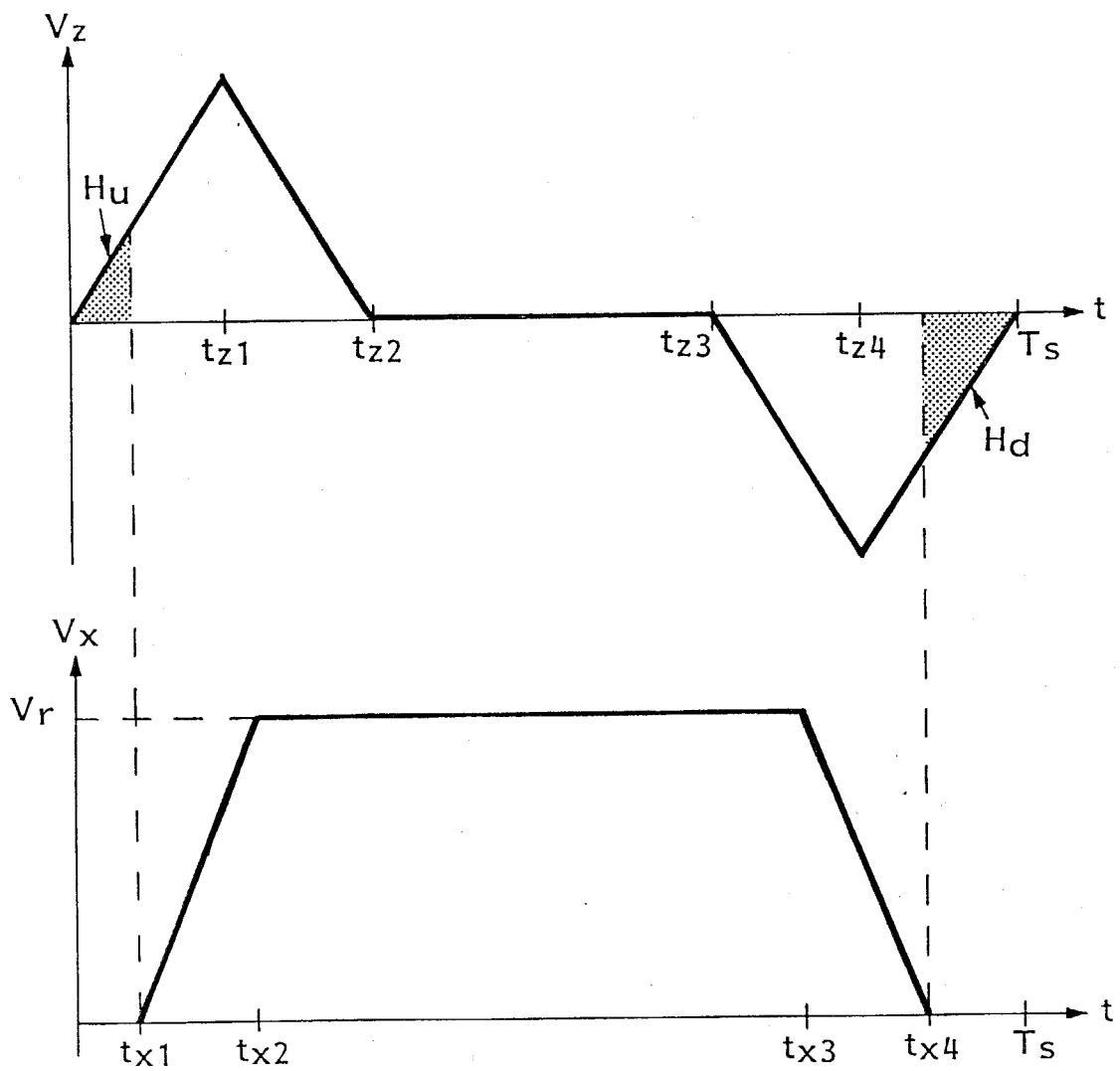


Fig.4-8 Velocity diagrams of swing leg

保持することにする。

4) 遊脚開始時（以下 up 相と呼ぶ）および終了時（以下 down 相と呼ぶ）においては Fig.4-7 のように脚を地面に対して垂直に運動させる期間を設ける。これは、不必要な地面との滑り運動を防止するとともに、外乱により着地のタイミングが多少前後しても着地位置が大きく変化しないようにするためである。この垂直移動距離は up 相で  $H_u$ 、down 相で  $H_d$  とする。

5) down 相を開始する高さは Fig.4-7 に示すように接地推定高さの  $H_d/2$  であるとする。これは、接地推定高さの上下に各々高さ  $H_d/2$  の垂直上下動部分を設けることにより、地表の最大高さ  $H_d/2$  の予知できなかった凹凸を吸収するためのものである。ただし、この上下運動期間中は常にセンサで足先の状態を計測し、接地したら瞬時に  $z$  方向制御は支持脚モードに切り換えるものとする。

5)  $x, y$  軸方向の最大振り速度  $v_r$  は、遊脚軌道計画の結果の 1 つとして生成される。ただし、上位指令系からの歩容計画においては、この値が機構的な制限を越えないようにあらかじめ余裕を持って計画されているものとする。

#### 4.3.2 軌道の生成

これらの前提の基に遊脚軌道は以下のように生成する。

まず、Fig.4-8 (a)(b) のように  $z$  軸方向および  $x, y$  軸方向それぞれについて速度線図を設定する。ここで、 $z$  軸方向には、高さ  $H^*$  まで脚を最短時間で上昇させるため、時刻  $t_{z2}$  の間に最大加速および最大減速運動を同一時間 ( $t_{z2} - t_{z1} = t_{z1}$ ) 行う。下降時は時刻  $t_{z3}$  から時刻  $T_s$  まで最大加速および最大減速の運動を同じく同一の時間 ( $T_s - t_{z4} = t_{z4} - t_{z3}$ ) 実施し、 $H^* + H_u$  の距離降下させる。

$x$  軸方向は、最大加速、等速（速度  $v_r$ ）、最大減速という順の運動を行なうとする。復帰速度  $v_r$  は全復帰距離が 2 つの着地点間距離  $\lambda_x, \lambda_y$  と一致するように決定する。ここで、復帰運動の開始時刻  $t_{x1}$  は  $z$  方向の軌道計画で足先高さが  $H_u$  となる時刻、終了時刻  $t_{x4}$  は足先高さが  $H_d/2$  となる時刻である。

このような軌道計画を行うときの具体的な指令値は、 $z$  方向については以下のようになる。

$$t_{z1} = \sqrt{\frac{H^*}{\alpha_{Lz}}} \quad (4-25)$$

$$t_{z2} = 2 t_{z1} \quad (4-26)$$

$$t_{z3} = T_s - 2 \sqrt{\frac{H^* + H_d/2}{\alpha_{Lz}}} \quad (4-27)$$

$$t_{z4} = T_s - \sqrt{\frac{H^* + H_d/2}{\alpha_{Lz}}} \quad (4-28)$$

$$V_z(t) = \alpha_z t \quad (0 \leq t < t_{z1}) \quad (4-29)$$

$$V_z(t) = \alpha_z (t_{z2} - t) \quad (t_{z1} \leq t < t_{z2}) \quad (4-30)$$

$$V_z(t) = 0 \quad (t_{z1} \leq t < t_{z2}) \quad (4-31)$$

$$V_z(t) = -\alpha_z (t - t_{z3}) \quad (t_{z3} \leq t < t_{z4}) \quad (4-32)$$

$$V_z(t) = -\alpha_z (T_s - t) \quad (t_{z1} \leq t < T_s) \quad (4-33)$$

また、x 方向については以下のようになる。

$$t_{x1} = \sqrt{\frac{2H_u}{\alpha_{Lx}}} \quad (4-34)$$

$$t_{x4} = T_s - \sqrt{\frac{2H_d}{\alpha_{Lx}}} \quad (4-35)$$

$$t_{x2} = t_{x1} + \frac{1}{2}(t_{x4} - t_{x1}) - \sqrt{(t_{x4} - t_{x1})^2 - 4\lambda_x/\alpha_{Lx}} \quad (4-36)$$

$$t_{x3} = t_{x4} - \frac{1}{2}(t_{x4} - t_{x1}) - \sqrt{(t_{x4} - t_{x1})^2 - 4\lambda_x/\alpha_{Lx}} \quad (4-37)$$

$$V_x(t) = 0 \quad (0 \leq t < t_{x1}) \quad (4-38)$$

$$V_x(t) = \alpha_x (t - t_{x1}) \quad (t_{x1} \leq t < t_{x2}) \quad (4-39)$$

$$V_x(t) = \alpha_x (t_{x2} - t_{x1}) \quad (t_{x2} \leq t < t_{x3}) \quad (4-40)$$

$$V_x(t) = \alpha_x (t_{x4} - t) \quad (t_{x3} \leq t < t_{x4}) \quad (4-41)$$

$$V_x(t) = 0 \quad (t_{x1} \leq t < T_s) \quad (4-42)$$

y 方向については、x 方向と全く同様である。Fig.4-9 (a) に絶対座標系から見た足先軌道を示す。そしてこれと胴体重心の運動を合成し、実際に歩行機械が生成すべき運動である胴体座標系での軌道の例を Fig.4-9 (b) に示す。

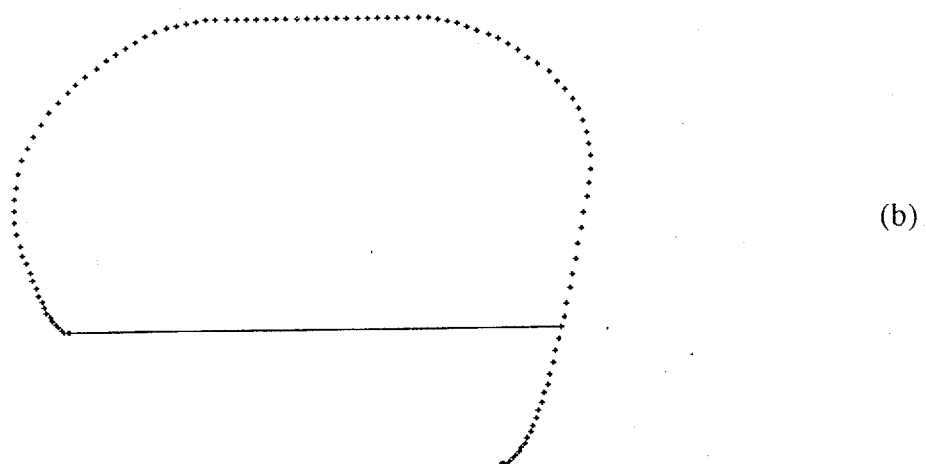
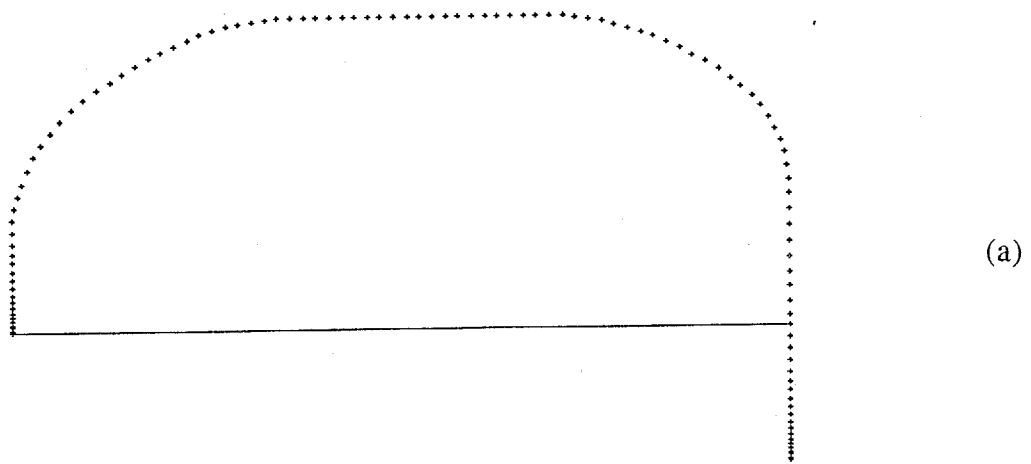


Fig.4-9 An example of swing leg trajectory (a) on absolute coordinates. (b) on body coordinates.

## 第5章 動的歩行のための接地力および姿勢制御

本章では、4足歩行機械の不整地における動的歩行を実現させるため、動的効果を考慮した新しいアクティブサスペンション制御法について検討する。これは、従来の研究のように地面の硬さを計測してモデル化する必要がなく、未知の地形上を動的歩行で高速に歩行することを可能にするものである。

### 5.1 アクティブサスペンション制御の導入

車輪型の移動機械が多少の凹凸地形を踏破できるのはサスペンション機構によるところが大きい。サスペンションには大きくわけて2つの機能がある。1つは本来不静定な4点以上の接地において適切な力配分を実現することである。従来の歩行機械では主に6足のもので安定した接地圧を得るために力制御の研究が行なわれている<sup>8,40,41,42,43,67,61,75</sup>。しかし、4足歩行機械の動的歩容においても支持脚切り換え時には4脚支持の期間が生じる。このとき地面が平坦でない場合には接地できない脚ができ、本来、2脚支持期間に崩れたバランスを修正すべきところで逆に大きく傾いたりしてしまうおそれがある。このため、4足歩行機械においてもサスペンション機構が有効であると考えられる。

サスペンションの第2の機能はショックの吸収である。車輪型の移動機械はサスペンションの機能により、地形の凹凸に振動を吸収し、胴体の振動を小さくすることができる。歩行機械の場合は位置制御のみでは、遊脚を着地した時に大きな衝撃力が生じてしまう。大きな衝撃力は機械の故障につながり、建築物の中を歩行するときなどは床にも悪影響を及ぼす恐れがある。歩行機械にもサスペンションの機能を導入すれば、着地時の衝撃を小さくすることができる。

一方、歩行機械の特徴の1つとして停止作業時の頑健なプラットフォームになる特性があげられるが、車輪型に用いられるようなバネとダンパによるサスペンションはこの特性を疎外してしまう。また、歩行機械では車輪型と異なり脚を浮かせて移動させる動作がある。このときは荷重がなくなるためバネとダンパによるサスペンションでは下限まで伸びてしまい、アクチュエータによる脚の上下運動に対して実際の足先の上下動が小さくなってしまう。本論文では、これらの欠点を解決するため、センサとアクチュエータによってサスペンションの機能を実現するアクティブサスペンションの導入について検討する。

アクティブサスペンションの実現には足先に力センサを装備し、脚の上下運動を力制御することが必要である。本節ではその力の目標値の決定方法について、予め必要な接地力を求めておくフィードフォワードによる接地力決定法と、歩行ロボットの状態によって接地力を調整するフィードバックによる接地力決定法、およびこの2つの組合せ方について説明する<sup>84)</sup>。

なお、力制御を行うのは支持脚の期間のみとする。遊脚から支持脚になるときの切り替えは、脚軌道の項で述べたように、力センサの信号がある値以上になった時に行う。支持脚から遊脚への切り替えは現在の脚の高さのモニタ値より目標値が高くなった時に行う。これによって凹凸のある地形でもスムーズな切り替えが可能である。また、z軸方向以外の自由度は従来通りの位置制御を行う。

## 5.2 フィードフォワード制御

歩行時には支持脚を次々と切り換えてゆくが、位置制御では支持脚が遊脚になる瞬間、遊脚が支持脚になる瞬間の力が不連続である。このことは歩行機械の動きがスムーズでなくなる原因になっている。このような問題点を解決するためには、連続した力の目標値を設定して力制御を行うことが有効である。フィードフォワードによる接地力決定方法は、外乱が加わらないと仮定して、運動に必要な接地力を予め求めておく方法である。

4足歩行機械では、2,3,4脚支持の状態があるが、その各状態における具体的な計算方法を次に示す。

### 5.2.1 2および3脚支持の場合

ここでは、各脚の接地力の鉛直方向成分のみを考える。2章で述べた場合と同じく、運動に必要な接地力の合計を並進力 $(\overline{F}_x, \overline{F}_y, \overline{F}_z)$ と重心回りのモーメント $(\overline{M}_x, \overline{M}_y, \overline{M}_z)$ とする。また、重心の座標を $(x_G, y_G, z_G)$ 、各脚の座標を $(x_i, y_i, z_i)$   $\{i=1 \sim 4\}$ 、各脚のフィードフォワード目標接地力を $F_{ff_i}$  ( $i=1 \sim 4$ )、本体重量を $mg$ とおく。a, b, c番 ( $a, b, c=1 \sim 4$ )の脚が支持脚で、d番の脚が遊脚であるとする、モーメントの釣り合いから次式が成り立つ。

$$(x_a - x_G)F_{ffa} + (x_b - x_G)F_{ffb} + (x_c - x_G)F_{ffc} = -\overline{M}_y \quad (5-1)$$

$$(y_a - y_G)F_{ffa} + (y_b - y_G)F_{ffb} + (y_c - y_G)F_{ffc} = \overline{M}_x \quad (5-2)$$

また接地力と自重の釣り合いから

$$F_{ffa} + F_{ffb} + F_{ffc} - mg = \overline{F}_z \quad (5-3)$$

以上の3式のうちの未知数は  $F_{ffa}, F_{ffb}, F_{ffc}$  の3つであるから、これらを求めることができる。結果は以下のようになる。

$$F_{ffa} = \frac{\overline{M}_x (x_b - x_c) + \overline{M}_y (y_b - y_c) + \{y_b x_c - y_c x_b + y_G (x_b - x_c) + x_G (y_c - y_b)\} (\overline{F}_z + mg)}{x_a (y_c - y_b) + x_b (y_a - y_c) + x_c (y_b - y_a)} \quad (5-4)$$

3つの支持脚 a, b, c の順番は任意であるから、求めたい脚を a とおけばよい。

以上が3脚支持の時の接地力である。

2脚支持の時もこれと全く同様の式で表される。なぜならば2脚支持の時は支持脚対角線（2つの接地点を結んだ線）回りのモーメントがゼロであるので、1つの遊脚を支持脚として扱ってもその接地力はゼロになるからである。

### 5.2.2 4脚支持の場合

4脚支持の場合は、未知数が4つあるので3脚支持の場合のようにモーメントの釣り合いと自重と接地力の釣り合いの3つの式からそのまま求めることはできない。そこでもう一つ何か条件を付加して式を4つにするという方法も考えられるが、接地力を連続に変化させたいという要求があるので、4脚支持期の前後の3脚支持期の接地力を連続につなぐことで接地力を求める。

4脚支持の直前と直後は3脚又は、2脚支持であり、その時の脚の位置、ZMPの位置がわかっているので各脚の接地力も求めることができる。また、その間の重心の移動速度はほぼ一定であると仮定すると、4脚支持の前後の接地力を線形に補完することにより各時刻における接地力とすることができる。すなわち、時刻を  $t$ 、各時刻における各脚の接地力を  $F_j(t)$   $\{j=1 \sim 4\}$  とし、4脚支持になる直前と直後の時刻をそれぞれ  $T_b, T_n$ 、その時の各脚の接地力を  $F_{bj}, F_{nj}$   $\{j=1 \sim 4\}$  とすると、

$$F_i(t) = \frac{F_{bi}(T_n - t) + F_{ni}(t - T_b)}{T_n - T_b} \quad (5-5)$$

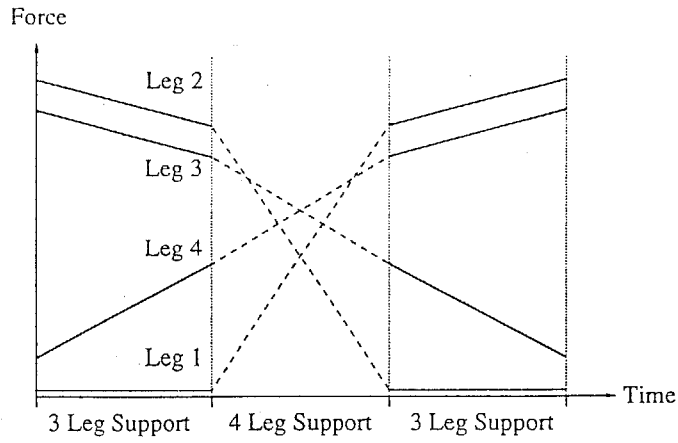


Fig.5-1 Foot force diagram of feedforward control

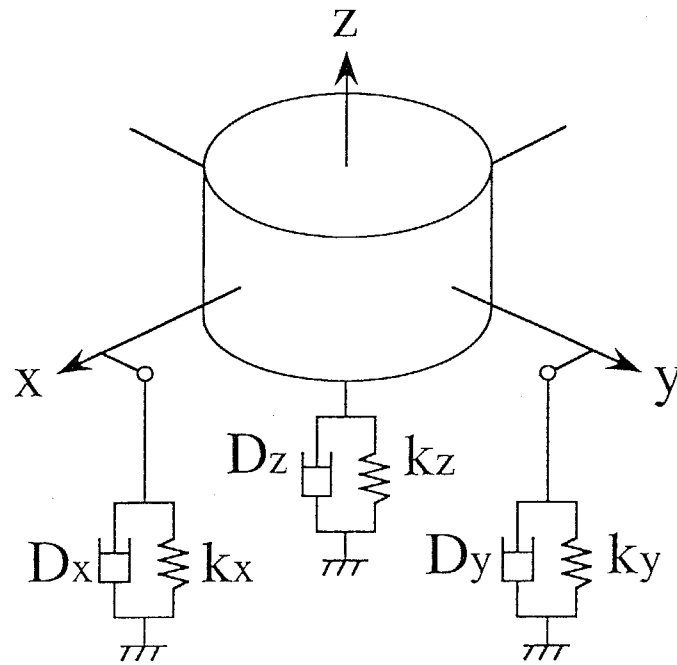


Fig.5-2 Impedance setting on absolute coordinates

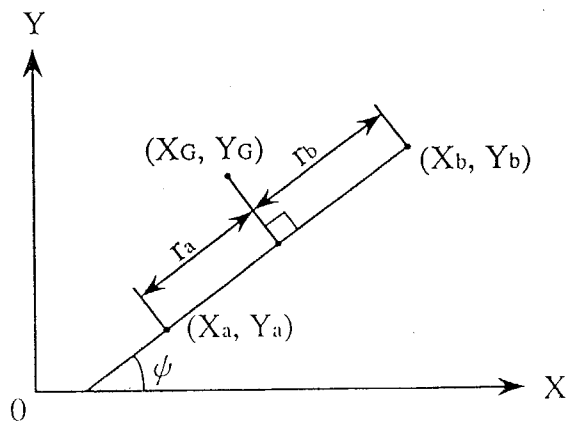


Fig.5-3 Notation of dynamic phase for calculating feedback forces



となる。この変化の様子をFig.5-1 に示す。なお歩行開始時は最初から4脚支持であり直前の3脚支持はないが、歩行開始前の起立動作時の接地力は全脚均等としているので、4脚支持になる直前の接地力としてこの値を使用する。

以上がフィードフォワードによる接地力決定法である。

### 5.3 フィードバック制御

#### 5.3.1 空間インピーダンスの設定

前項で述べたフィードフォワードによる接地力だけでは外乱に対応できない。そこで歩行機械の状態をモニタして接地力を修正するフィードバック接地力決定法を導入する。外乱があっても歩行機械が傾いたり、振動したりしないためには、Fig.5-2 のように絶対座標系に対して胴体にインピーダンスを設定するのが有効であると考えられる。これは各脚の接地力を適切に発生させることにより、胴体の  $x$ 、 $y$  軸回りおよび  $z$  軸方向にあたかもバネとダンパが設定されているかのような運動を実現するものである。ここで、 $x$ 、 $y$  軸回りの胴体傾斜角は傾斜センサ、重心高さは各脚の  $z$  軸ポテンシオメータから得られる。それらの情報を接地力にフィードバックすることにより Fig.5-2 のような特性を実現させ歩行ロボットの安定化をはかる。具体的な算出方法を次に示す。

各パラメータを次のようにおく。

設定する減衰定数とバネ定数

$x$ 軸回り	$D_x, K_x$
$y$ 軸回り	$D_y, K_y$
$z$ 軸方向	$D_z, K_z$

必要なフィードバックモーメントおよび  $z$  軸方向の力

$x$ 軸回り	$\Delta M_x$
$y$ 軸回り	$\Delta M_y$
$z$ 軸方向	$\Delta F_z$

胴体の角度、各速度 および重心の  $z$  軸方向の基準高さからのずれと速度

$x$ 軸回り	$\theta_x, \dot{\theta}_x$
$y$ 軸回り	$\theta_y, \dot{\theta}_y$
$z$ 軸方向	$\Delta z, \dot{\Delta z}$

胴体の質量	$m$
フィードフォワードによる接地力	$F_{ffj} \{j = 1 \sim 4\}$
各脚の接地力修正量	$\Delta F_j \{j = 1 \sim 4\}$
各脚先の z 軸方向の重心からの距離	$L_j \{j = 1 \sim 4\}$
各脚の座標	$(x_j, y_j, z_j) \{j = 1 \sim 4\}$
胴体重心の座標	$(x_G, y_G, z_G)$

以上のパラメータを使用して最終的に $\Delta F_j$ を求める。胴体に減衰定数とバネ定数を設定した時の必要なモーメントおよび z 軸方向の力は

$$\Delta M_x = -D_x \dot{\theta}_x - K_x \theta_x \quad (5-6)$$

$$\Delta M_y = -D_y \dot{\theta}_y - K_y \theta_y \quad (5-7)$$

$$\Delta F_z = -D_z \Delta \dot{z} - K_z \Delta z \quad (5-8)$$

次に z 軸方向の基準高さからのずれを求めるのに必要な胴体高さを求める。その方法としては、単純に支持脚の z 軸方向の平均高さを用いる方法もあるが、その場合は不整地では支持脚切り換え時に胴体高さの値が不連続になるので、次のようにフィードフォワードによる接地力を用いて重み付け平均を行う。

$$z_G = \frac{\sum_{j=1}^4 F_{ffj} L_j}{\sum_{j=1}^4 F_{ffj}} \quad (5-9)$$

フィードフォワードによる接地力は遊脚の時、着地した瞬間、脚を上げる瞬間はゼロであり、また連続的に変化するので、この式により得られる胴体高さは連続的に変化し、これによって求められるフィードバック量も連続になるという利点がある。次に前述のモーメントおよび力を得るために必要な $\Delta F_j$ を 2, 3, 4 脚支持の場合に分けて求める。

### 5.3.2 3脚支持の場合

フィードフォワードのときと同様に、a, b, c 番の脚を支持脚とすると、モーメントおよび z 軸方向の力の釣り合いから次式が成り立つ。

$$(x_a - x_G)\Delta F_a + (x_b - x_G)\Delta F_b + (x_c - x_G)\Delta F_c = -\Delta M_y \quad (5-10)$$

$$(y_a - y_G)\Delta F_a + (y_b - y_G)\Delta F_b + (y_c - y_G)\Delta F_c = \Delta M_x \quad (5-11)$$

$$\Delta F_a + \Delta F_b + \Delta F_c = \Delta F_z \quad (5-12)$$

この場合は式が3つで未知数が3つだから解け、次の様になる。

$$\Delta F_a = \frac{\Delta M_x (x_b - x_c) + \Delta M_y (y_b - y_c) + \{y_b x_c - y_c x_b + y_G (x_b - x_c) + x_G (y_c - y_b)\} \Delta F_z}{x_a (y_c - y_b) + x_b (y_a - y_c) + x_c (y_b - y_a)} \quad (5-13)$$

3つの支持脚 a, b, c の順番は任意であるから、求めたい脚を a とおけばよい。以上が3脚支持のときの接地力修正量である。

### 5.3.3 4脚支持の場合

この場合は、4脚のうち直前に遊脚だった脚を除いた3脚と、次に遊脚になる脚を除いた3脚で、2通りの3脚支持の計算を行い、2つの計算結果を組合せて力を算出する。その組合せ方は直前に遊脚だった脚と、次に遊脚になる脚のフィードフォワードによる接地力の比を利用して重み付け平均をおこなう。

直前に遊脚だった脚を b 番、次に遊脚になる脚を n 番とする。b 番と n 番の現在のフィードフォワードによる接地力をそれぞれ  $F_{ffb}$ ,  $F_{ffn}$  とし、b 番を除いて計算した時の各脚のフィードバック力を  $\Delta F_{bj}$ 、n 番を除いて計算した時の各脚のフィードバック力を  $\Delta F_{nj}$  とすると求める力は、

$$\Delta F_j = \frac{F_{ffb} \Delta F_{nj} + F_{ffn} \Delta F_{bj}}{F_{ffb} + F_{ffn}} \quad (5-14)$$

となる。前項で説明したようにフィードフォワード値  $F_{ffb}$  は最初がゼロ、 $F_{ffn}$  は最後がゼロで共に連続的に変化するので、上式のようにすることで、3脚支持期とのつな

がりをスムーズにできる。

#### 5.3.4 2脚支持の場合

この場合は、2つの支持脚を結ぶ直線（支持脚線とする）回りのモーメントは発生できないので、(5-6)(5-7)式によって求められる  $x, y$  軸回りのモーメントのうち、支持脚線に垂直な成分 ( $M_t$  とする) のみを発生させる。当然、支持脚線回りの傾斜については、修正できない。しかし、これは後の3、4脚支持の期間で修正できる。また、3、4脚支持期間の無いデューティ比が0.5の歩容であっても、次のウェーブの支持脚線の方法は異なるので、その間に前ウェーブで生じた傾斜を修正できると考えられる。具体的な算出方法は、 $a$ 番と $b$ 番の脚が支持脚とし、Fig.5-3のように  $\psi, r_a, r_b$  を定めると、

$$\cos \psi = \frac{x_a - x_b}{\sqrt{(x_a - y_b)^2 + (y_a - y_b)^2}} \quad (5-15)$$

$$\sin \psi = \frac{y_a - y_b}{\sqrt{(x_a - y_b)^2 + (y_a - y_b)^2}} \quad (5-16)$$

$$r_a = (x_a - x_G) \cos \psi + (y_a - y_G) \sin \psi \quad (5-17)$$

$$r_b = (x_b - x_G) \cos \psi + (y_b - y_G) \sin \psi \quad (5-18)$$

となり、発生させたいモーメントのうち、支持脚線に垂直な成分は、

$$M_t = \frac{\Delta M_x (y_b - y_a) + \Delta M_y (x_b - x_a)}{\sqrt{(x_a - y_b)^2 + (y_a - y_b)^2}} \quad (5-19)$$

である。またこの時、次の式が成り立つ。

$$r_a \Delta F_a + r_b \Delta F_b = -M_t \quad (5-20)$$

$$\Delta F_a + \Delta F_b = \Delta F_z \quad (5-21)$$

これらを解くと次の様になる。

$$\Delta F_a = \frac{M_t - r_a \Delta F_z}{r_a - r_b} \quad (5-22)$$

$$\Delta F_b = \frac{M_t - r_b \Delta F_z}{r_a - r_b} \quad (5-23)$$

以上がフィードバックによる接地力決定法である。

#### 5.4 フィードフォワード制御とフィードバック制御の融合

各脚の力制御の目標値はフィードフォワードによる値に、フィードバックによる値を加えて使用するが、接地力の下限值  $F_{\min}$  を設定する。すなわち、2つの力を加えた値が  $F_{\min}$  以下になったときは、接地力を  $F_{\min}$  とする。なぜならば脚が吸盤付でない場合は、負の接地力は発生不可能であり、また安定した接地状態を保つためにはある程度の接地圧を必要とするからである。TITAN VI では  $F_{\min} = 1 \text{ kgf}$  としている。この限界に達した場合は、期待したモーメントまたは力を出すことはできないが、歩行機械全体の安定性を考えた上では最善の方法と思われる。

## 第6章 機械モデルの開発

本章では、前章までに論じた制御法を用いて、実際に不整地における動的歩容を実現するための機械モデルについて検討する。開発した機械モデル TITAN VI は、直動型の脚機構と節体幹型の胴体を持ち、階段昇降を可能としている。そして、新たに開発した2段変速駆動機構により、動的歩行時の俊敏な脚運動が可能である。さらに、脚先には新たに開発した光学式力センサを装備し、5章で提案したアクティブサスペンション制御が可能となっている。

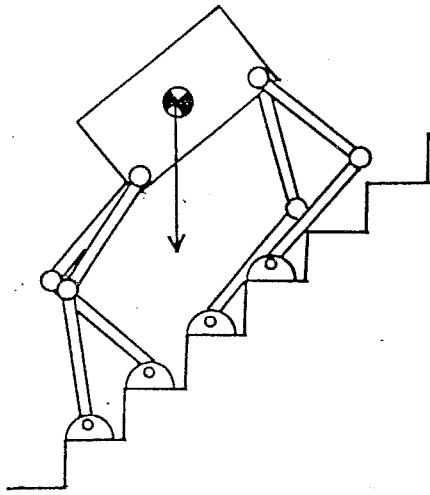
### 6.1 直動型脚機構

#### 6.1.1 直動形脚機構の導入

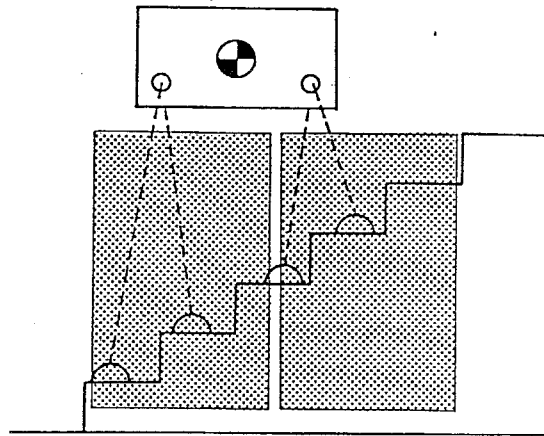
はじめに、不整地の代表的な環境である階段での昇降能力について検討する。階段昇降実験は、広瀬ら<sup>15)</sup>によって実現されたが、階段の傾斜度は20度程度であり、人間が日常的に使用している傾斜度30~40度程度の通常の階段ではなかった。広瀬らはその後に試作した4足歩行機械モデルでもいくつかの階段昇降実験を繰り返した。しかし、対象とする階段の傾斜度はやはり20度程度の緩いものであった。そのため、通常の傾斜度の階段の昇降を行わせることが歩行機械の1つの重要な開発目標として残されていた。

30~40度の傾斜度の階段を4足歩行機械が移動しにくいのは、階段は本来2足歩行を行う人間のために作られているという点に起因する。4足歩行機械で通常の階段を昇降しようとするすると前脚と後脚とは大きな高低差が生ずる。そのため階段歩行中、4脚に自重支持力を平均化するように胴体重心を定め、しかも平坦地と同様に移動効率のよいクロール歩容やトロット歩容を実行しようとするすると、4足歩行機械はFig.6-1 (a) のようになかなか無理な姿勢を取らなければならなくなる。特に、積載物資が多いと胴体部の重心が高くてさらに無理な姿勢が必要となり、脚を階段のステップに接触しないように歩行し続けることはほとんど不可能になってしまうからである。

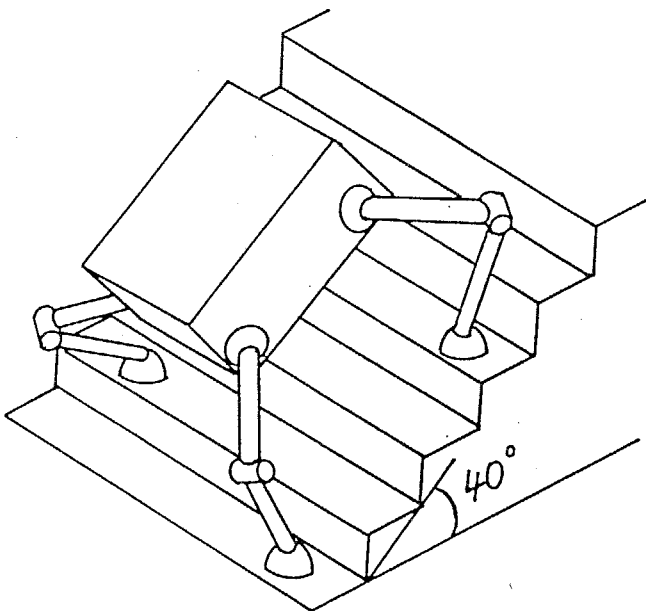
このような問題に対処するには、たとえば、a) Fig.6-1 (b) のように十分長い脚を使用する。b) 足首を有するような多関節の脚を使用する。c) 胴体重心を大きく左右へ移動させる歩容を導入することで静的安定性を保持する。d) 従来からの関節形の脚を使用するのであればFig.6-1 (c) のように足を横に広げる姿勢で階段を上下する。などの手段が考えられる。実際、a) の手法に基づく6足歩行機械<sup>44)</sup> が、またc) の手法に基づく4足歩行機械<sup>4)</sup> が製作され、それぞれ通常の階段での歩行実験にすでに成功している。



(a)



(b)



(c)

Fig.6-1 Posture and leg configurations for a quadruped walking vehicle to adopt stair climbing motion

しかし、実用的に利用する観点からするとa)は全高が高くなりすぎる、b)は特に軽量化すべき足先に余分の自由度を配することになる、c)の方法ではかなり歩行速度が低下してしまい動きの滑らかさが損なわれる、d)の方法では歩行機械の移動に広い幅が必要となり、狭い階段では使用し難いなどの問題が生ずる。そこで、本論文の機械モデル TITAN VI では直動型の脚機構を導入することとした。ただし、単純に直動型の脚機構を導入すると、そのエネルギー効率は著しく低下する。本章ではこの問題を明確化し、その問題に対処する新しい脚機構について検討する。

### 6.1.2 エネルギー効率についての考察

一般に直動脚を設計すると、Fig.6-2 (a) のように股関節に回転の2自由度、脚伸展に1自由度を配した3自由度球座標機構となるであろう。しかしこの球座標機構をそのまま脚に使用すると、歩行のエネルギー効率が大きく低下してしまうという問題が生ずる。たとえ足の質量が無視でき、胴体が水平線上を等速に移動する原理的にはエネルギー損失の無いような歩行運動であっても、実際には大きなエネルギーが損失されてしまうのである。その理由をFig.6-2 (b) のような1ステップの歩行運動によって説明しよう。

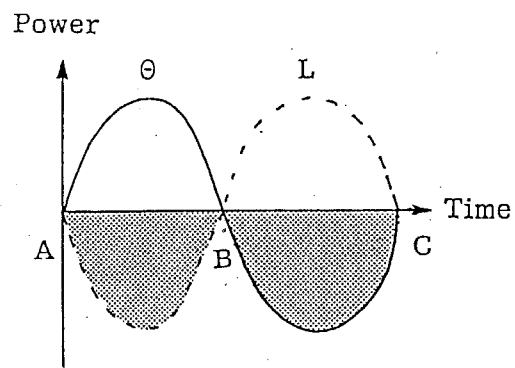
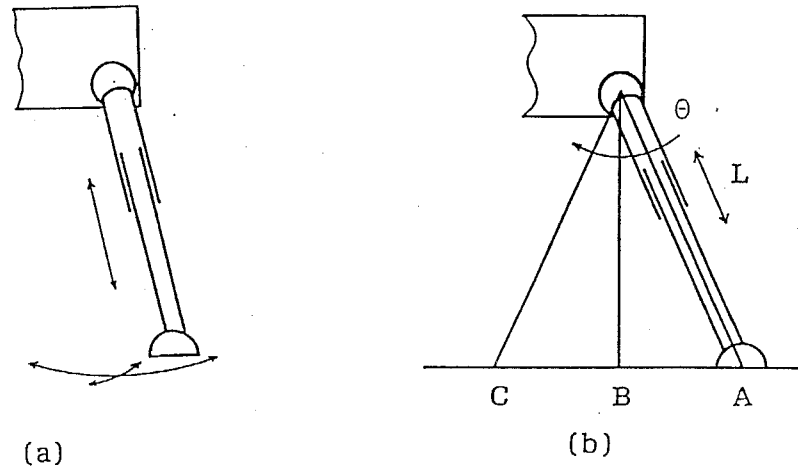
この歩行運動中、支持脚の姿勢A B間とB C間で、回転駆動系のうちの1つの軸 $\theta$ と直動駆動系L軸とで生成すべきパワーはFig.6-2 (c) のように正負に変動する。一方、我々が通常使用しているアクチュエータは負のパワーを回収できない。以上のことからFig.6-2 (c) の破線部のエネルギーは熱になって消費される。これが見過ごされやすいエネルギー損失の原因である。

このようなエネルギー損失をなくすことは、重力方向とそれに垂直な方向の駆動軸を分離する機構を導入することで実現できる。脚運動にこのような特有のエネルギー損失が存在することの指摘と、それに対処するためのGDA(Gravitationally Decoupled Actuation)と呼ぶ上述のような脚機構の構成法は広瀬らがすでに提案した<sup>14)</sup>。同様の考え方を利用した脚機構は、その後、他の歩行機械にも使用されている<sup>44,74)</sup>。そのためTITAN VIでも、このGDAの考え方に基づいて直動型脚機構を設計することにする。

### 6.1.3 GDAに基づく直動脚機構の提案

GDAに基づいて設計した直動型脚機構をFig.6-3 に示す。この機構は、ボールネジにより駆動されるスライダークランク機構であるEvans機構<sup>36)</sup>と、それによって駆動されるテレスコープ状の脚部(TP機構)、そして足先の姿勢を調整するEP機構の3つの部





(c)

Fig.6-2 Leg configuration with prismatic joint and its power consumption during unit stroke motion

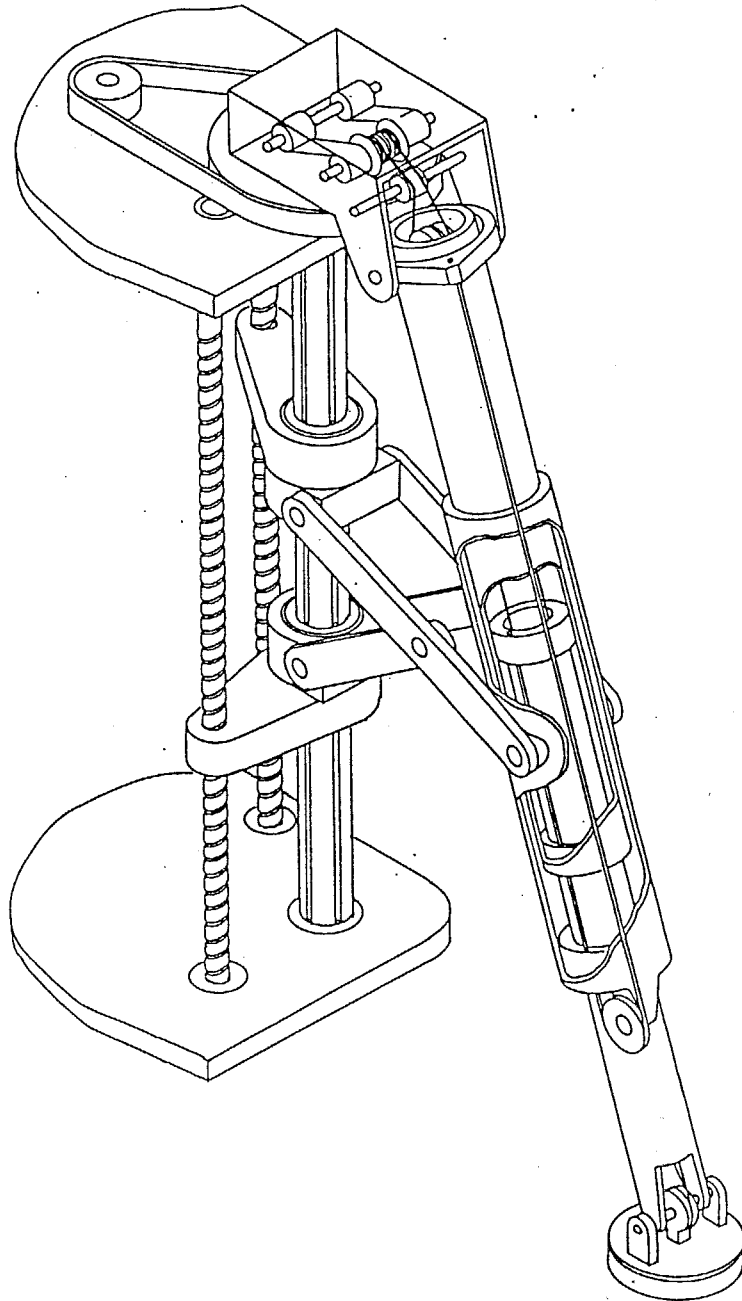


Fig.6-3 Overall view of the leg mechanism of TITAN VI

分から構成される。

Evans機構はFig.6-4 (a) に示すように、リンクADの midpoint C にリンクADの半分の長さのリンクBCが回転自在に連結されたものである。Evans機構の端部A、Bは中心軸ボールスプラインRに摺動自在に支持されている。そしてこれらの端部A、Bはボールネジ $S_r$ 、 $S_z$ で上下に駆動できるようになっている。このような構成であるため、たとえば端部A、Bを同時に上下するとEvans機構の端部Dはz軸方向にのみ移動する。端部Bを固定して端部Aのみを上下すると端部Dは水平方向（r方向）に動く。そして、中心軸ボールスプラインRを回転すると、端部Dは $\theta$ 方向の回転運動を行う。このようにして端点Dは円筒座標運動を行うことになる。Evans機構はかつてマニピュレータにも使用されたことのある機構である<sup>36)</sup>。

Evans機構を足先の動きとして利用するには、たとえばFig.6-4 (b) のように垂直足首を使用する方法も考えられる。しかしこのままでは可動範囲が狭い。そこで、端点Dの動きを拡大して利用することにする。このような運動拡大機構としては、一般にはFig.6-4 (c) のようなパンタグラフ機構が使用される。ここで回転軸Eは中心軸ボールスプラインRに連結されている。このようなパンタグラフ機構と同様の効果を直動機構で生成するため、本論文では新たに動滑車を利用した脚機構を提案する。これを以降TP機構 (Telescopic Pantograph mechanism) と呼ぶことにする。

TP機構の原理をFig.6-5 (a) に示す。TP機構はEvans機構の端部Dに直接連結される外層部（シリンダa）、軸Fに連結される中層部（シリンダb）、足先となる内層部（シリンダc）の3層から構成されている。シリンダaには動滑車 $P_m$ が取り付けられ、シリンダcの上端部とリンクLに間に張られたワイヤーWが図のように張られている。なお、支持軸Eの回りに回転自在に取り付けられたリンクLは、2本のワイヤーWの張力を常時均等化するためのものである。

シリンダcの足先関節FはFDとDEの距離が同一になる位置に設定されている。このように構成されているため、E点を固定しD点を動かすとF点はその2倍の速度で動くことになる。そのため、TP機構の運動特性はFig.6-4 (c) のパンタグラフ比2のパンタグラフ機構と等価になる。そして、足先FはD点の3次元運動を2倍に拡大した円筒座標運動を行うことになる。

なお脚の垂直方向の運動のうち、伸展方向には歩行機械の重量を支持する大きな力が必要である。しかし収縮方向の運動は脚を浮かすため脚自重を引き上げられる程度の力を発生すれば十分である。Fig.6-5 (a) に示すように、本機構では足先の上方への引き上

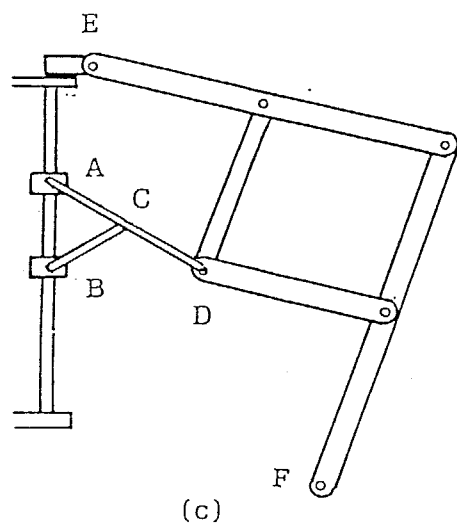
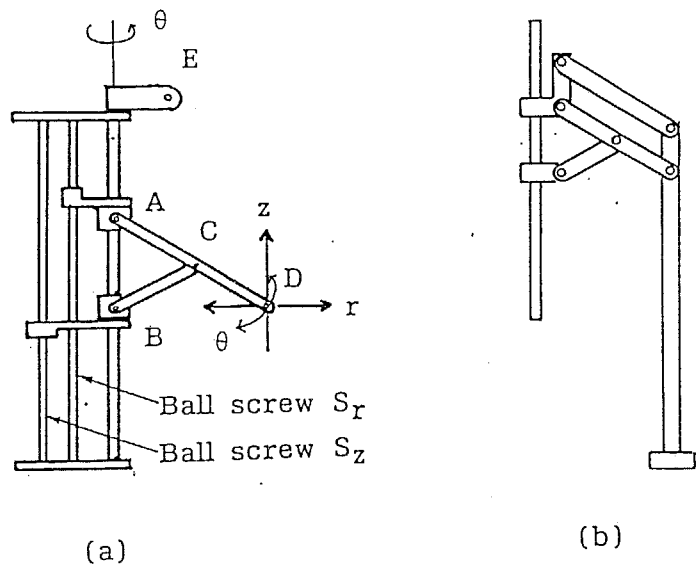


Fig.6-4 Evans mechanism and its applications to leg systems

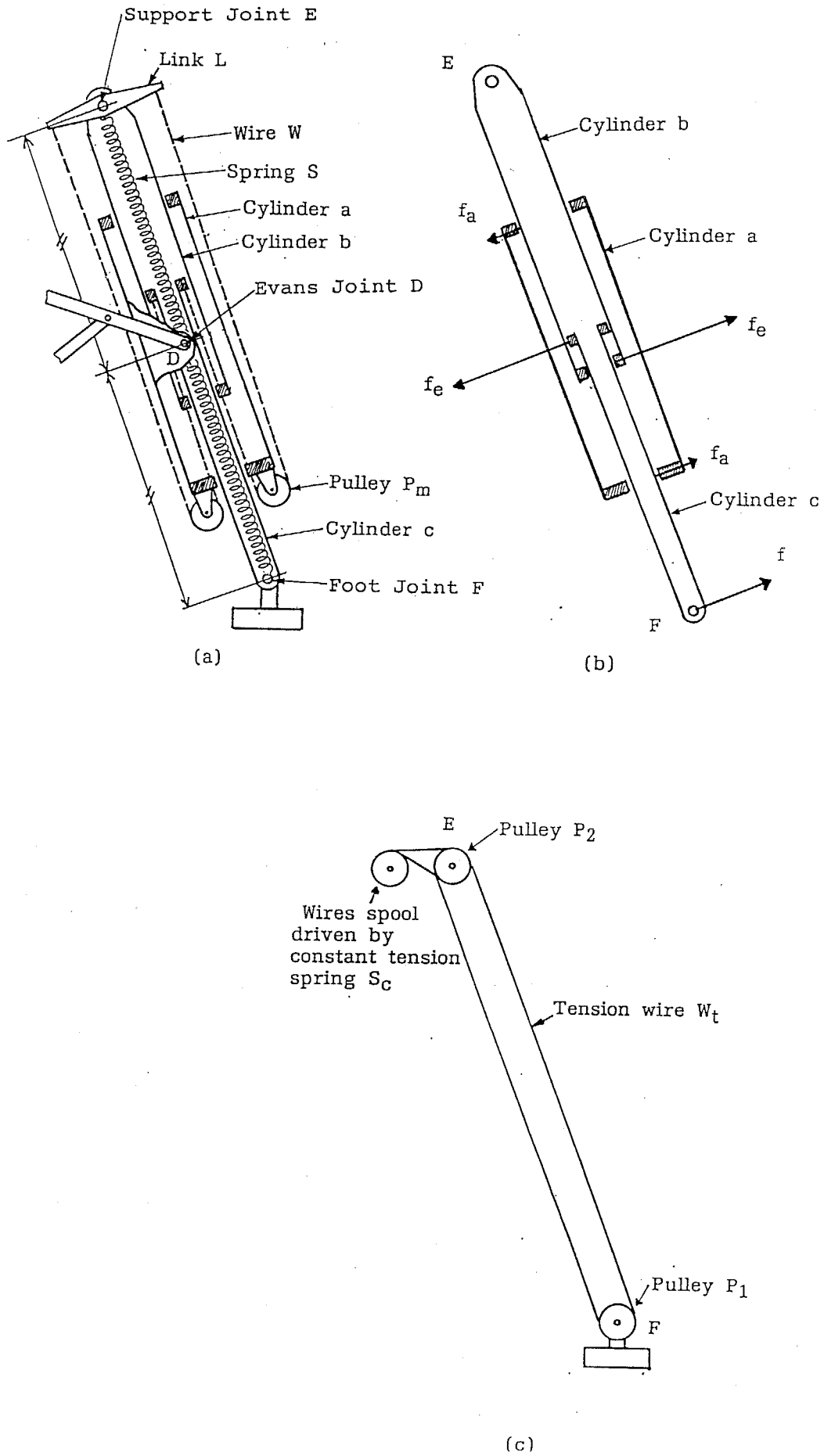


Fig.6-5 Leg mechanisms of TITAN VI (a) A linear expansion mechanism with wires (b) A triplet cylinder mechanism (c) A elastic parallelogram mechanism

げ力はスプリングSで発生するようにしている。これは上述のような特性を利用し機構を単純化するためである。脚の収縮運動をスプリングで行うとバックラッシュを防止できるようになるのも、スプリングSを用いることの別の理由である。

この脚機構において、シリンダaはEvans機構の端部Dと動滑車Pmとを連結する機能だけでなく、テレスコ脚の曲げ方向強度を強化する機能も有している。Fig.6-5 (b)のように、足が伸展した状態を想定しよう。シリンダaがない機構では接地力を発生するためのモーメント力でシリンダb, cの端部eに大きな応力 $f_e$ が発生する。そのため、負荷荷重が低下し摺動摩擦が増大してしまう。シリンダaがある場合には、その両端部でシリンダb, cが支持され、小さい応力 $f_a$ でモーメントが支持でき上述のような問題が解決できるようになる。またこの脚機構では、 $\theta$ 軸回りの回転力は中心軸ボールスプラインから上部支持軸EとEvans機構を通して伝達される。そのためこの脚機構は脚全体としての剛性が高い特性も有する。

#### 6.1.4 直動脚の剛性、摩擦力特性

直動脚機構の設計に当っては特に中心軸ボールスプラインの強度と剛性が重要である。なぜなら、脚姿勢によっては中心軸ボールスプラインに大きな曲げ荷重が加わる構造となっているためである。そこでスプラインの負荷荷重特性と同時にたわみ量も考慮した設計を行なった。TITAN VIに使用した全長800mmのボールスプラインにおいては足先荷重100kgで中心部の最大たわみ量が0.7mm程度となるように直径40mmの製品を使用した。

ついで、本直動脚は摺動部を有するので摺動抵抗について検討した。脚先端にシリンダに垂直に12.3kgfの負荷を加える脚単体での試験の結果、伸縮方向の摩擦力は最も縮んだ状態で4.2kgf、最も伸びた状態で9.3kgfであった。これは摩擦係数を0.2とした解析結果（同条件でそれぞれ3.8kgfおよび8.9kgf）とほぼ一致することがわかった。よって以降の駆動系の設計にはこれらのデータを使用することとした。

#### 6.1.5 足先平行機構

足先を常時水平に保つため、Fig.6-5 (c)に示すようなEP機構(Elastic Parallelogram Mechanism)も新たに導入した。図においてワイヤー $W_t$ の端部はプーリP1に固定されている。プーリP1は足先に固定され、軸F回りに回転自在に支持されている。プーリP1に固定された1対のワイヤー $W_t$ は、軸Eに回転自在に設置されプーリP1と同一の径の

プーリP2を介して、定張力スプリング $S_c$ で一緒に牽引される。これによりワイヤー $W_t$ は、足の長さが増えたとき両者とも同じ割合で伸び縮みする。その結果、プーリP1、P2の方向は常に一定に保たれ、足先は胴体と平行に保持される。この平行姿勢保持モーメントはワイヤー張力とプーリP1の半径の積である。この範囲を越えるモーメントが足先に働くと、足先は弾性的に変形することになる。なお、ここで使用されているスプリング $S_c$ は、Fig.6-5 (a)の脚を上方に引き上げるためのスプリングSの機能も兼用している。

#### 6.1.6 直動型脚機構の特徴

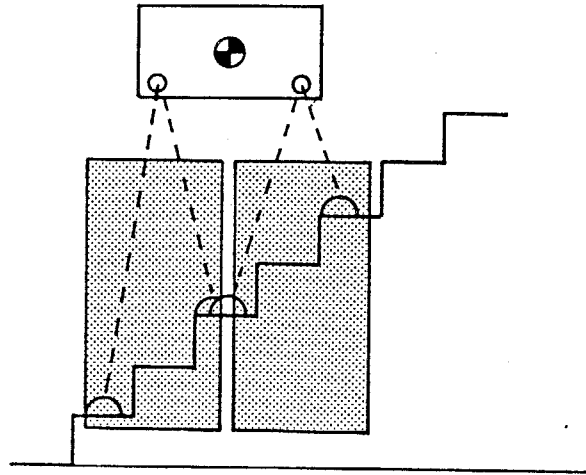
提案したEvans機構、TP機構、そしてEP機構から構成される脚機構の特徴を整理すると以下のようになる。

- 1) 脚が屈曲しないので階段との機械的な干渉が小さい。また、静止して作業するときには作業の邪魔にならない支持脚になる。
- 2) 球座標的な運動を行う脚機構であるが、足先は実際には円筒座標的に駆動できる。そのため、コンパクトに構成でき、同時にGDAの特性が発揮できる。
- 3) 脚を振り回すときの慣性モーメントが、膝が外に張り出した屈曲型の脚機構に比較するとはるかに小さく動的歩行に適する。
- 4) 機構的に剛性が高い。また摺動機構を含むが、3層シリンダ構造の効果やドライベアリングを使用しシリンダ表面処理などで低摩擦化できる。

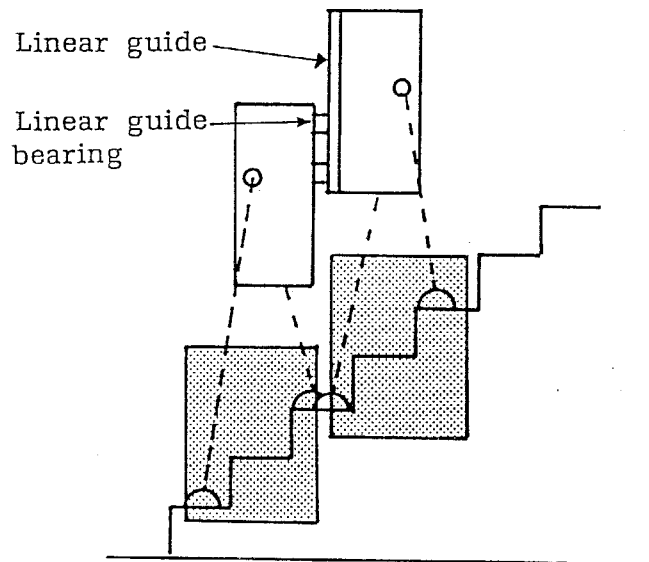
## 6.2 節体幹型胴体機構

急な階段で、胴体を水平に保持しながら昇降するためには、Fig.6-6 (a)のように長い脚を必要とする。このような非現実的な設計を廃し、現実的な脚長で歩行を実現するために、TITAN VIにはFig.6-6 (b)の様に胴体中央部を上下にスライドできる節体幹機構を導入した。これにより40度までの傾斜の階段でクロール歩容が可能となった。ただし、リニアベアリングが取り得るストロークの制約からスライドできる方向は一方向に固定した機構となっている。

広瀬らはこれまで、移動ロボットの基本形態は1)車、クローラなどの回転運動を行う純人工的な移動装置、2)脚、そして3)へびを究極のモデルとする節体幹形態の3つであること。今後の移動ロボットはこれらのいずれかあるいはそれらのハイブリッドな形態で実現されることを論じた<sup>17)</sup>。本形態はこの考え方でいうと、脚と節体幹のハイブリッ



(a)



(b)

Fig.6-6 A stair climbing posture (a) with normal body  
(b) with articulated body



ド形態であるといえる。

### 6.3 2段変速駆動機構

すでに、GDAの考え方を導入し脚のエネルギー効率の向上を試みたが、本論文ではさらに別の側面から、脚駆動系のエネルギー効率の向上と軽量化を試みることにする。

歩行機械の歩行運動中、脚駆動系の鉛直軸は2つのまったく異なる動作モードで駆動される。1つは自重支持を主体とする支持脚モード、もう1つは脚の復帰動作を行う遊脚モードである。遊脚モードでは大きな力を発生する必要はないが高速性を要求される。支持脚モードでは低速でよいが大きな力が必要である。このうち、支持相モードでの自重支持機能は不可欠である。そのため従来の歩行機械の鉛直方向駆動用アクチュエータには、大きな減速比の減速機を使用せざるを得なかった。しかし、こうすると遊脚モードでは脚は高速に運動できず、結果的に歩行機械の移動速度が低く抑えられるという大きな問題を生じていた。

この問題を解決するには、理想的には無段階変速式の減速機を用いて鉛直方向を駆動すればよい。しかし、この変速装置は小型軽量でしかも負荷状態で頻繁に切り替えできものでなければならず現状ではこのような装置は存在しない。そこで、TITAN VIには支持脚モード用と遊脚モード用のアクチュエータを2台からなる新しい駆動系を導入した<sup>30)</sup>。

これは、Fig.6-7のようにz軸駆動用ボールネジに遊脚用と、支持脚用のモータの2つを配したものである。遊脚用モータは低減速比の減速機を介して常時ボールネジに連結されている。支持脚用のモータは高減速比の減速機とクラッチを介してボールネジに連結されている。この支持脚用モータは、支持脚モードの時にのみクラッチが接続されるようになっている。遊脚時には遊脚用モータのみで脚は高速に駆動される。支持脚時には支持脚用モータが強力な接地力を生成する。この時には遊脚用モータも連結されているが、これは運動をさまたげないように駆動されるだけで接地力はほとんど発生させない。試作した歩行機械TITAN VIでは遊脚相と支持脚相の減速比は2:0と28.85としている。クラッチには電磁クラッチを使用している。

2段変速駆動系の有効性を検討するため、通常の駆動系との比較を行なった。その結果をTable 6-1に示す。これはTITAN VIが50mm/sの上昇速度で階段を昇っているという想定での比較であり、支持脚相と遊脚相における消費パワー、効率等を示している。

Table 6-1で対象としたアクチュエータはTITAN VIで使用した120W 2台の2段変速駆動

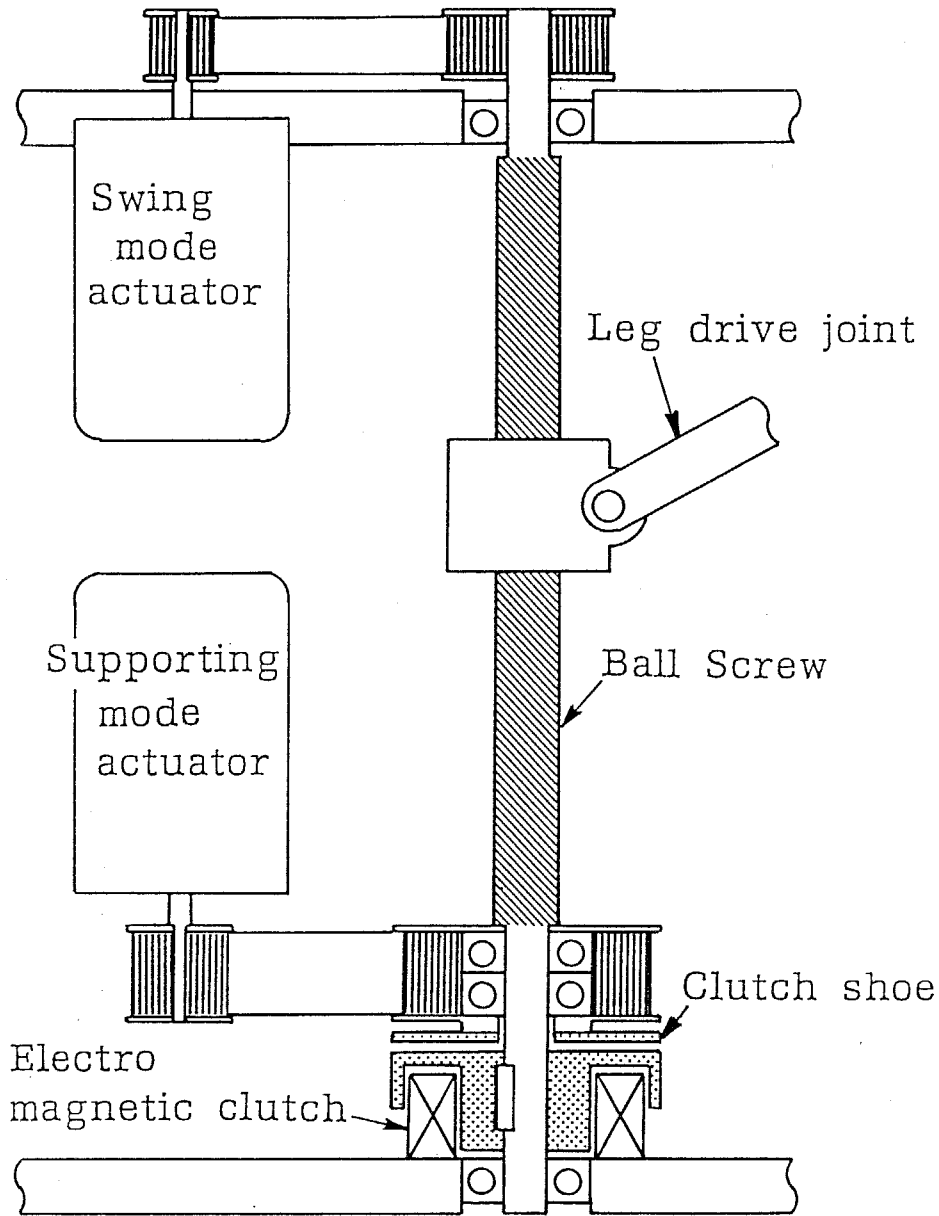


Fig.6-7 Dual mode actuation system

Table 6-1 Comparison of vertical axis actuation

motor	Swing phase					Support phase				
	ball screw		motor			ball screw		motor		
	speed [mm/s]	force [N]	reduction ratio	input power [W]	efficiency [%]	speed [mm/s]	force [N]	reduction ratio	input power [W]	efficiency [%]
120W <sup>#1</sup> × 2	400	180	2.0	102	71	25	2940	28.85	102	72
200W <sup>#2</sup>			2.0	108	67			2.0	851	8.6
500W <sup>#3</sup>			1.67	111	65			1.67	207	35

#1 Shinano Electric 5DA12 ( output 120W , weight 0.93kg )

#2 Shinano Electric 7DA20 ( output 200W , weight 1.9 kg )

#3 Shinano Electric 8DA50 ( output 500W , weight 4.3 kg )

系と、出力が2倍、4倍程度の単一アクチュエータによる減速比固定の駆動系である。Table 6-1 から通常の駆動系では出力が2倍程度(200W)のモータでは支持脚時に定格を大幅に上回るトルクが必要となり、効率も著しく悪化すること。また、より大きな出力4倍のモータを使用すれば作動条件は定格に近くなり、効率も向上するが、重量が大幅に増加してしまうことがわかった。このことから、2段変速駆動系はクラッチ重量(460g)を考慮したとしても結果として大幅な駆動系の軽量化と高効率化による動力源の軽量化を可能にしていることがわかる。

## 6.4 光学式力センサの機構

### 6.4.1 光学式力センサの原理

光学式の各種センサについては著者らがいくつかの研究を行なっている<sup>31,32,34,80,81</sup>。ここでは光学式センサの原理について簡単に説明する。光学式力センサの基本は微小変位の測定である。これはFig.6-8に示すようなフォトセンサと光源の組み合わせで行なわれる。これらを以降「光学ユニット」と呼ぶ。(a)はフォトセンサと光源が対向して固定され、その間の遮光板が変位するものである。遮光板がフォトセンサの直径 $d$ だけ変位すると出力はゼロから最大出力まで変化する。直径 $d$ は微小にできるため微小変位を感度良く計測できる。(b)はフォトセンサと光源との相対位置が変化するものである。この場合もフォトセンサと光源を十分小さくし、しかも接近させれば微小変位を感度良く計測できる。(c)は鏡の移動による反射光量の変化を測るもの、(d)は2分割フォトセンサと光源が対向して相互に変位するように構成されたものである。この場合にはフォトセンサ相互の受光量の差の計測により微小変位が感度よく計測できる。(d)は受光量の差に基づくため、温度変化等による光量や感度の変化の影響が少ない。さらに、(e)は4分割型フォトセンサを用いて2方向の変位を測るもの、(f)はレンズやピンホール等によって拡散型光源を作り、距離変化による光量変化を測るもの、(g)は(e)と(f)の原理を組合せて3方向の変位を測るものである。

光学ユニットとして使用する光源は通常LED、受光部にはフォトトランジスタを用いる。回路構成の最も基本的なものは、受光素子が1つだけの(a)(b)(c)(f)ではFig.6-9のような極めて単純なものである。この場合、温度による素子の特性の変化が現われるので、精度を上げたい場合には(d)(e)(g)の構成にして受光部には分割型フォトダイオードを用いる。Fig.6-10は2分割型フォトダイオードを用いた場合に温度特性をよくするための補償を行う回路になっている。2つのフォトダイオードの出力の和が一定となるよ

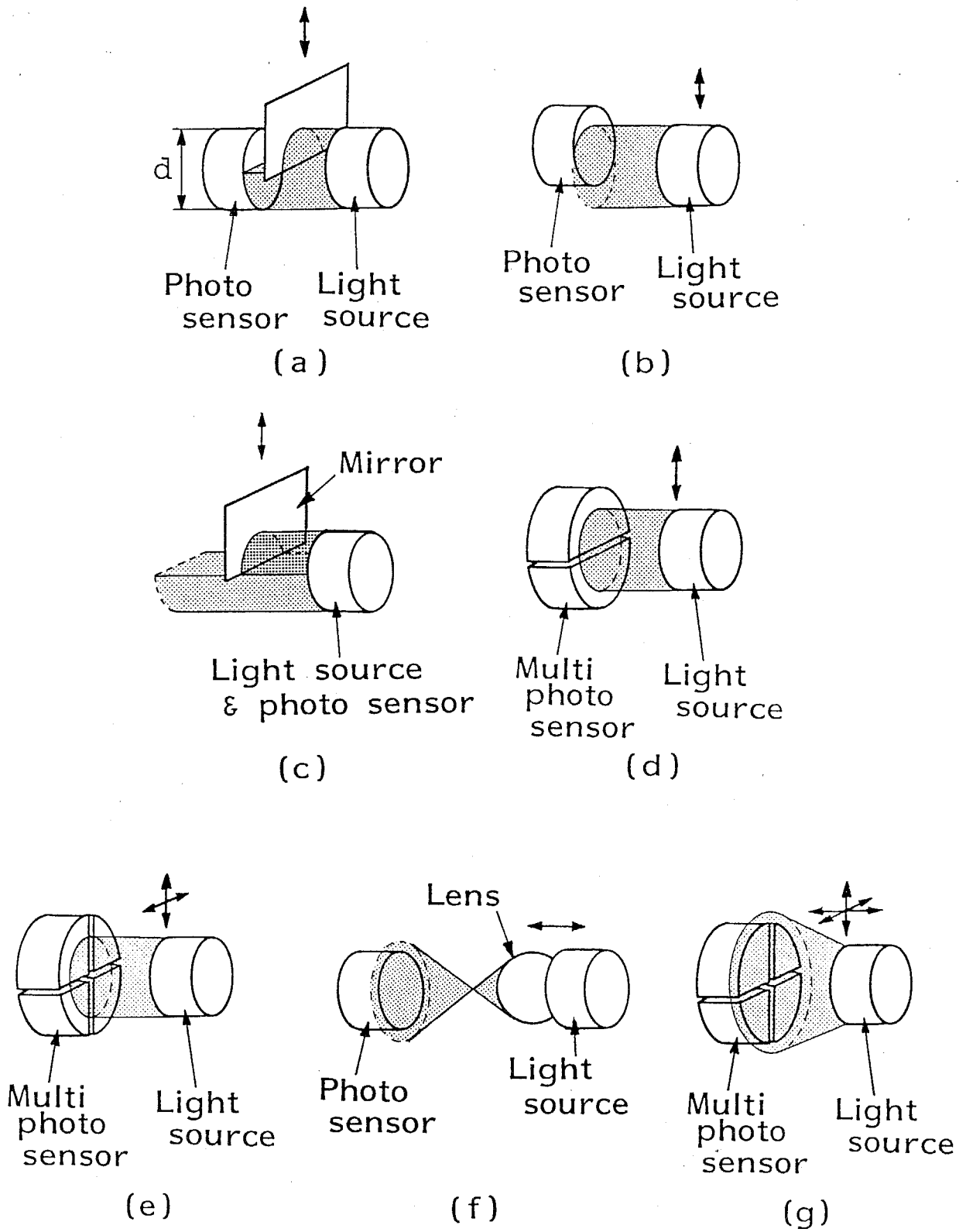


Fig.6-8 Several types of optical sensor unit

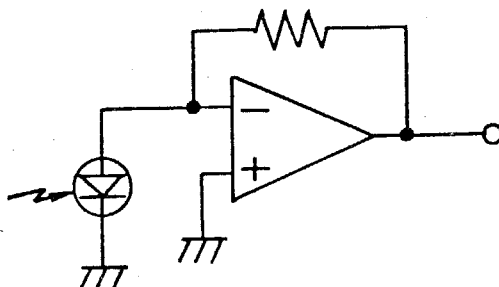
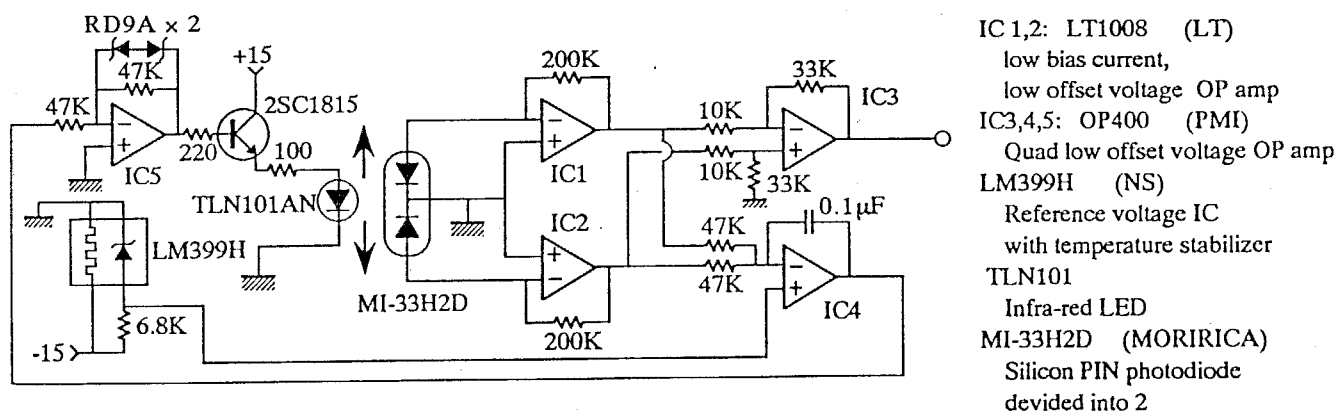


Fig.6-9 An example of circuit for single type optical sensor



- IC 1,2: LT1008 (LT)  
low bias current,  
low offset voltage OP amp
- IC3,4,5: OP400 (PMI)  
Quad low offset voltage OP amp
- LM399H (NS)  
Reference voltage IC  
with temperature stabilizer
- TLN101  
Infra-red LED
- MI-33H2D (MORIRICA)  
Silicon PIN photodiode  
divided into 2

Fig.6-10 Low drift circuit for split type optical sensor unit

うにLEDの電流を調整した上で、出力の差をとって変位を出している。これによって10℃から70℃までの広い範囲にわたって0.4%以内の変動幅に収まる高性能なセンサとすることができる<sup>58)</sup>。

このような変位計測計を用いた単軸力センサの例として、Fig.6-8 (d)を用いたものをFig.6-11に示す。フレームはアルミ合金の一体加工で作られている。実験の結果、Fig.6-12のように非常に線形性がよくヒステリシスのない良好な結果が得られた。

また同様の変位計測を発光部、受光部とも光ファイバを用いても実現でき、小型化が可能である。また、光ファイバを用いて光源と受光素子をセンサ本体から離しておくと先端に半導体や電気回路を含まない耐電磁雑音性、耐放射線性のあるセンサが構成できる。

#### 6.4.2 非線形力センサの開発

歩行機械の足先では0.1N程度の僅かな接触力から1000N程度の大きな力まで計測できるダイナミックレンジの広い力センサが望ましい。それには入力される力信号Fに対しその相対誤差 $\Delta F / F$ が全計測範囲で等しくなるようにするとよい。出力信号をSとし、その誤差 $\Delta S$ は一定とすると

$$Const = \frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta S}{F} \cdot \frac{dF}{dS} \quad (6-1)$$

$$S = k \log F \quad (k = const) \quad (6-2)$$

となり、入力に対し出力は対数特性となる。生体の感覚系もWeber-Fechnerの法則に示されているように対数特性をもち、その結果ダイナミックレンジが広がっていると言われている。

Fig.6-13はこのような特性を実現する力センサである。ここでは対数に近い特性を2つの弾性材 $\alpha$   $\beta$ を微小な間隔をへだてて重ねることにより得ている。計測結果をFig.6-14に示す。全くヒステリシスのない疑似対数特性が得られている。このような対数的特性を示す弾性体を使用すれば過大入力に対する保護ができ、微小力も精度良く計測できる。たとえば、Fig.6-14の計測において微小力の計測範囲ではその誤差は0.3 [N]であった。これはこの全計測範囲の0.03%の精度に相当している。つまりダイナミックレンジが広がっていることがわかる。

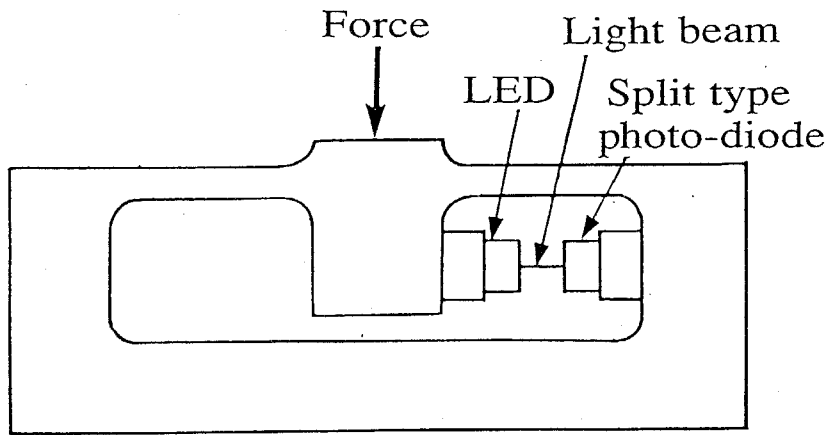


Fig.6-11 Force sensor using a split type optical sensor

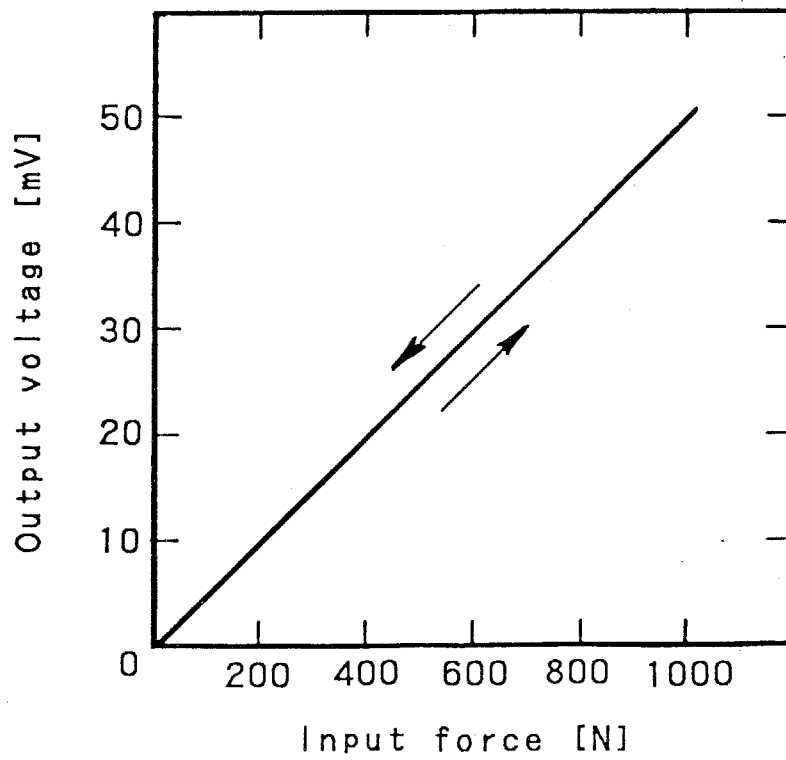


Fig.6-12 Experimental result of the force sensor of fig.6-11

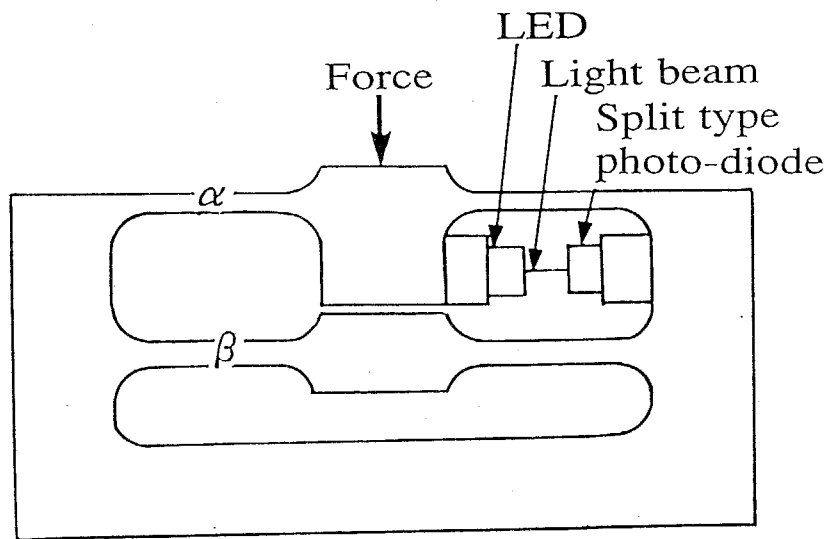


Fig.6-13 Non-linear type force sensor

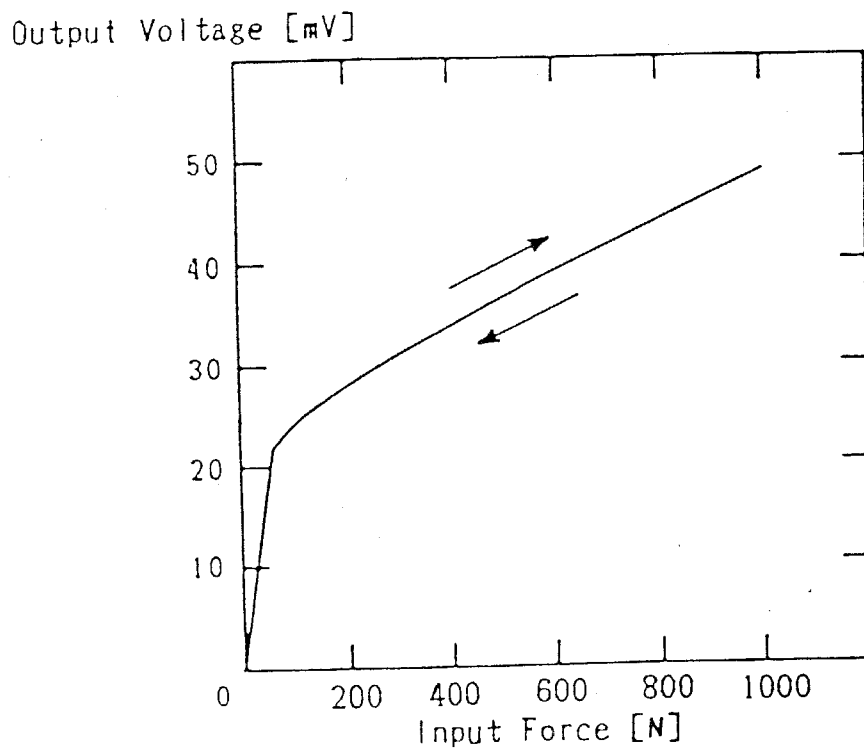


Fig.6-14 Experimental result of the non-linear force sensor of fig.6-13



### 6.4.3 歩行機械用力センサの開発

本論文で開発する4足歩行機械モデルには、Fig.6-15のような力センサを備えた新しい脚先機構を導入した。外観をPhoto 6-1に示す。この脚先の力センサは、弾性体として2つのコイルバネ、微小変位計測部にはフォトダイオードとLEDを使用している。AとBの2種類のバネ定数の異なるバネを使用することにより、力の小さい場合はバネAのみが変形し、力が大きくなるとバネBが変形するようになる。このため、小さな接触力から大きな荷重まで測定できるダイナミックレンジの広いセンサを構成することができる。

また、通常、力センサは剛性の高いほうが望ましいが、ここでは故意に変形量を大きくとり、サスペンションの役割も兼ねている。さらに、足底に柔らかいゴムが付いているため、着地時に力制御では応答しきれない高周波成分の衝撃を和らげることができる。着地時の衝撃を小さくするという事は、歩行ロボットの耐久性の向上、静かな歩行の実現などのために重要なことである。

この力センサの特性をFig.6-16に示す。これを折れ線で近似する関数を作り、出力をAD変換した数値から荷重を求める。これを脚に実装した状態で試験したところ、1kgf以下の接触を確実に感知することができた。また、100kgfまでの大きな力の計測では最大2kgfの誤差が観測されたが、この程度の誤差は脚の力制御を行う上では無視できる。また、計測データの再現性は良好である。

## 6.5 機械モデルTITAN VIの仕様

以上のような考察を基に、Fig.6-17に示す歩行機械を製作した<sup>35)</sup>。脚全長は860～1289mm、胴体のサイズは700L\*550W\*1060H、全重量は195kgである。胴体部スライダのストロークは400mmである。外観をPhoto 6-2に示す。各駆動軸の仕様はTable 6-2に示す通りである。これは駆動部の摺動摩擦などの機械効率も考慮したものである。試験装置であるので制御コンピュータ(PC9801RA)およびパワーアンプは本体外に設置し、有線結合した。

運動学的な機能を確認するため、2つのボールネジ(Fig.6-4(a)のSr,Sz)を駆動して脚先端(Fig.6-5(a)のJoint F)をr方向、z方向に運動させる実験を行なった。この時の脚先端の軌跡をFig.6-18に示す。これは脚先端につけたLEDの光を2台のテレビカメラでとらえて3次元位置を計測する装置(SELSPOT社製RC201)によるデータである。

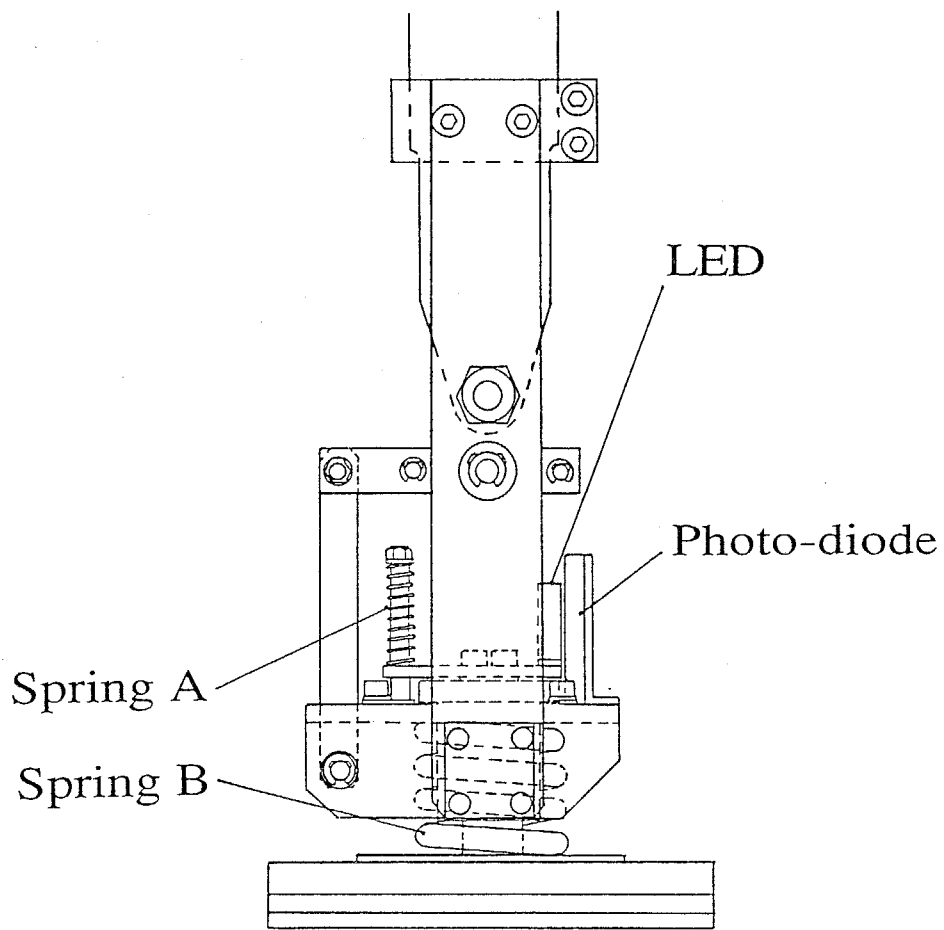


Fig.6-15 Foot mechanism with force sensor

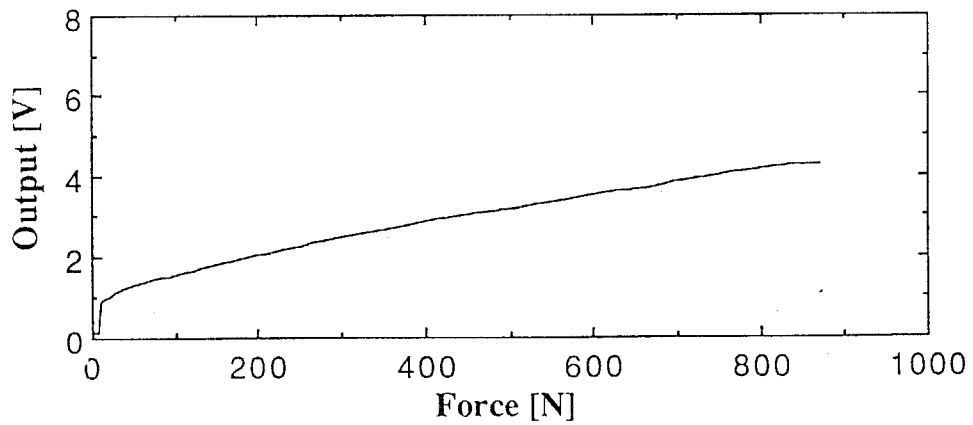


Fig.6-16 Characteristics of foot force sensor

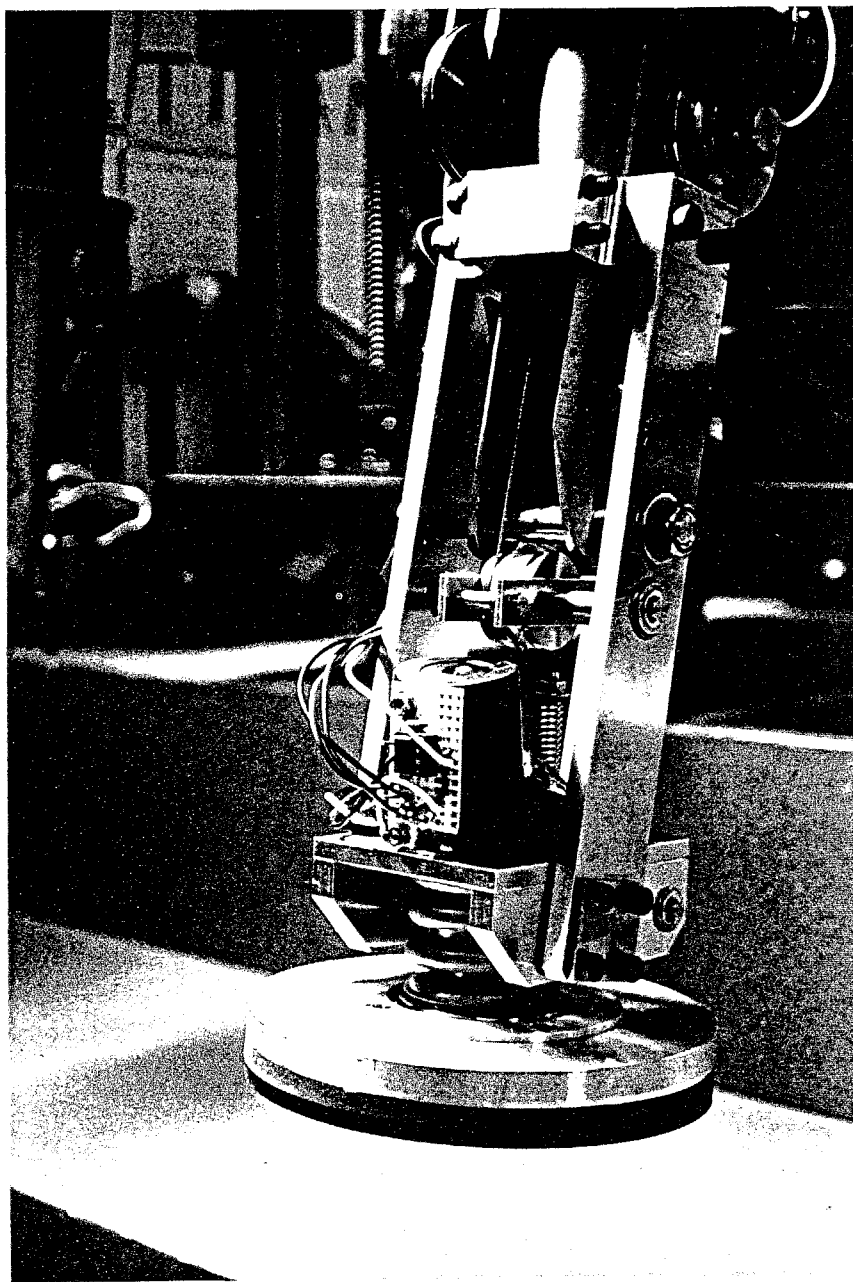


Photo 6-1 Foot force sensor mechanism of TITAN VI

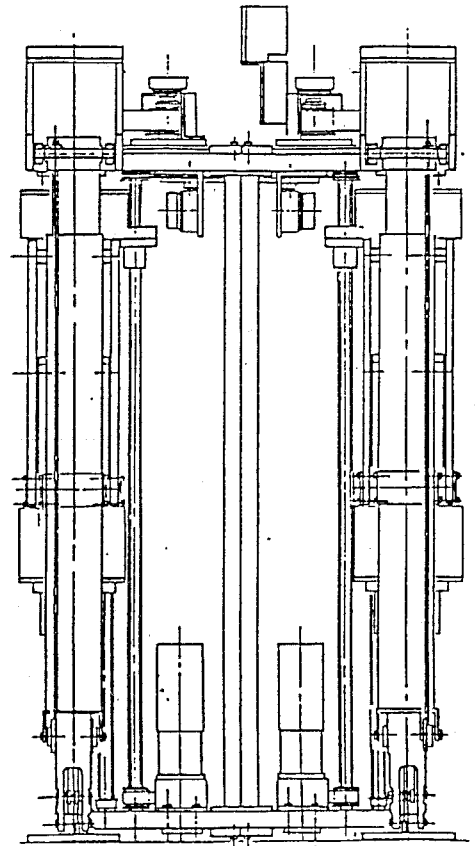
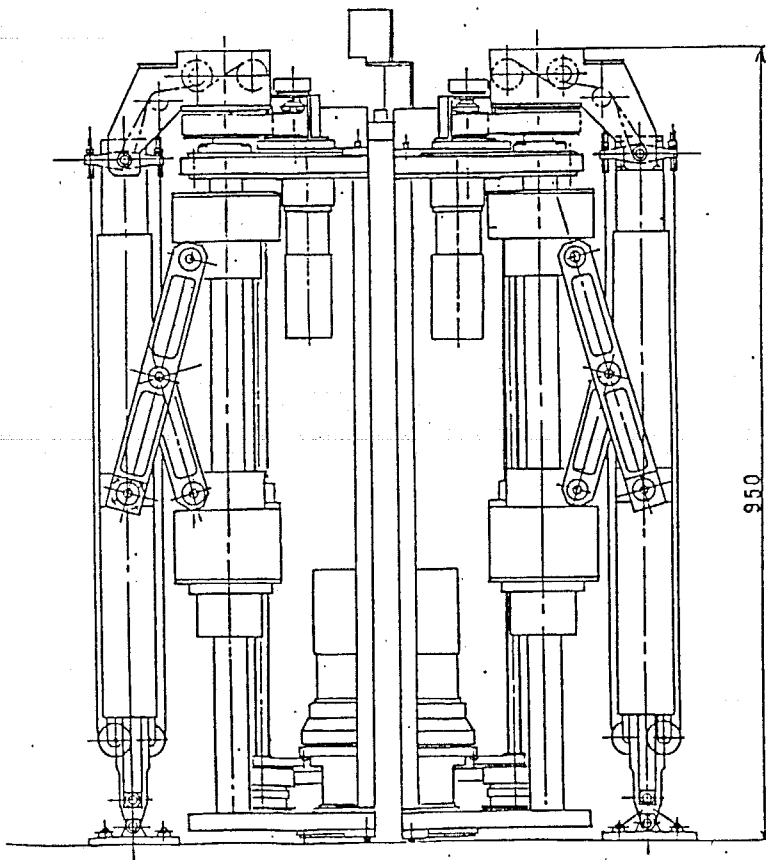
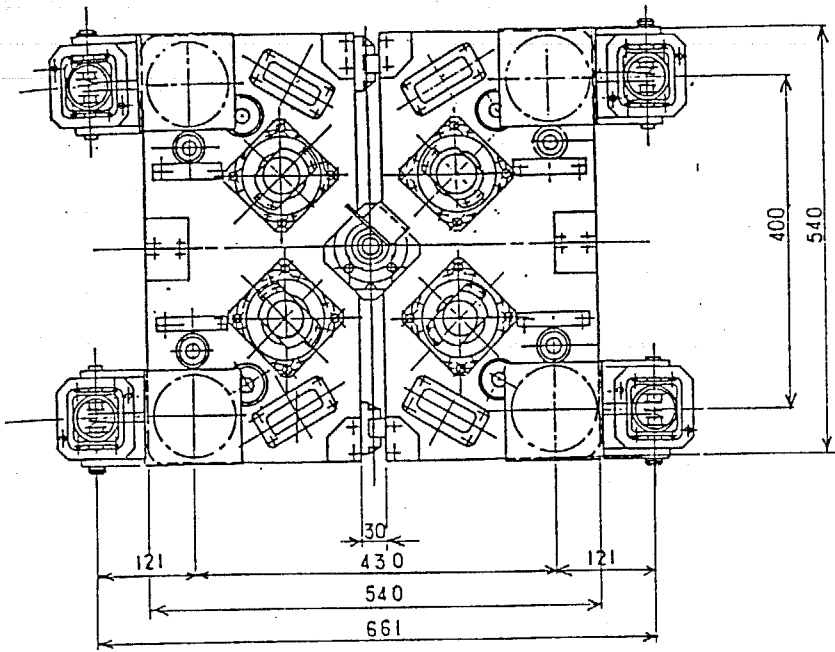


Fig.6-17 Overall figures of TITAN VI

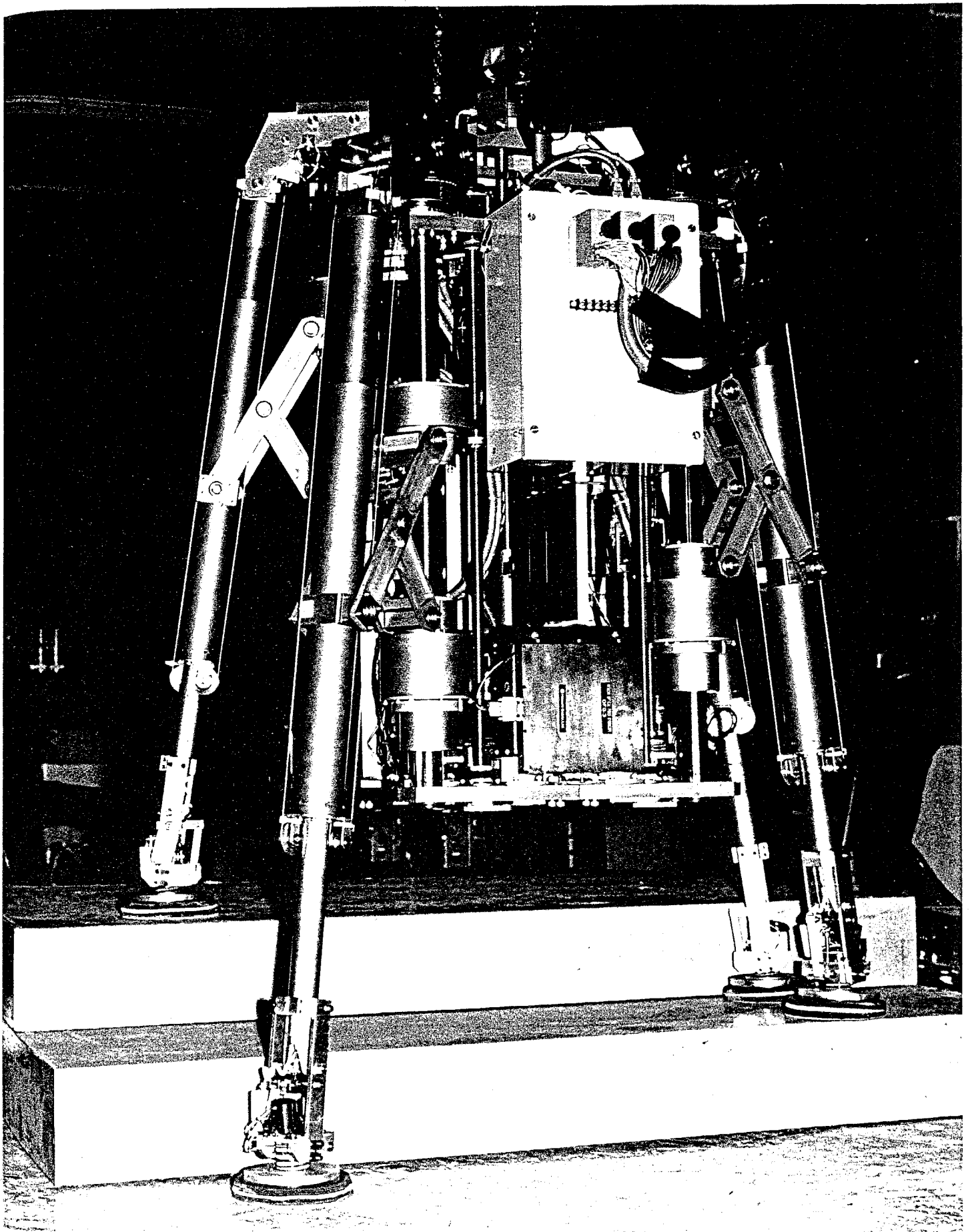


Photo 6-2 Overall view of TITAN VI

Table 6-2 Leg specification of TITAN VI

axis items	r	$\theta$	z	
			high speed	low speed
stroke	400 mm	130°	400 mm	
rated speed at ball screw	400mm/sec	3.1 rad/sec	400mm/sec	30mm/sec
rated force at ball screw	140 N	23 N·m	140 N	2000 N
servo motor	120 W (DC)			
reduction ratio	2	100	2	28.85

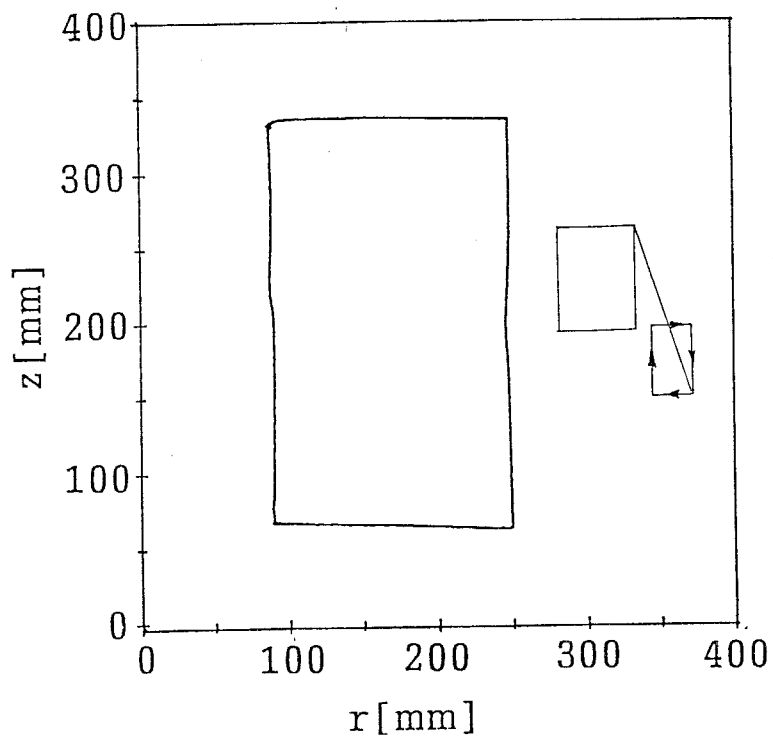


Fig.6-18 A leg trajectory of TITAN VI

ほぼ指令値通りの軌道が生成できることを確認した。

## 6.6 制御系の構成

前章までに論じた制御法を用いて、4足歩行機械の不整地における動的歩行を実現するためには、コンピュータ上でそれぞれの作業を実行しなければならない。しかし、これらは相互に関係し合い、それぞれの作業は先行作業が終了するまで実行できないので、適切な手順を設定して実行しなければならない。しかもこれらの作業を歩行中にリアルタイムで実行するためには、並列処理が必要である。例えば、接地力制御のソフトウェアサーボループを維持したまま、次の1歩のための軌道決定などを行なう必要がある。これは人間が脳で前方の地形を把握し、経路決定、着地点決定を行ない、小脳で脚の振り出し制御や全体の動的バランスをとる制御を行なっているのに対応する。本章では、4足歩行機械の動的歩行に必要な作業を整理し、並列処理制御システムの構成法について検討する。

4足歩行機械の不整地における動的歩行を実現するために必要な作業はTable 6-3のようになる。aの「移動目標決定」は目的地と到達時間を設定する作業である。bの「進行方向決定」は途中の障害物など通路の状況に応じて方向を定め、cの「進行速度決定」は歩行機械の能力と地面の凹凸等を考慮して安全な速度を選択する作業である。dの「デューティ比決定」はできるだけ安定性を確保しながら、目的の速度を得るものであり、eの「接地点決定」は進行方向と速度、デューティ比に応じて次の着地点を決定するものである。fの「胴体軌道決定」とは動的効果を考慮して2脚支持状態でも安定で、かつ全体が滑らかな軌道を生成する作業である。gの「遊脚軌道決定」は加減速を考慮して決められたストロークを決められた時間で振り出し、障害物回避のための高さをできるだけ長く維持するような軌道を設定する作業である。hの「胴体、脚軌道計算」とは前述の胴体と脚の軌道決定作業で得られた、時間の関数式で表された軌道を実際に計算し、数値にする作業である。iの「フィードフォワード力決定」とは、動的効果を考慮して外乱が無い場合の適切な脚の接地圧を設定する作業である。jの「位置、力制御の切り換え」は、脚の接地状況に応じて各脚ごとに支持脚は力制御、遊脚は位置制御と設定する作業である。kの「フィードバック力決定」とは胴体姿勢等を矯正するのに必要な接地力配分を決定する作業である。lの「力制御実行」とは、脚の力制御のソフトウェアサーボループを構成する作業であり、mの「位置制御実行」とは、脚の位置制御のソフトウェアサーボループを構成する作業である。これらをすべて行なえば目標とす

Table.6-3 Tasks for the control of the dynamic walk of a quadruped

記号	作業名	先行作業
a	移動目標決定	なし
b	進行方向決定	a
c	進行速度決定	a
d	デューティ比決定	c
e	接地点決定	b c d
f	胴体軌道決定	b c d e
g	遊脚軌道決定	d e
h	胴体、脚軌道計算	f g
i	フィードフォワード力決定	e f h
j	位置、力制御切り換え	o h
k	フィードバック力決定	e h o p
l	力制御実行	i j k o
m	位置制御実行	h j q
n	歩行	m l
o	力計測	なし
p	傾斜計測	なし
q	関節角計測	なし



る作業である  $n$  の「歩行」が行なわれる。また、 $o$  の「力計測」は脚先の力センサによって接地力を計測する作業、 $p$  の「傾斜計測」は胴体に装備したジャイロによって胴体の角度と角速度を計測する作業、 $q$  の「関節角計測」は角駆動軸の位置（角度）をポテンシオメータ等で計測する作業である。

Table 6-3 の先行作業リストから矢線図 (arrow diagram) を作ると、Fig.6-19のようになる。そこで、いくつかの作業をまとめて、レベル A から D の制御タスクグループを構成させ、複数のタスクグループを順序に注意しながら並列に処理してゆく制御系を考える。これは、すでに提案した静歩行のための歩容制御システム<sup>20)</sup>をさらに発展させたものである。

本研究の制御システムでは、Fig.6-19のレベル A から D はすべてコンピュータ上のソフトウェアで実現し、1つのCPUによって順番に処理し、複数のタスクが同時に進行しているのと同様の制御を行なう。この並列処理の概略は以下のようになっている。なお、ウェーブについては4章で詳しく述べたが、1歩行周期の半分に相当する。

#### 1) level A

最上位指令系であり、歩行機械が移動すべき方向、速度、移動姿勢などの指令をある程度遠距離まで予測的に生成する制御系である。現在のところ、これらの指令は操縦者により行っているため、このレベルの役割は操縦者とのインターフェイスである。このレベルは脚配置初期化、起立、直進歩行、旋回歩行などの各動作の切り換え時に1回実行される。

#### 2) level B

このレベルは、歩行機械がウェーブ  $W_k$  を実施中に、そのウェーブ終了時の胴体重心の位置、速度、姿勢そして足先位置が既知である状況において、次のウェーブ  $W_{k+1}$  での胴体と脚の運動を立案する系であり、1ウェーブに1回実行される。

#### 3) level C

このレベルはフィードフォワード制御のサンプリングタイム (TITAN VI では 20 msec) ごとに実行され、その時点での位置および力のフィードフォワード目標値を算出する系である。

#### 4) level D

このレベルはソフトウェアフィードバックのサンプリングタイム (TITAN VI ではレベル C と同じく 20 msec) ごとに実行され、センサによるフィードバック制御を行い、動的安定性を維持する系である。このレベルのサンプリングタイムはできるだけ短いほう

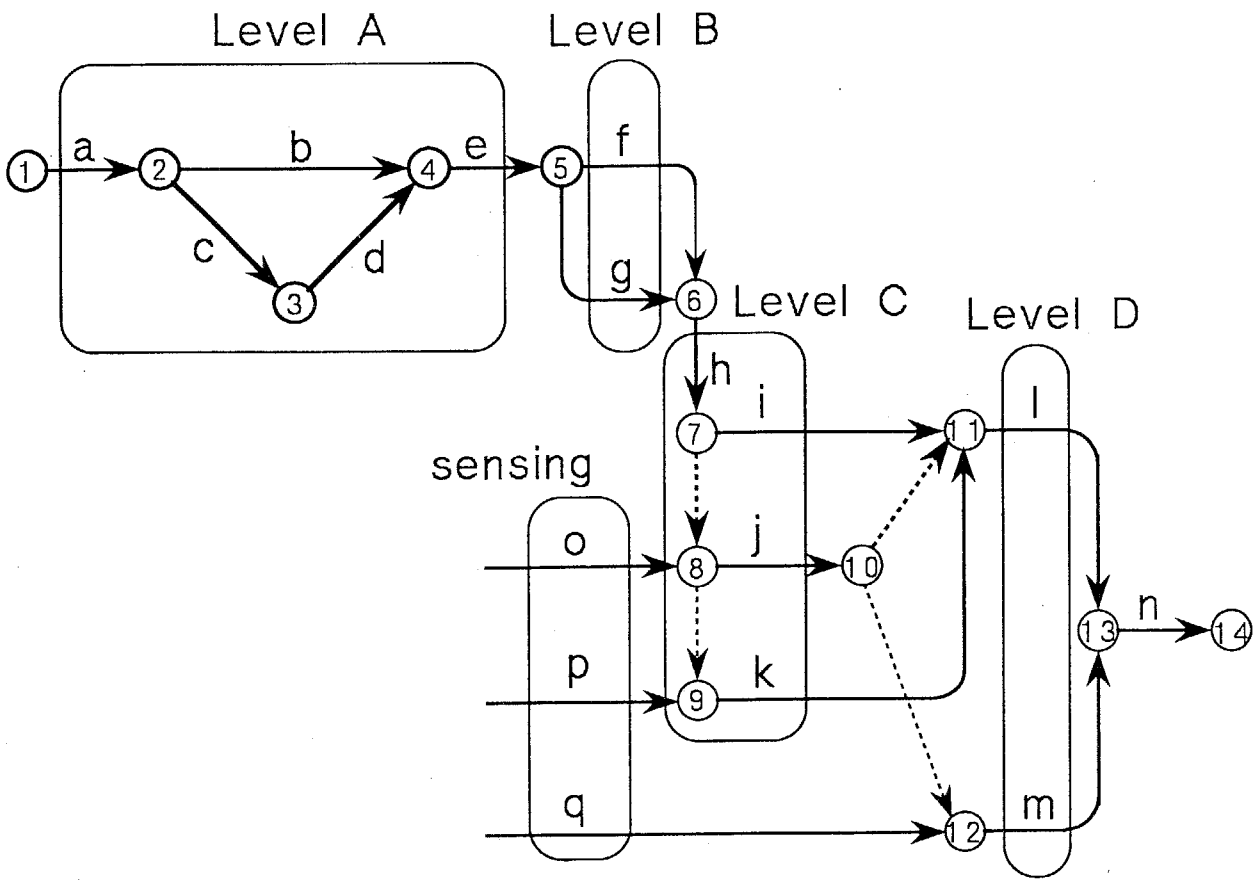


Fig.6-19 Arrow diagram of the dynamic control of a quadruped

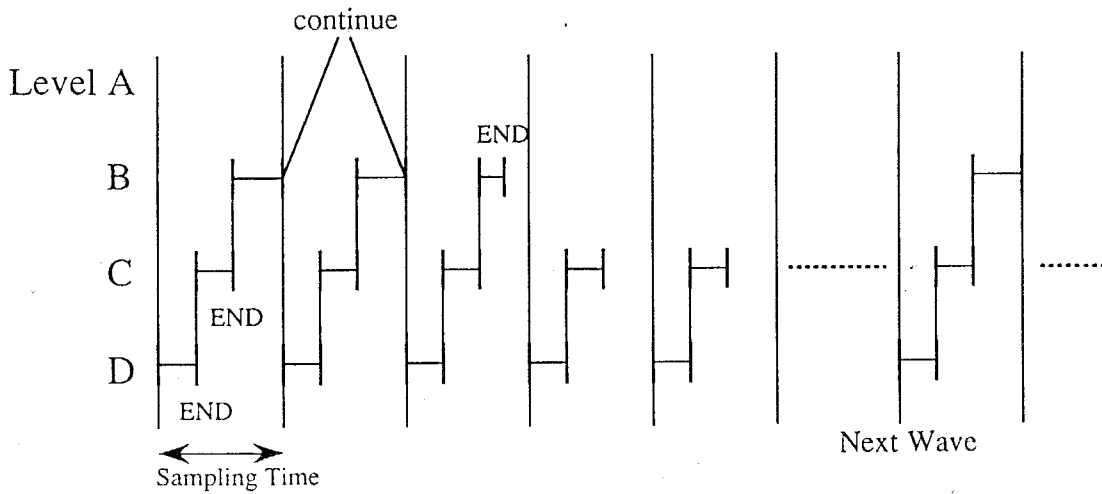


Fig.6-20 Timing chart of parallel processing

が制御ループのゲインを上げることができ、応答が速くなるので、レベルCとは別のサンプリングタイムを設定している。例えば、レベルCを1回実行する間にレベルDを3回実行することもできる。ただし、現状のTITAN VIの制御コンピュータでは速度が不足しており、両者のサンプリングタイムは同一としている。

これらのレベルに $A < B < C < D$ という優先順位を付け、サンプリングタイムごとの割り込み処理において、優先順位の高い順に実行する。この様子をFig.6-20に示す。1つのレベルの実行が終了すると、そのレベルは再び実行要求があるまでは優先順位外とし、次の順位のレベルを実行する。しかし、例えばレベルBを実行中でもサンプリングタイムごとの割り込み時には再びレベルDとCが実行要求されるため、Bの作業は中断する。こうしてレベルBの作業は寸断されながらも1ウェーブ中には終了する。

## 第7章 歩行実験

前章までに論じた動的歩行制御法の有効性を検証するため、機械モデルTITAN IV および TITAN VI を用いて歩行実験を行なう。ここでは、従来、行なわれていなかった移動速度を連続的に変化させる動的歩行、動的旋回歩行、階段における動的歩行、未知の不整地における動的歩行の実現を試みる。

### 7.1 左右揺動補償付き静動融合歩容の検証

提案した静動融合歩容による歩行実験を行い、動的安定性を考慮した左右揺動補償軌道の有効性を検証する。なお、ここでは左右揺動補償のみを行い、アクティブサスペンション制御は付加していない。

#### 7.1.1 平地直進歩行の実現

静動融合歩容の実現性を検証するため、Photo 7-1 の4足歩行機械モデルTITAN IVを用いて、平坦地で直進歩行を行なった。この機械モデルは1985年に開発されたもので、脚長1.2m、全重量140kgで、Photo 1-4 と同様の3次元パンタグラフ機構により、GDAを実現している。ただし、2段変速機構、節体幹機構、力センサは装備していない。その実験の1例をPhoto 7-1、Fig.7-1 に示す<sup>33)</sup>。この歩行実験は拡張トロット歩容により、静止状態から $\beta=0.8$ でスタートし、連続的に加速しながらデューティ比 $\beta$ を小さくしてゆき、8ウェーブで $\beta=0.5$ 、速度400 [mm/sec]まで到達し、その後は一定速度で移動するような目標軌道を与えた場合である。Photo 7-1 は胴体上部にランプを取り付け、移動中の胴体上部の軌跡を示している。Fig.7-1はこのランプを取り付けた胴体上の点の速度変化を示している。これはこの胴体上にプーリを付けたタコジェネレータを設置し、移動環境に張ったワイヤを巻きつけて計測したものである。計測された運動はほぼ理論通りであったが、最高速度での歩行時にある程度前後方向の振動が相乗されていることが観測された。このような振動は、補正軌道生成時に与えた歩行機械の重心位置の誤差、サーボ系の誤差による脚の軌道運動のずれ、床面の若干の凹凸の影響などで生じたものと思われ、アクティブサスペンション制御を行えば解消できると考えられる。

#### 7.1.2 平地旋回歩行の実現

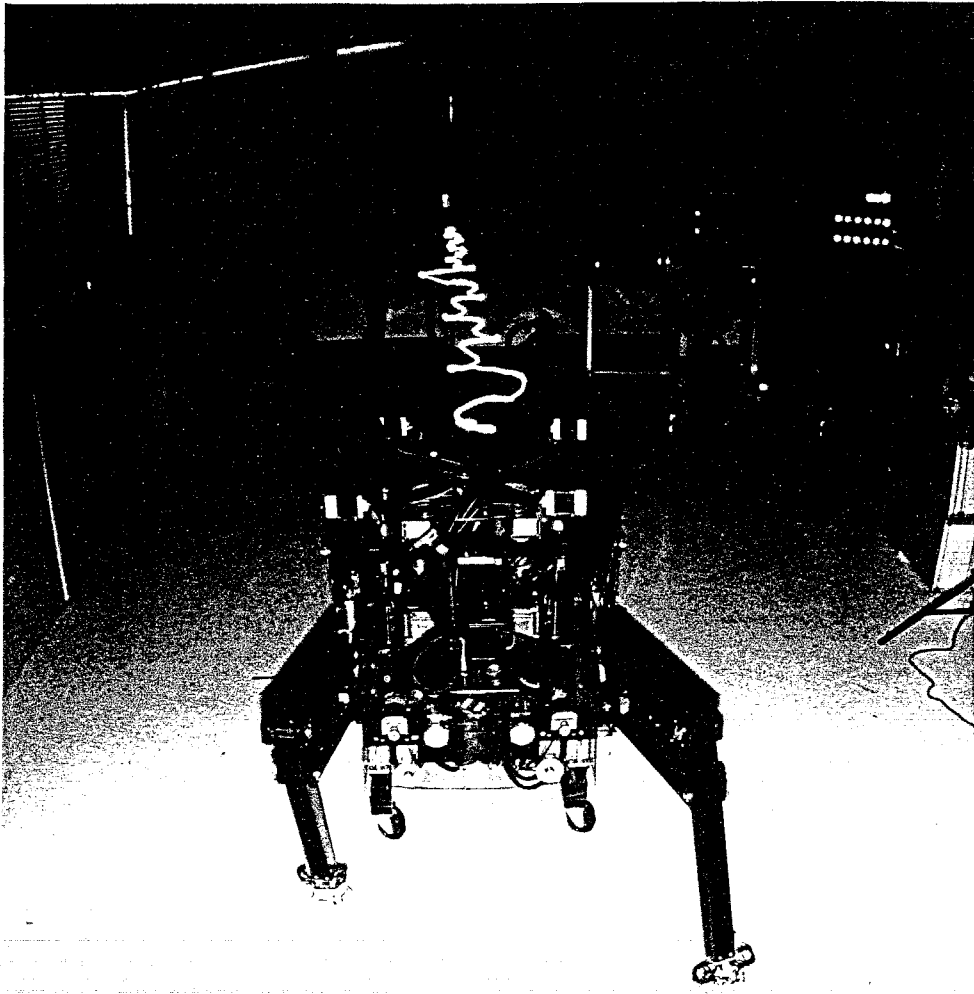


Photo 7-1 Dynamic & static fusion gait from standstill where  $\beta = 0.8$   $V_G = 0$  [mm/sec] to a dynamic walk where  $\beta = 0.5$   $V_G = 400$  [mm/sec]. The swaying motion of the body is shown by the trajectory of the light attached to the body.

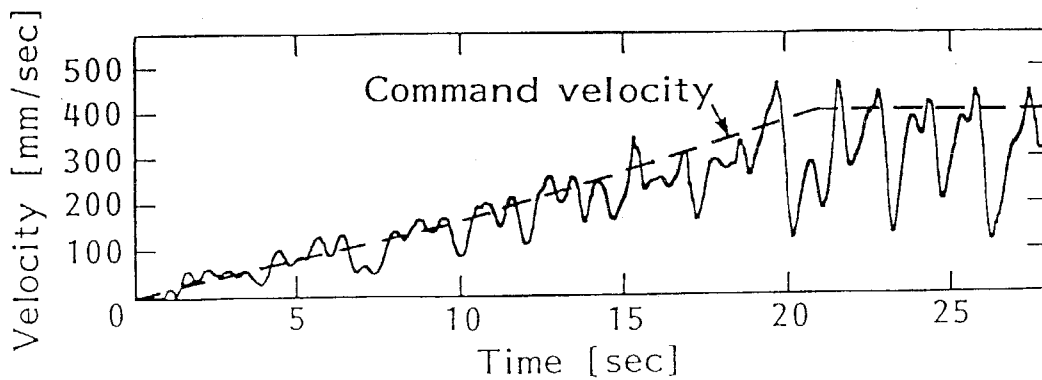


Fig.7-1 Measured locomotion velocity vs. command velocity of the walk shown in photo 7-1

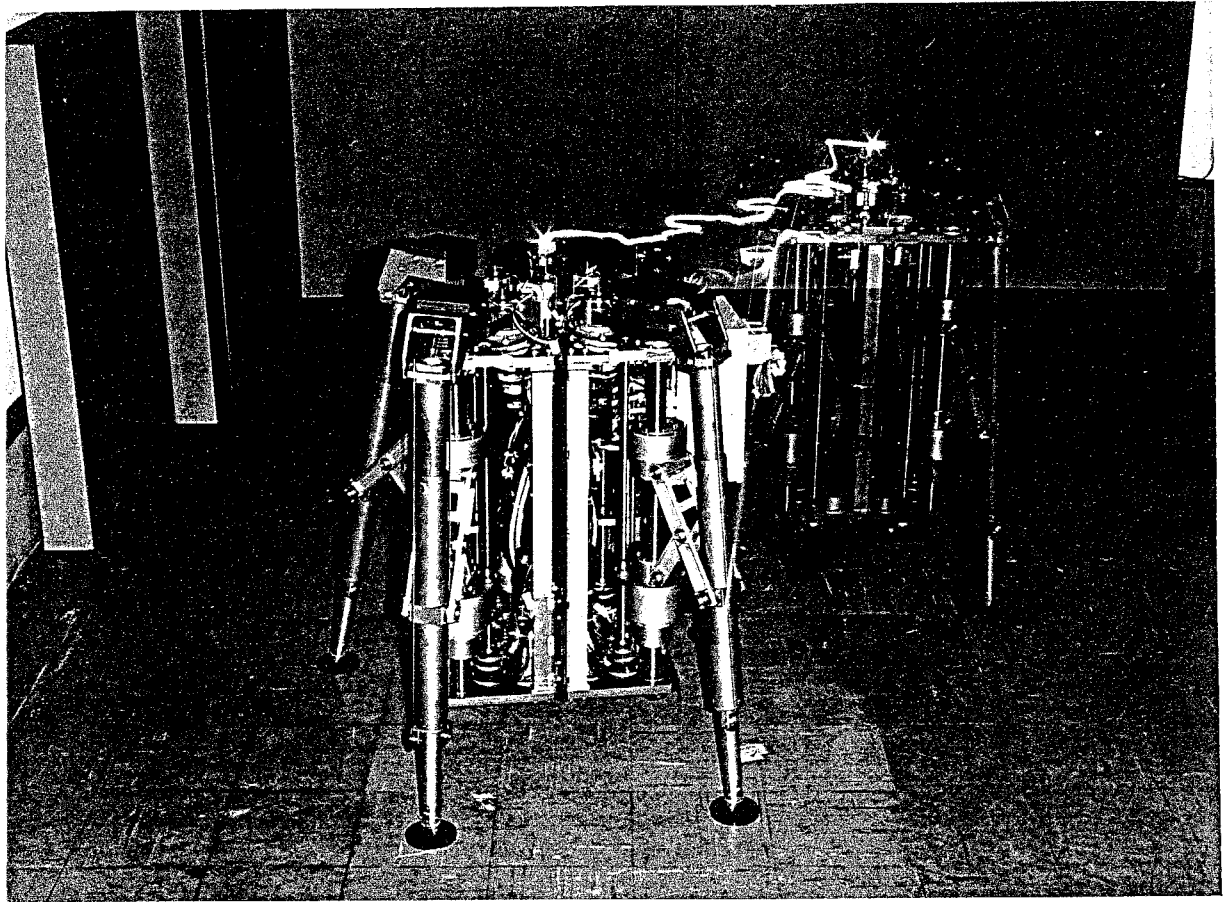


Photo 7-2 Experiment of walk along circular path where  $\beta = 0.62$   $V_G = 100$  [mm/sec].  
Swaying motion of body is shown by trajectory of light attached to body.

4足歩行機械モデル TITAN VI を用いて実験を行なった。半径 1 m の円弧に沿った右 90 度旋回歩行の様子を Photo 7-2 に示す<sup>78)</sup>。向って右側の薄い像がスタート時、左側が終了時の像である。写真ではわかりにくいだが、胴体が 90 度回転している。デューティ比は初めが 0.7 で 2 歩目以降は 0.62、速度は 100 [mm/sec] である。計画された揺動に加えて細かい振動が生じているが、動的バランスは保たれており、安定して歩行が継続されている。

## 7.2 アクティブサスペンション制御の有効性の検証

アクティブサスペンション制御の有効性を検証するため、足先に力センサを装備した機械モデル TITAN VI による実験を行う。

### 7.2.1 予備実験による性能試験

#### i) 1脚だけによる足踏み

TITAN VI を 3 脚支持で起立させ、支持脚にはブレーキをかけておき、残った一脚で足踏みを行った。このときの接地力の時間変化の様子を Fig.7-2 に示す。図中の A の部分は通常の床面、B の部分は床面上に厚さ 50 mm の固い板を置いた場合、C の部分は床面上に柔らかいクッション材を置いた場合の結果である。いずれも着地した瞬間は約 100 N の衝撃力が生じているが、それ以降は、ほぼ指令通りの力が出ている。このように床の高さの異なる場合や、床が柔らかい場合にも安定して力制御が行われていることがわかる。

#### ii) 胴体傾斜の復帰

アクティブサスペンションによる姿勢制御の性能を検証するため、あらかじめ胴体を傾けた後に、姿勢制御を開始し、復帰の様子を測定した。傾斜の時間変化の様子を Fig.7-3 に示す。制御開始時に若干の振動が見られるが、ほぼ期待した通りの時間でスムーズに水平に復帰している。

### 7.2.2 平地歩行における安定性比較

TITAN VI による平地歩行をアクティブサスペンション制御を付加した場合と付加しない場合について、同一の条件で実行させ、接地力と胴体傾斜の変化の様子を測定する。

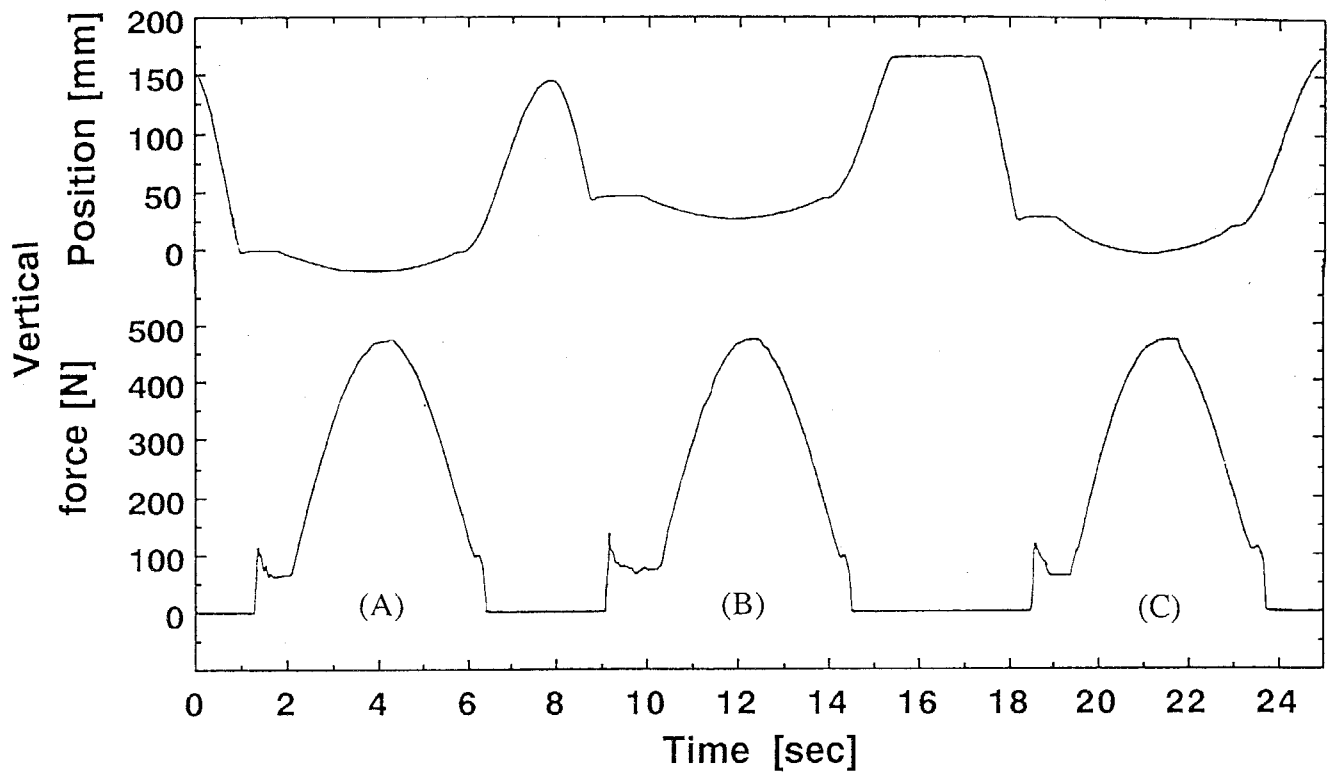


Fig.7-2 Measured foot force and position diagram with (A) normal floor (B) rigid obstacle (C) soft obstacle

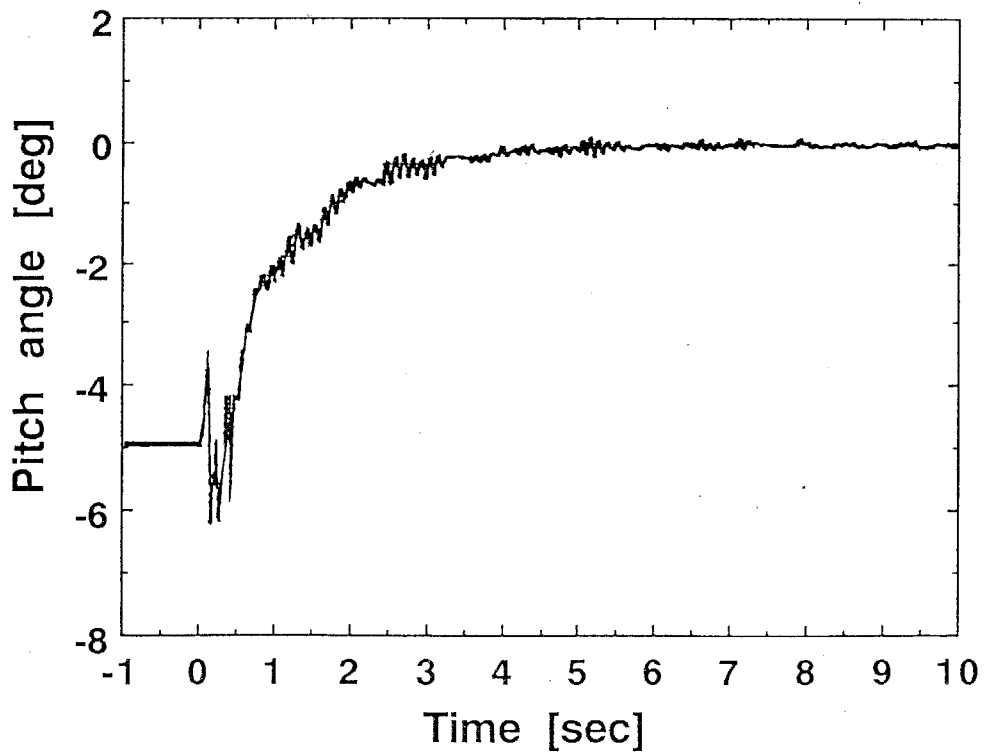


Fig.7-3 Measured body inclination just after feedback control is turned on



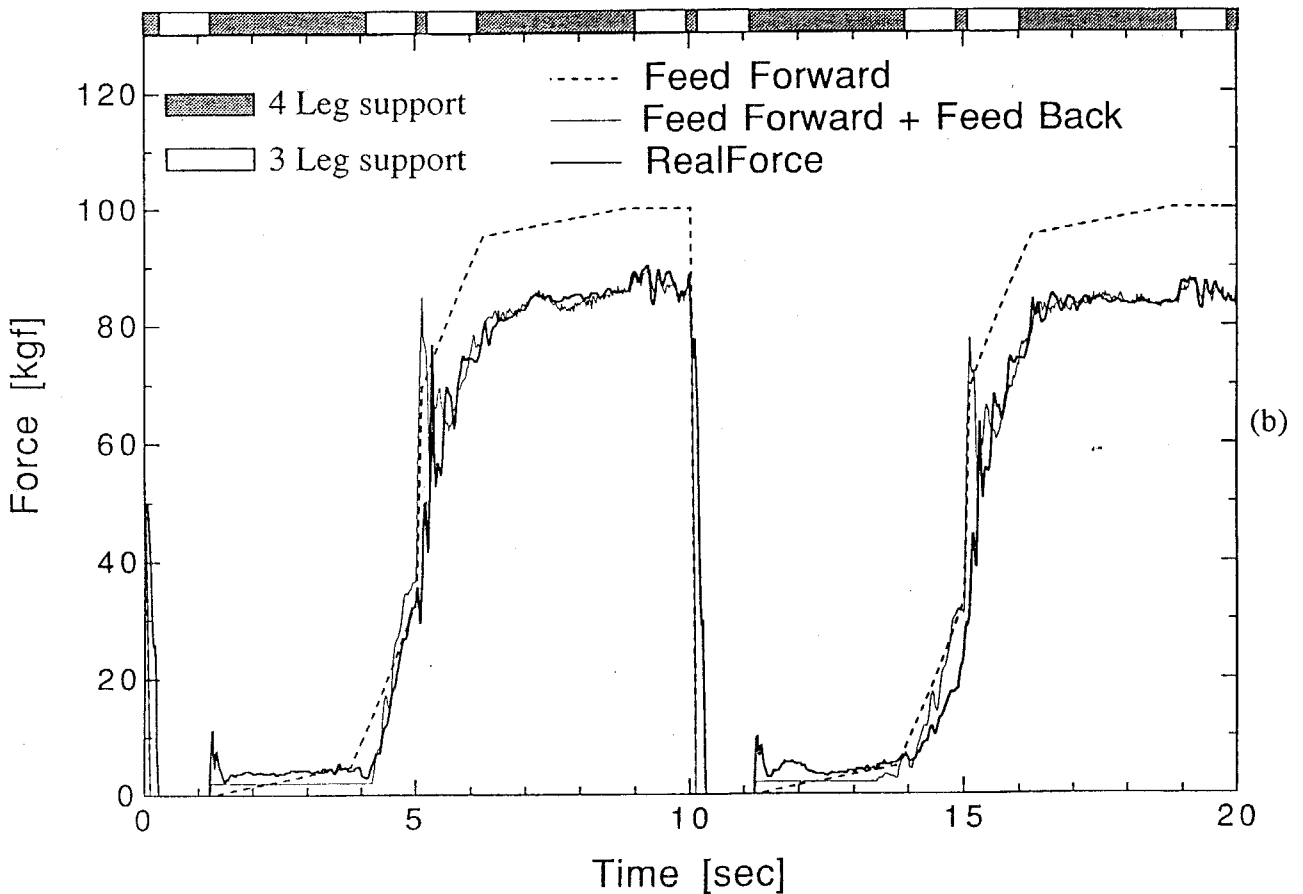
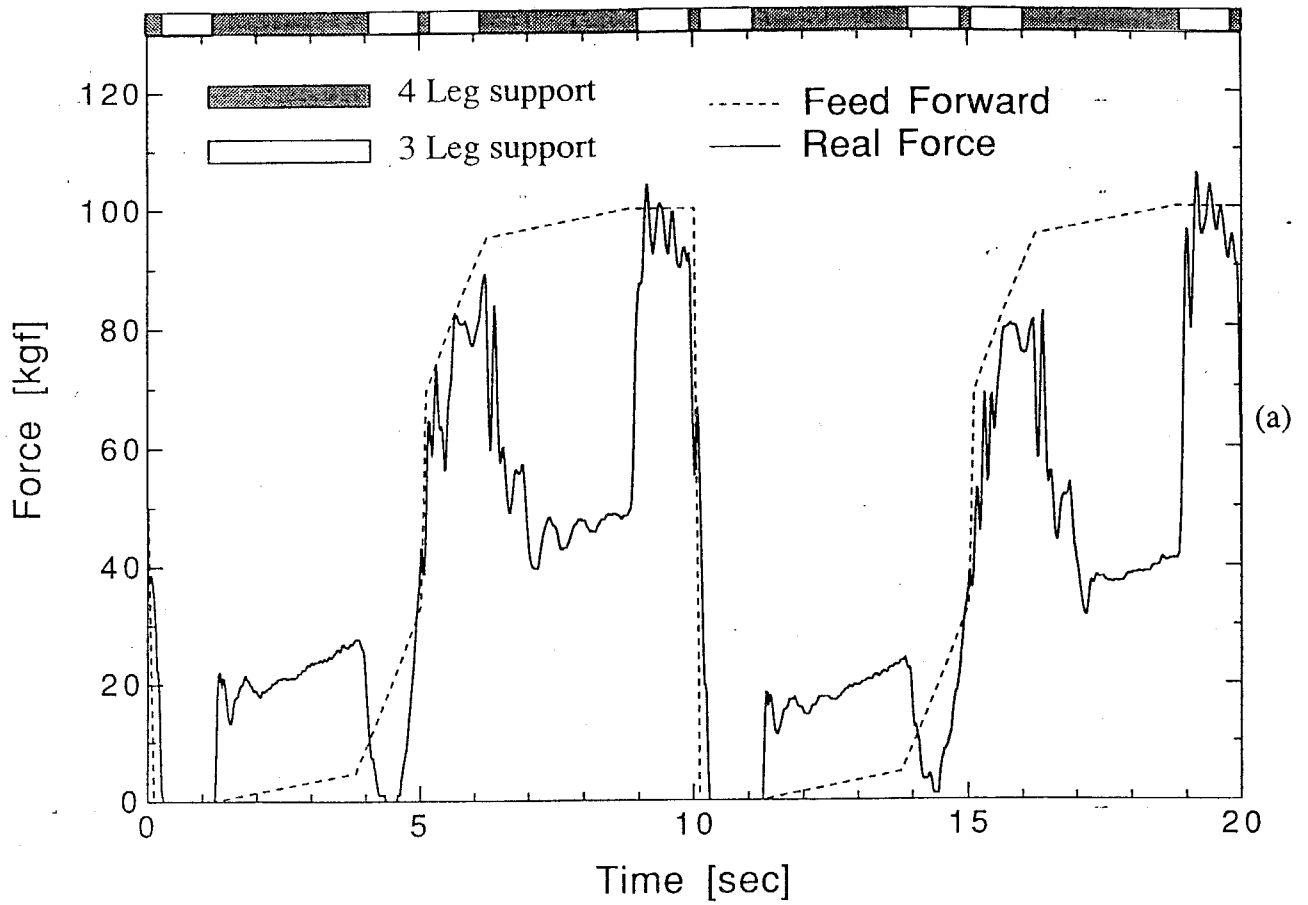


Fig.7-4 Desired and real foot force with (a) position feedback only  
 (b) active-suspension control

Fig.7-4 はデューティ比 0.88で4 ウェーブを約20秒で歩行させたときの左前脚の接地力変化の様子である。(a)が位置制御のみの場合で、(b)がアクティブサスペンション制御を付加した場合である。グラフには、実際のカセンサの計測値(Real Force)のほか、フィードフォワードによって計算された値(Feed Forward)を示した。位置制御のみの場合は、フィードフォワード計算値は制御では使われていないので参考値である。さらに(b)では、フィードフォワードの値に、計測された胴体姿勢から算出したフィードバックの値を加えた力制御の指令値(Feed Forward + Feed Back)も示している。位置制御のみの場合は、左前脚自身が上下する瞬間だけでなく、他の脚が上下するのに伴って接地力が大きく変化している。さらに、このグラフでは3脚支持期間はほぼフィードフォワード計算値に一致しているのに対し、4脚支持期間では大きく異なっている。これは、4脚支持期間は脚を剛体と考えると力が不静定になるため、3脚支持期間での接地力と不連続になっているためと考えられる。これに対してアクティブサスペンション制御では着地時に僅かな衝撃があるものの、その後は他の脚の上下の際にも滑らかに力が変化している。また、実際のカセンサの計測値と力制御の指令値は良く一致しており、脚の力制御の性能が良いことがわかる。なお、グラフ(b)でフィードフォワード+フィードバックの指令値が常にフィードフォワードの指令値からずれているのは、計算に用いたモデルの重心位置に誤差があり、フィードフォワードの指令値通りの力では胴体が傾いてしまうのを、フィードバックで補正しているものと考えられる。

Fig.7-5 はデューティ比を0.725から徐々に下げて、4 ウェーブ後には0.68とした動的歩行の際の胴体ピッチ角を示している。位置制御のみでは、デューティ比を下げるに従って傾斜が大きくなっているが、アクティブサスペンション制御ではデューティ比を下げてても小さな傾斜に保たれている。

### 7.2.3 階段歩行の実現

従来、ZMPによる動的安定軌道生成は平坦地のみに限られていたが、第2章で提案した転倒安定性の概念を用いることにより、階段などの大きな凹凸のある地形においても、動的安定軌道を生成することができる。この軌道の妥当性を検証するため、階段における動的歩行の実現を試みた。

階段歩行においては、接地点から重心までの高さが高く、脚の前後方向のスタンスが短くなるなど、安定保持上、不利な条件となる。このため、フィードフォワード補

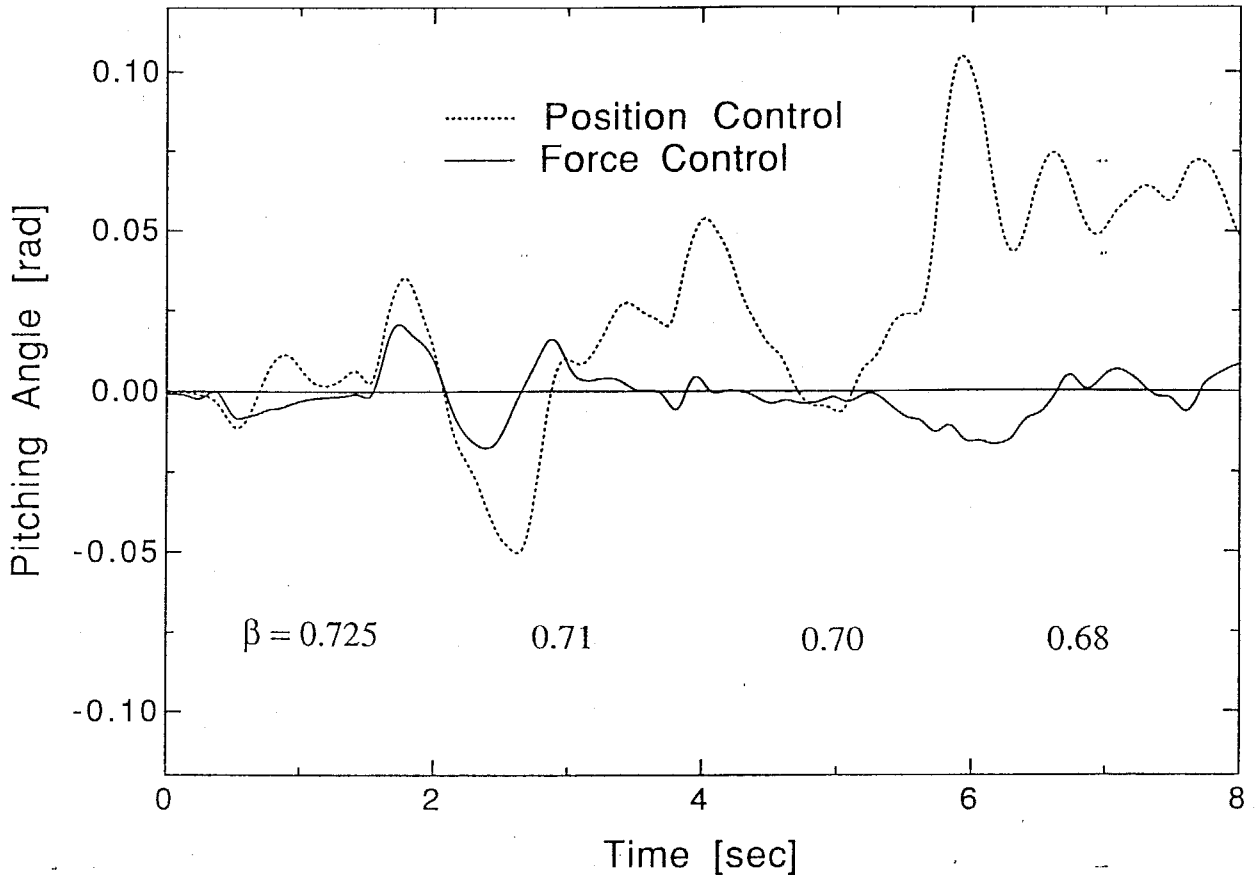


Fig.7-5 Pitching angle of body during a dynamic walk of  $\beta = 0.725$  to 0.68 on a flat plane

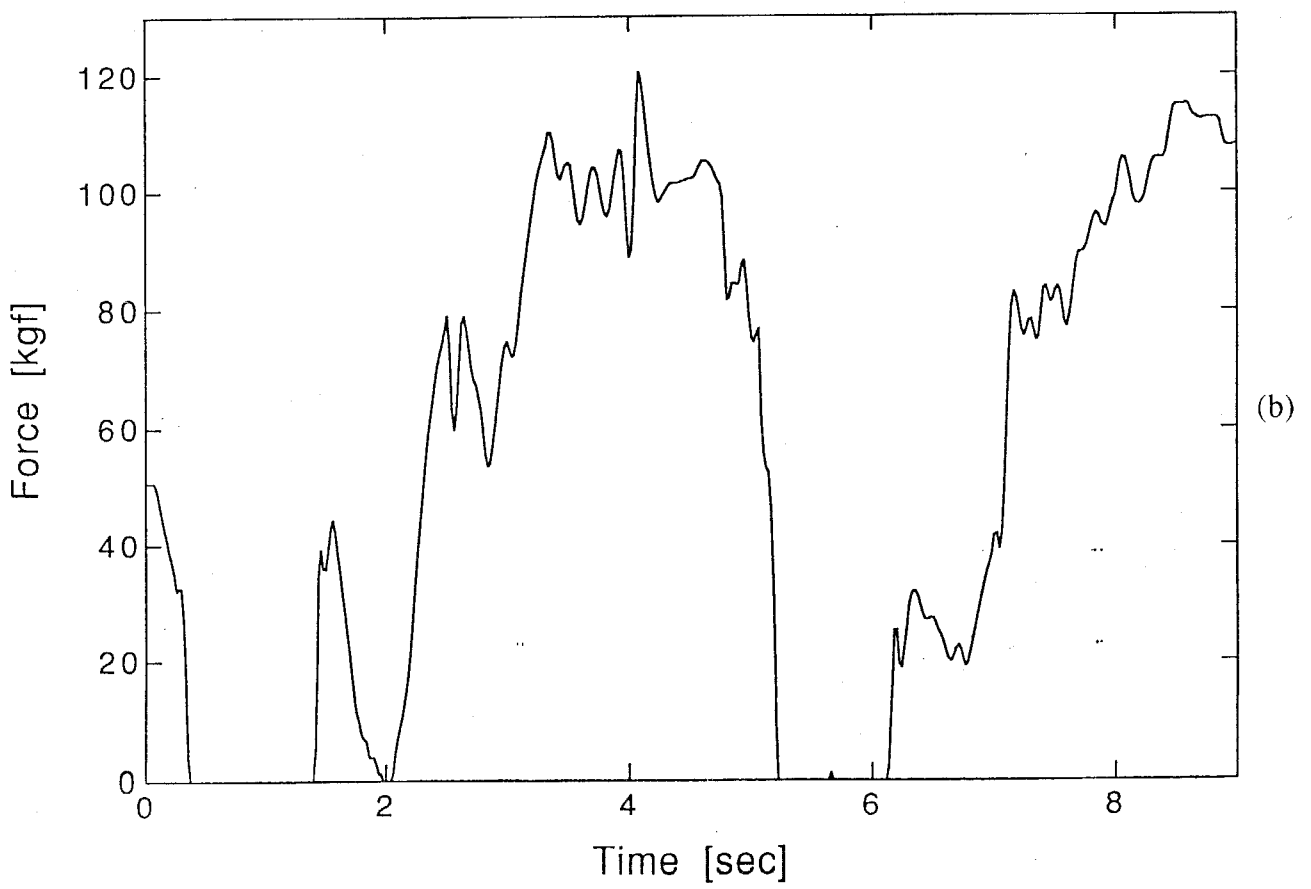
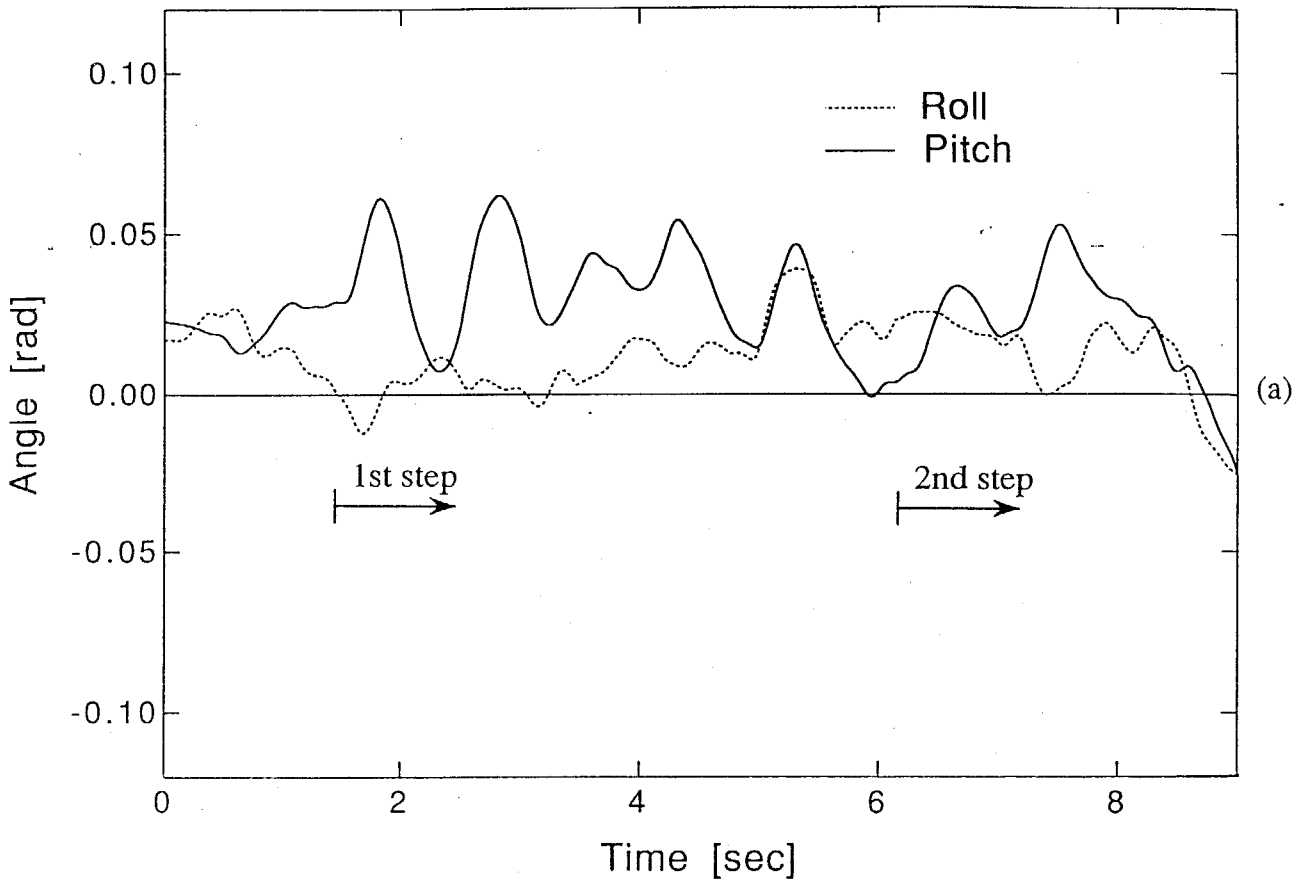


Fig.7-6 (a) Pitching angle of the body and (b) measured force of the left-front foot during a dynamic walk of  $\beta = 0.70$  from a flat plane to the stairs

償のみでは脚を上下する際の不連続な力の変化により、胴体の振動的な運動が生じてしまう。このような場合もアクティブサスペンション制御を付加することにより、歩行中の接地力変化が滑らかになると同時に、胴体振動も吸収されるため、階段歩行がスムーズに実現できるものと考えられる。

Fig.7-6 に階段歩行中の胴体傾斜角と左前脚の接地力を示す。階段は高さ150 mm、奥行き400 mmで、デューティ比は0.68である。はじめは平坦な床面からスタートし、接地力グラフの1歩目が階段の1段目、2歩目が階段の2段目である。階段上でも胴体の傾斜が少なく、安定して歩行している。

#### 7.2.4 未知の不整地歩行の実現

未知の不整地でのアクティブサスペンション制御の有効性を検証するため、水平な床面上に高さ40mmの段差を木板で作し、その上をデューティ比 0.88 で歩行させた。段差の情報は歩容決定アルゴリズムにはインプットしていない。段差がある場合と、無い場合の歩行中の胴体傾斜角をFig.7-7 に示す。段差のある場合は、図中の時刻7秒付近で木板を踏んでおり、平坦値の場合に比べ、やや傾きが大きくなっているが、十分な歩行が実現されている。

次に、柔らかい路面上での歩行を行なった。Fig.7-8 はFig.7-7 の実験で堅い木板であった段差を弾性のあるものとした場合の胴体傾斜角である。この段は2本の角材上に薄い木板を渡したものであり、100kgfの荷重で約20mmたわむ程度のものである。デューティ比は同じく0.88である。このような地形の場合にも胴体傾斜は少なく、安定して歩行している。

続いて、Fig.7-7 と同じ堅い板で作った不整地において、デューティ比 0.70の動的歩行を試みた。このときの胴体傾斜角と4つの接地力の様子をFig.7-9 に示す。4つの接地力変化から2脚支持期間のある動的歩行であることがわかる。胴体の傾斜は、静歩行の場合に比べて、若干大きくなっているが、十分安定して歩行が継続されている。

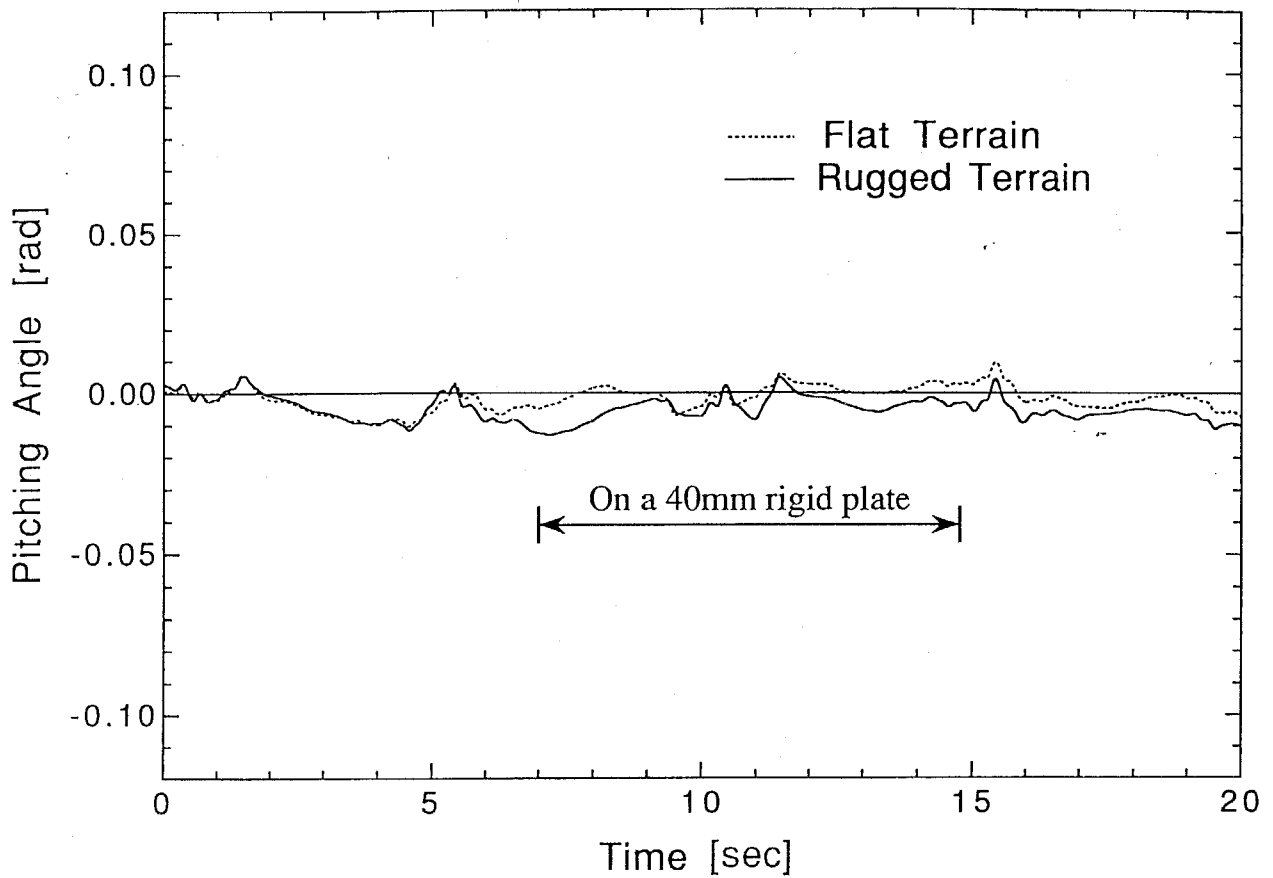


Fig.7-7 Pitching angle of the body during a static walk of  $\beta = 0.88$  on unknown rough terrain

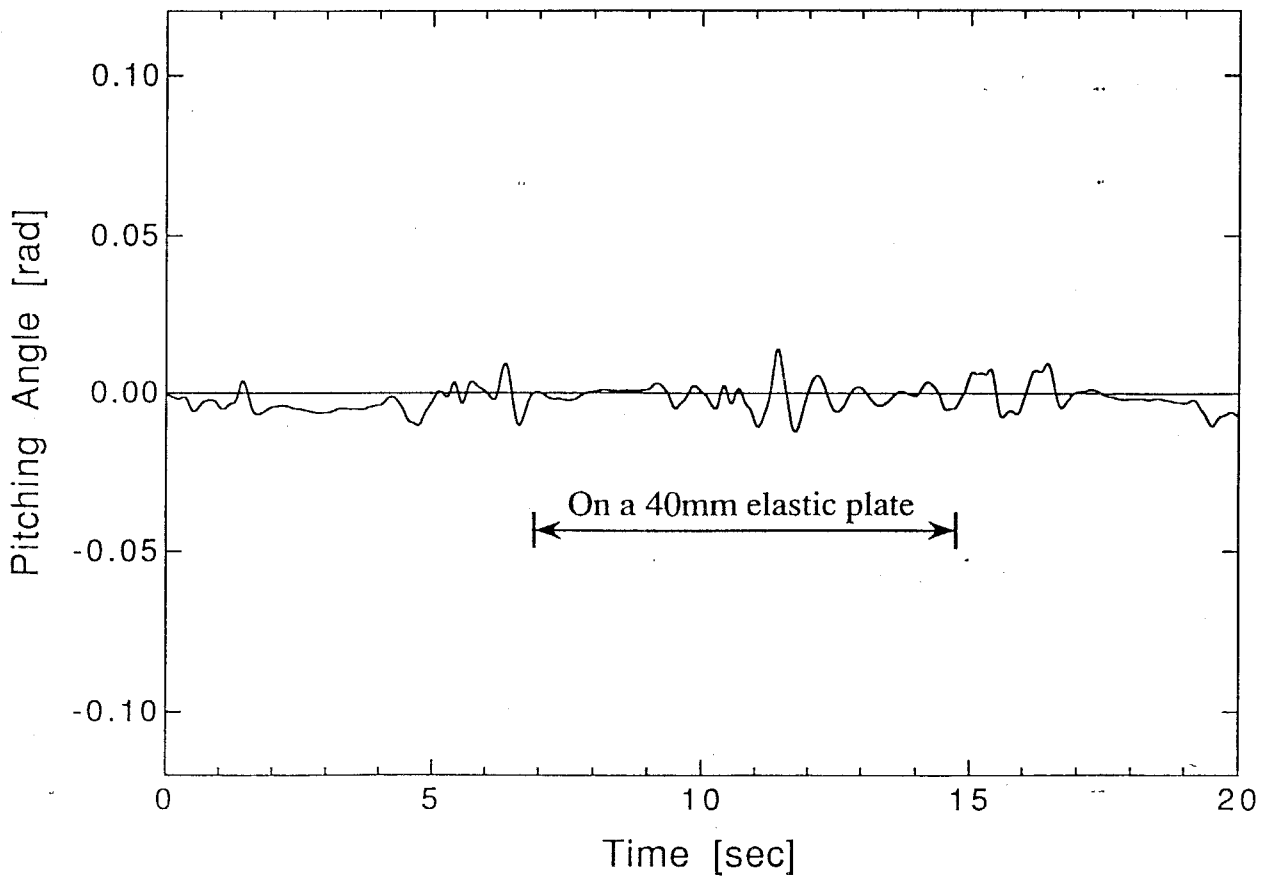


Fig.7-8 Pitching angle of the body during a static walk of  $\beta = 0.88$  on unknown soft terrain

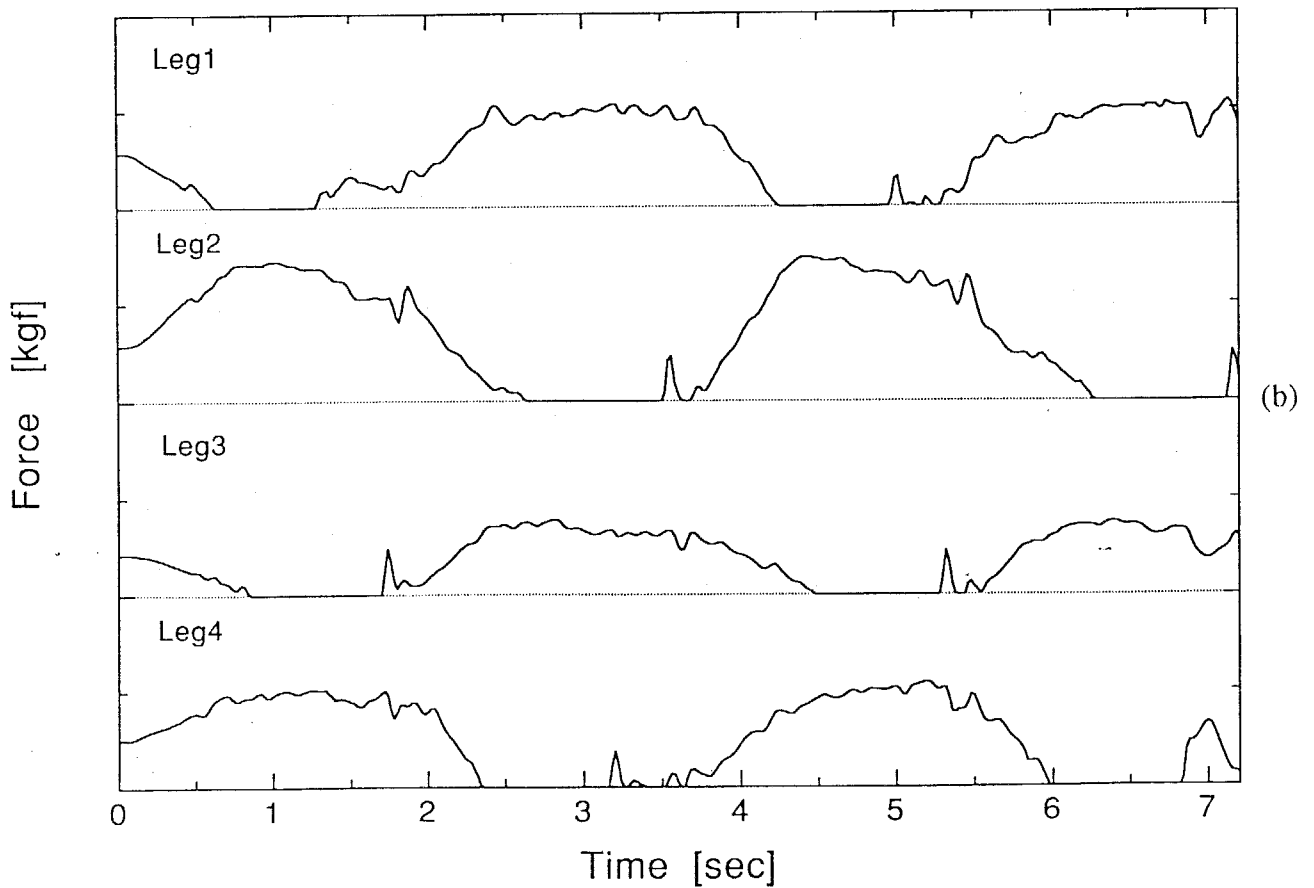
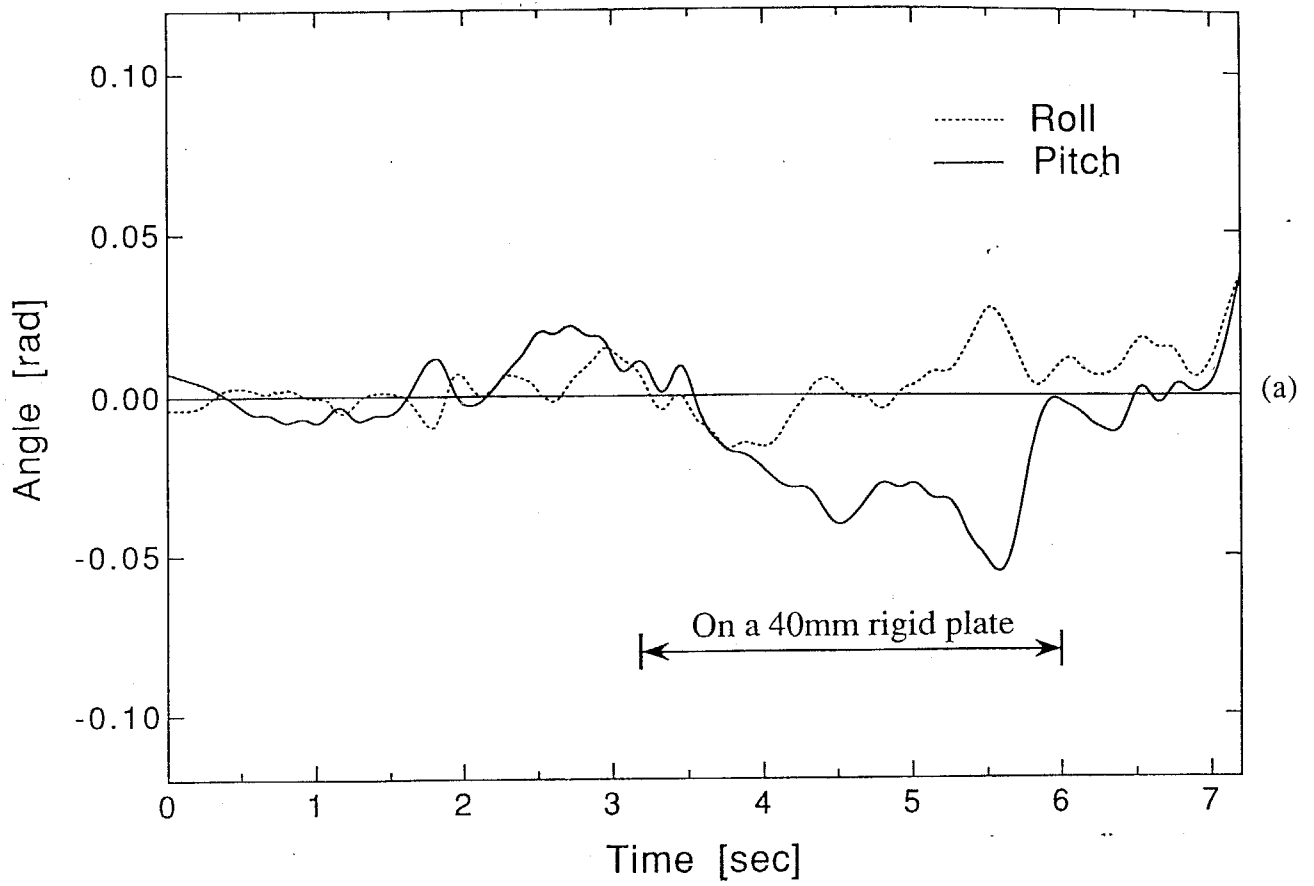


Fig.7-9 (a) Pitching and rolling angles of the body and (b) measured foot forces during a dynamic walk of  $\beta=0.70$  on unknown rough terrain

## 第8章 結論

### 8.1 4足歩行機械の制御

本論文では、第2章で動的歩行の安定性について検討した。従来の4足歩行機械の動的安定制御の研究<sup>39,62,65)</sup>では平地での基準動歩行しか行っていない。また、これらの制御法はいずれも胴体の運動が振動的であり、物資搬送などの実用的な使用には適していない。一方、文献47)の2足歩行機械の研究で述べられているZMP<sup>73)</sup>を使った安定歩行軌道生成法は、歩行機械の多くの自由度のうち、脚先の位置、胴体の高さなど、いくつかの自由度の運動はあらかじめ任意の軌道に設定した後、残りの自由度の運動を計算して適切に設定することで安定性を確保することができる。このため、胴体の上下動、回転といった物資搬送に適さない運動はおこさないようにあらかじめ設定することが可能であり、4足歩行機械をより実用的なものとすることができると考えられる。しかし、このZMPの概念は水平面上を移動する場合にのみ正しく用いることができ、不整地には厳密には適応できないことを指摘した。そして、歩行機械が転倒する瞬間は必ず2脚支持状態を通過することに注目し、その状態で、安定側に復帰するか、転倒するかを判別する「転倒安定性判別」と呼ぶ新たな安定判別基準を導入した。これは凹凸のある不整地はもちろん、壁や天井も含んだ3次元地形を移動する吸着ロボットにも適応できる一般性の高いものである。

第3章では4足歩行機械を任意の移動速度で、任意の方向に移動させるための歩容について検討した。従来、4足歩行機械の歩容制御法は、静的歩行に関しては広瀬ら<sup>11-20)</sup>が論じている。一方、動的歩行に関しては、木村,下山,三浦<sup>39)</sup>、Raibert<sup>63)</sup>、佐野,古荘,岡島<sup>65)</sup>の研究があるが、いずれも一定速度で直進する基準歩容について論じられている。本論文では、静歩行と動的歩行を融合するためには、トロット歩容に基づく動的歩容の生成が望ましいことを指摘し、クロール歩容とトロット歩容を統一的に表現できる拡張トロット歩容の提案、および、あらかじめ動力学計算を行なってフィードフォワード的に胴体重心の軌道を修正する左右揺動補償の提案を行なった。

第4章では、第2章で提案した転倒安定性判別を用いた胴体左右揺動補償軌道の生成法、および脚軌道の生成法について論じた。従来の研究では、安定条件によってすでに計画された軌道の安定性を判別することはできるが、安定性が確保できる軌道を生成する解析的な方法は見いだされておらず、数値計算が必要であった。このため、リアルタイムで軌道計算を行なうことが難しく、センサを用いた障害物回避など、そ



の場での応答に支障があった。本論文ではある程度の近似を行なうことによって解析的に計算が可能な軌道生成アルゴリズムを導入した。

また、動的歩行の際の高速脚運動の軌道計画についても検討した。これは、脚のダイナミクスを考えて、胴体運動とは独立に絶対座標系上で生成され、後に胴体座標系に変換される。

第5章では、不整地においても滑らかな脚の接地を実現し、外乱がある場合にも胴体の姿勢を維持するアクティブサスペンション制御を導入した。従来の研究では、不整地歩行については静歩行の場合についてのみ考察され、動的歩行の制御については平坦地の場合の考察しか行なわれておらず、これらをそのまま不整地歩行に適用させることはできなかった。これに対し、本論文では、足先の接地力をあらかじめ動力学で計算するフィードフォワード制御と、空間インピーダンスを設定して胴体姿勢の補正を行なうフィードバック制御を融合したアクティブサスペンション制御法により、不整地においても滑らかな脚の接地と胴体姿勢の維持を実現した。

第7章では、第5章までに論じた制御法と第6章で論じた機械モデルを用いて歩行実験を行ない、その有効性を検証した。はじめに、平地における軌道制御のみの動的歩行を行ない、第3章で提案した静動融合歩容の有効性、第4章の動的安定軌道生成法の妥当性を確認した。また、平地から階段への連続した動的歩行を行ない、第2章で導入した不整地に対応した動的安定性評価基準と、それを用いた軌道生成法の妥当性を検証した。続いて、平地においてアクティブサスペンション制御を付加した場合と付加しないとの比較を行ない、アクティブサスペンション制御では脚の接地力が滑らかになり、胴体の傾斜も小さいことを示した。さらに、アクティブサスペンション制御によって未知の不整地での静歩行および動的歩行が実現できることを示した。

## 8.2 4足歩行機械の機構

本論文では、不整地での動的歩行を行なうための機械モデル TITAN VI の設計について検討を行なった。従来の4足歩行機械の関節型の脚では、脚の途中が階段との接触をおこしやすかったが、これを回避するため、本論文では階段との干渉の少ない直動伸縮型の脚を導入した。この脚は文献14)で提案された、水平方向と鉛直方向の駆動を分離するGDAの原理を用いているため、効率の良い脚駆動をおこなうことができる。また、2段変速型の駆動法を導入し、動的歩行を行なうために必要な遊脚時の高速性と支持脚時の強力性を同時に実現した。

また、脚先端に装備する力センサについては、従来の歪ゲージを用いた力センサは歩行機械に装備するにはダイナミックレンジが狭く、性能が不十分であったが、光学式の計測法を導入し、歩行機械に適した非線形特性を持つダイナミックレンジの広い力センサを開発した。また、歩行機械に装備する理想的な力センサとしては、6軸力センサが望ましいが、歩行実験の結果、本論文で実装した1軸力センサでも、通常の地形であれば十分であった。なお、6軸力センサについては、付録に示した。

### 8.3 4足歩行機械の今後の課題

本論文では、4足歩行機械をより実用的なものとし、建設現場や各種プラントなどで活躍させるために、移動速度を自在に変化できる機能、任意の曲線に沿って移動できる機能、平地のみでなく未知の不整地を踏破する機能を実現した。今後は、これらの機能を活用し、視覚などのセンサ情報によって移動速度、移動方向を決定し、安全な経路を確保する機能が必要であろう。また、不整地での踏破性能を向上させるため、ダイナミックレンジが広く、過負荷に強い6軸力センサを開発して足先に装備し、これを用いた制御を行なう必要があると考えられる。さらに、安全な着地点の探索、決定については、広瀬ら<sup>20)</sup>が、静歩行において近接センサによって探りながら試行錯誤的に決定する方法を論じているが、動的歩行の場合は、時間をかけて試行錯誤的に探索することはできないので、地図情報や視覚センサ情報をもとに、短時間で決定しなければならない。このため、安定した接地が得られ、かつ動的歩行の安定性が確保できるような着地点の決定を行なうアルゴリズムの開発が期待される。

## 付録

### 光学式 6 軸力センサとその軸力非線形干渉の校正処理

#### 6 軸力センサのハードウェア

開発した 6 軸力センサは、Fig.6-8(e) 型の光センサユニット 3 台を、Fig.A-1, Photo A-1 のように 120 度回転対称に配置し、その間を一体成型した 3 本の屈曲したスポーク状の弾性材で支持している。従来の歪ゲージ方式の 6 軸力センサでは、各軸方向の力によって弾性材の一部分を選別的に変形させ、その 1 軸方向の変形を個別に歪ゲージで検出しなければならないため、構造が複雑であった。これに対し本 6 軸力センサでは、フレーム全体で 6 軸変位を生ずればよいと、弾性材の構造はより単純化され、耐荷重性も向上できている。実際、本方式の 6 軸力センサは、Table A-1 に示すように同一耐荷重の在来の歪ゲージ方式の 6 軸力センサより小型化されている。

#### 6 軸力センサの信号処理

従来、6 軸力センサの変位（歪）と力との関係は

$$\mathbf{X} = \mathbf{C} \mathbf{F} \quad \mathbf{C} = (c_{ji}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6} \quad (\text{A-1})$$

あるいは

$$\mathbf{F} = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{X} \quad \mathbf{C}^{-1} = (a_{ij}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6} \quad (\text{A-2})$$

のように  $6 \times 6$  のコンプライアンス行列  $\mathbf{C}$  あるいは剛性行列  $\mathbf{C}^{-1}$  などで示されている。この行列の各成分は多数回の実験から最小 2 乗法で求められる。一般に市販されている歪ゲージ式 6 軸力センサでは、このような校正を行なうための剛性行列がデータとして添付されている。Table A-1 に示した精度とは、この剛性行列を用いて校正した値の計測誤差である。しかし、構造材に複数の力が作用しているとき、ある方向の力は他の方向の力と変位出力の感度に影響を与える。つまり非線形な特性が生ずる。そのため 6 軸力センサの特性は、従来から考えられている (A-1) 式のような線形関係では完全に表記できない。たとえば、センサの構造材の一部として Fig.A-2 のような部分を考えよう。そして力  $F_1$ 、 $F_2$  および変位  $X_1$  の方向を図のように仮定する。ここで、(A-1) の表記法を使用すると、力  $F_2$  を加えた場合の変位  $X_1$  の変化は行列要素  $c_{12}$  で表わされている。  $F_1$  が加わっていないときは、構造材は図の実線のようになっており、  $F_2$  を加えても  $X_1$  方向の変位はほとんど生じない。すなわち  $c_{12}$  は非常に小さい。しかし  $F_1$  を加

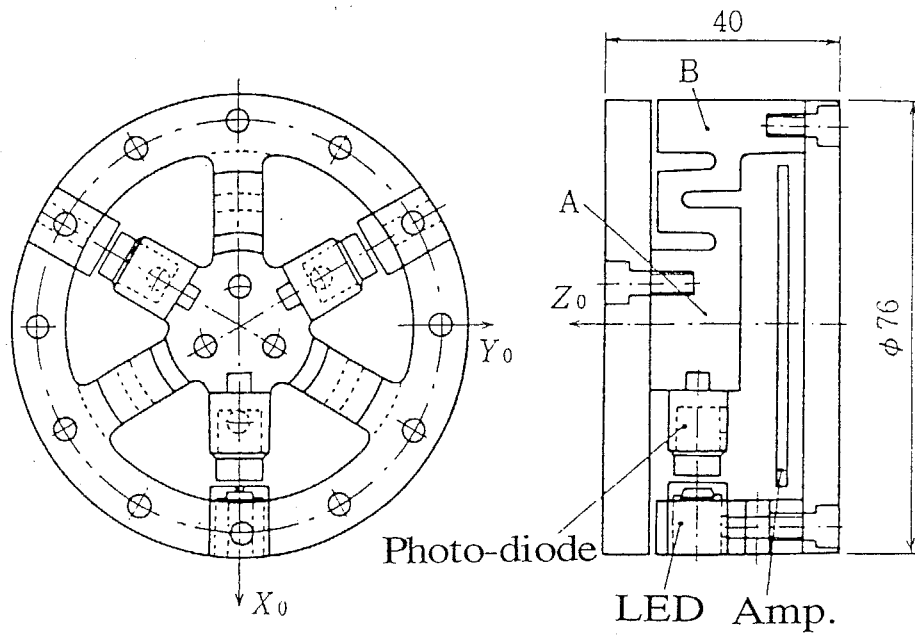


Fig.A-1 Structure of optical 6-axial force sensor

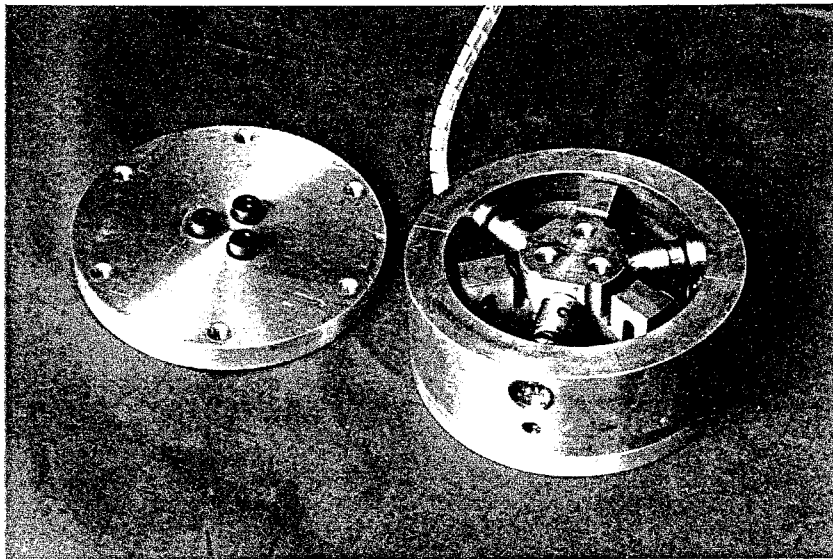


Photo A-1 overall view of optical 6-axial force sensor

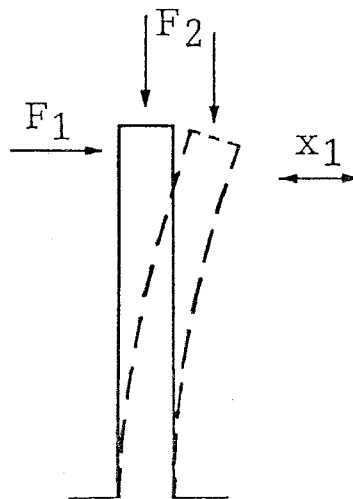


Fig.A-2 Relation between forces and displacement on force sensor structure

えると、構造材は破線のように変形し、この状態で $F_2$ を加えると、 $X_1$ 方向の変位が大きくなる。すなわち $c_{12}$ の値は先程より大きなものになる。つまり、力と変位の関係は非線形で、複数の力が干渉し合っていることがわかる。

このような非線形性を考えるため、因果律を逆にし、力を変位の関数と考える。この関数には変位 $X_j$ の1次、2次、さらに高次の項の他、 $X_j X_k$ のような積の項も考えられる。そこで、それぞれの項の大きさについて検討した結果、力 $F_i$ を求める関数は、

$$F_i = \sum_{j=1}^6 a_{ij}X_j + b_{ij}X_j^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^6 c_{ij}X_iX_j + d_{ij}X_iX_j^2 \quad (\text{A-3})$$

の22項からなるものとした。例えば、 $F_1$ の場合には、

$$\begin{array}{cccccc} X_1 & X_2 & X_2 & X_2 & X_2 & X_2 \\ X_1^2 & X_2^2 & X_3^2 & X_4^2 & X_5^2 & X_6^2 \\ X_1X_2 & X_1X_3 & X_1X_4 & X_1X_5 & X_1X_6 & \\ X_1X_2^2 & X_1X_3^2 & X_1X_4^2 & X_1X_5^2 & X_1X_6^2 & \end{array}$$

の22項である。これは各軸力については2次の項まで、また軸力間の干渉については2軸力までとし、3軸以上の相互干渉については考慮していない。これらの各項の係数は、それぞれの項が独立した入力であるかのように扱うことにより、多数回の測定結果から最小2乗法によって求めることができる。これによって非線形な干渉項も含んだ校正が可能となる。

この非線形校正法の妥当性を検証するため、多軸力同時付加実験を行なった。Table A-2にその結果を示す。(a)は1軸力付加において従来のように線形特性であると仮定して(A-2)式の剛性行列によって求めた力と実際の力との平均誤差である。どの軸力についても0.1%~0.3%で良好な結果を示している。(b)(c)は2軸力を同時に付加する実験をすべての軸力の組み合わせについて行なったものであり、(b)は(a)と同じ線形処理をした場合の誤差、(c)は非線形校正法によって求めた力の平均誤差を示す。2軸力付加では線形処理のみでは誤差が大きくなっているが、提案した非線形校正法により精度が向上していることがわかる。さらに(d)(e)は3軸力を同時に付加した場合であり、(d)は線形処理、(e)は(c)と同じ非線形校正を行なったものである。上述のように、この校正では2軸力間の干渉だけを考慮しているが、3軸力付加でも特に誤差が大きくなる組み合わせについて、精度を向上させることが可能であることがわかる。

Table A-1 Comparison of 6-axial force sensors

Maker	H Company		N Company		Authors proposal
Measuring method	Strain gauge				Optical
Range Fx, Fy Fz Mx, My, Mz	30kgf 50kgf 300kgf·cm	100kgf 100kgf 1000kgf·cm	22kgf 44kgf 170kgf·cm	44kgf 88kgf 510kgf·cm	100kgf 100kgf 300kgf·cm
Accuracy (1-axis)	0.8%	0.5%	0.2%	0.2%	0.3%
Size	φ 76 × 47.5mm	φ 150 × 51mm	φ 75 × 38mm	φ 110 × 38mm	φ 76 × 40mm
Weight	360 g	1600 g	390 g	860 g	380 g
Amplifier	* 480 g	* 580 g	* 1650 g	* 1650 g	Built-in
Compliance Fx, Fy Fz [μ m / Full range]	42 2.9	106 47	22 17	17 22	70 100
Price	\$ 6,400	\$ 11,700	\$ 6,700	\$ 6,700	< \$ 500

\* External mount

Table A-2 Standard deviation errors [%] of optical 6-axial force sensor with linear and non-linear calibrations under simultaneous 1,2, and 3-axial loading conditions

Force	1-axis	2-axes		3-axes	
	linear	linear	non-linear	linear	non-linear
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Fx	0.25	0.66	0.33	0.74	0.73
Fy	0.18	0.50	0.30	0.69	0.37
Fz	0.22	0.35	0.16	0.66	0.62
Mx	0.11	0.36	0.21	1.52	0.32
My	0.29	0.46	0.19	0.65	0.85
Mz	0.12	0.39	0.16	0.92	0.42

## 謝辞

本論文の研究と執筆を行なうにあたり、全面的に御指導いただいた、東京工業大学工学部機械物理工学科 広瀬茂男教授に慎んで感謝の意を表します。そして、常に本研究をあたたく見守ってくださり、御指導、御鞭撻をいただき、また、本論文について懇切な御指導、御討論をいただいた、梅谷陽二教授、舟橋宏明教授、狼 嘉彰教授、伊能教夫助教授に深く感謝いたします。さらに、本研究について、数々の有益なアドバイスをいただいた機械物理工学科 吉田和哉助手、松永三郎助手、鈴木秀昭技官に慎んで御礼申し上げます。

また、本研究を共同遂行して頂いたメンバーである、福田 靖氏（東芝、博士1年）、古谷利器氏（現 横河電機）、高木達雄氏（現 日本IBM）、荒井和彦氏（現 イーストマン・コダック）、安永和敏氏（修士2年）、飯山浩幸氏（修士1年）に深く感謝いたします。そして、本研究について熱心な御討論をしていただいた、吉田和弘氏（現 東工大精密工学研究所助手）、馬 書根氏（現 カリフォルニア大学リバーサイド校研究員）、森島昭男氏（現 電子技術総合研究所）、長久保晶彦氏（博士1年）に慎んで御礼申し上げます。

また、本研究の機械モデル開発にあたり、多大な御協力を頂いた三菱重工業高砂研究所の大道武生氏、井辺智吉氏、福家康隆氏に慎んで御礼申し上げます。さらに、6軸力センサの開発に御協力いただいた古河電工の鈴木雄一氏に慎んで御礼申し上げます。

最後に、様々な御協力、御討論をしていただいた、梅谷研、広瀬研、狼研、伊能研の皆様方に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 安達,小谷内,中野,"自由歩容型4脚歩行ロボットの開発",第4回知能移動ロボットシンポジウム講演論文集,pp.45-19, 1988
- 2) 安達,小谷内,中村,中野,"脚に設置された力センサを用いた4脚歩行ロボットの適応歩容",日本ロボット学会誌, Vol.9, No.6, pp.707-717, 1991
- 3) 有本,宮崎,"二足歩行ロボットの階層制御",日本ロボット学会誌,Vol.1, No.3, pp.167-175, 1983
- 4) Fujie et.al,"Development of quadruped walking mechanism",ICAR,pp.65-76,1986
- 5) 藤江,細田,菅,榊原,服部,本間,小林,中野, "4脚歩行機構の開発(1)冗長自由度機構の運動制御開発方式の検討",第6回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, pp.321-324, 1988
- 6) 福田,細貝,佐藤,"光ファイバを用いたロボット用6軸力センサ",第2回ロボットセンサシンポジウム予稿集, pp.69-72, 1990
- 7) 古荘,"動的二足歩行ロボットの制御",日本ロボット学会誌, Vol.1, No.3, pp.182-190, 1983
- 8) D.M.Gorinevsky, A.Yu.Shneider,"Force Control in Locomotion of Legged Vehicles over Rigid and Soft Surfaces", Int. J. Robotics Research, Vol.9, No.2, pp.4-23, 1990
- 9) M.Hildebrand,"Symmetrical gaits of horses", Science, Vol.150, pp.701-708, 1965
- 10) 細田,藤江,菅,榊原,服部, "4脚歩行機構の開発(4)動歩行時の倒れ込み運動に関する検討",第6回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, pp.309-312, 1988
- 11) S.Hirose, Y.Umetani,"Some considerations on a feasible walking mechanism as a terrain vehicle", 3rd CISM-IFTToMM Int. Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators,pp.357-375, 1978
- 12) 広瀬,岩崎,梅谷,"歩行機械の静的安定性評価基準",第21回自動制御連合講演会予稿集, pp.253-254, 1978
- 13) S.Hirose, Y.Umetani,"The basic motion regulation system for quadruped walking vehicle",Proc.of ASME Design Engineering Technical Conf, 1980
- 14) 広瀬,梅谷,"歩行機械の脚形態と移動特性",バイオメカニズム5,pp.242-250,1980
- 15) 広瀬,梅谷,"4足歩行機械システムの開発",第1回知能移動ロボットシンポジウム講演論文集 pp.101-106 1982
- 16) 広瀬,岩崎,梅谷,"4足歩行機械の知能的歩容決定に関する基礎的研究",計測自動制御



- 学会論文集,Vol.18,No.2, pp.193-200, 1982
- 17) 広瀬,"移動ロボット技術", 計測と制御, Vol.21, No.12, pp.1129-1134, 1982
  - 18) 広瀬,菊池,梅谷,"4足歩行機械の基準巡回歩容", 日本ロボット学会誌, Vol.2,No.6, pp.545-556, 1984
  - 19) S.Hirose et al,"TITAN III a quadruped walking vehicle -- Its Structure and Basic Characteristics --", Proc.2nd ISRR,pp.325-331 1985
  - 20) 広瀬,福田,菊池,"4足歩行機械の制御システム", 日本ロボット学会誌, Vol.3,No.4,pp.304-323, 1985
  - 21) 広瀬,古谷,高木 "4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究 その11静動遷移歩行に関する基礎的研究", 第4回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, pp.393-394, 1985
  - 22) 広瀬,吉田,田口,"地図生成視覚システムMARSの研究",日本ロボット学会誌,Vol.4, No.3, 1986
  - 23) 広瀬,古谷,高木 "4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究 その12加減速を考慮した脚運動基礎式の誘導", 第26回計測自動制御学会学術講演会講演予稿集, pp.505-508, 1987
  - 24) 広瀬,古谷,高木 "4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究 その13静動遷移歩行の実現", 第26回計測自動制御学会学術講演会講演予稿集, pp.509-510, 1987
  - 25) 広瀬,古谷,高木, "4足歩行機械の動的歩行の研究", 第4回知能移動ロボットシンポジウム講演論文集 pp.33-38, 1988
  - 26) 広瀬,高木 "4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究 その14 重心移動速度の連続制御", 第6回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, pp.313-316, 1988
  - 27) 広瀬,井上,米田, "ウイスカセンサとその複数信号の伝達", 日本ロボット学会誌, Vol.6 No.2, pp.13-20, 1988
  - 28) 広瀬,国枝,"4足歩行機械の一般化基準脚軌道", 計測自動制御学会論文集, Vol.25, No.4, pp.455-461, 1989
  - 29) 広瀬,米田,高木 "4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究 その16 動的基準収束型適応歩容", 第28回計測自動制御学会学術講演会講演予稿集, pp.427-428, 1989
  - 30) 広瀬,米田,荒井,"自動2段変速機による歩行機械の脚駆動性能向上", 第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.441-444, 1989
  - 31) 広瀬,米田,"分割型光検出器を用いた3軸力センサ", 日本ロボット学会誌Vol.7 No.1,

pp.31-38, 1989

- 32) 広瀬,米田,"光学式 6 軸力センサの開発とその複数軸力の非干渉化処理", 計測自動制御学会第28回学術講演会予稿集, pp.735-736, 1989
- 33) 広瀬,米田,"4 足歩行機械の静動融合歩容とその連続軌道生成", 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.3, pp.267-275, 1991
- 34) 広瀬,米田,"光学式変位センサと力センサ", 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.7, pp108-109, 1991
- 35) 広瀬,米田,荒井,井辺,"直動型 4 脚歩行機械TITAN VIの開発", 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.4, pp.445-452, 1991
- 36) 井上,"ラムダ型アーム構造の新型ロボット", ロボット, pp.60-65, 1985
- 37) 金子,谷江,堀内,"路面の変形を考慮した多足歩行機械の一制御方法", 日本ロボット学会誌, Vol.4, No.3, pp.231-240, 1986
- 38) 金子,横井,鈴木,谷江,"プーリ・ワイヤ駆動系におけるトルクセンシングとトルク制御", 日本ロボット学会誌 Vol.7 No.1, pp.62-70, 1989
- 39) 木村,下山,三浦,"四足歩行ロボットの力学的解析", 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.5, pp.367-378, 1988
- 40) Charles A.Klein and Randal L.Briggs,"Use of active compliance control of legged vehicles", IEEE Trans. on systems, Man, and Cybernetics, Vol.SMC-10, No.7, pp.393-400, 1980
- 41) Charles A.Klein, Karl W.Olson, and Dennis R.Pugh,"Use of force and attitude sensors for locomotion of a legged vehicle over irregular terrain", Int.J. Robotics Research, vol.2, No.2, pp.3-17, 1983
- 42) Charles A. Klein and Tae-sang Chung, "Force interaction and allocation for the legs of a walking vehicle", IEEE Int.J of Robotics and Automation, Vol.RA-3, No.6, pp.546-555, 1987
- 43) Charles A. Klein and Sakon Kittivatcharpong, "Optimal force distribution for the legs of a walking machine with friction cone constraints", IEEE Int.J of Robotics and Automation, Vol.6, No.1, pp.73-85, 1990
- 44) 小谷内ほか,"階段昇降可能な固定歩容型 6 脚移動ロボットの開発 (第 6 報)", 第 9 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.907-908, 1991
- 45) Eric Krotkov, John Bares, Takeo Kanede, Tom Mitchell, Reid Simmons, and Red

- Whittaker, "Amblar : A six-legged planetary rover", Proc.of 5th International Conference of Advanced robotics, pp.717-722, 1991
- 46) 草木,小野,緒方,高田,畑村,"6軸力センサLSA6000の開発(第2報)",日本ロボット学会第5回学術講演会予稿集, pp167-168, 1987
- 47) 李,高西,加藤,"6軸力センサを用いた2足歩行ロボットのZMP測定システムの開発",日本ロボット学会誌, Vol.10, No.6, pp.828-833, 1992
- 48) R.A.Liston and R.S.Mosher, "A versatile walking truck", proc.1968 transportation Engineering conference, ASME-NYAS, Washington D.C., 1968
- 49) 牧野,"自動機械機構学",日刊工業新聞社, 1976
- 50) Robert B. McGhee, "Finite state control of quadruped locomotion", Proc.2nd Int.Symp.on Exteral Control of Human Extremities, Dubrovnik, Yugoslavia, 1966
- 51) R.B.McGhee, "Some finite aspects of legged locomotion", Mathematical Biosciences, Vol.2, No.1/2, pp.67-84, 1968
- 52) R.B. McGhee,A.A.Frank, "On the Stability properties of Quadruped Creeping Gaits", Mathematical Biosciences,vol.3,no.3,pp.331-351,1968
- 53) R.B.McGhee and A.K.Jain, "Some properties of regularly realizable gait matrices", Mathematical Biosciences, Vol.13, No.1/2, pp.179-193, 1972
- 54) R.B.McGhee, "Control of legged locomotion systems", Proc.Joint Automatic Control Conference, San Francisco, pp.205-215, 1977
- 55) Dominic A.Messuri and Charles A. Klein,"Automatic body regulation for maintaining stability of a legged vehicle during rough-terrain locomotion",IEEE J.Robotics and Automation,Vol.RA-1,No.3, 1985
- 56) 三浦,下山,"竹馬型二足歩行ロボットの制御系",日本ロボット学会誌, Vol.1, No.3, pp.176-181, 1983
- 57) R.S.Mosher, "Test and evaluation of a versatile walking truck", proc.Off-Road Mobility Research Symp.,Int. Soc. for Terrain Vehicle Systems, Washington D.C., pp.359-379, 1968
- 58) 長久保,広瀬, "光学式1軸力覚センサの開発",日本ロボット学会第9回学術講演会予稿集,pp.135-136, 1991
- 59) 中野,小谷内,金子,安達,野崎,池田,安部,高野, "階段登降可能な固定歩容型6脚移動ロボットの開発(第1報)",第1回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, 1983

- 60) D.E.Okhotsimski, V.S.Gurfinkel, E.A.devyanin, and A.K.Platonov, "Integrated walking robot development", Machine Intelligence, Vol.9, 1977
- 61) D.E.Orin and S.Y.Oh,"Control of force distribution in robotic mechanisms containing closed kinematic chains", Trans.of the ASME J.of Dynamic systems,measurement, and control, Vol.102, pp.134-141, 1981
- 62) Marc H.Raibert and Ivan E. Sutherland, "Machines that walk", Scientific american, Vol.248, No.1, pp.32-41, 1983
- 63) Marc H.Raibert,"Legged Robots That Balance", MIT Press, 1985
- 64) M.Russel, "Odex 1: The first functionoid", Robotics Age, Vol.5, No.5, pp.12-18, 1983
- 65) 佐野,古荘,岡島," 支持脚切り換え現象を考慮した4足歩行ロボットの動的制御", 日本機械学会論文集 C-508, 1988
- 66) 佐野,古荘,"2足歩行ロボットBLR-G3の開発とその動的制御",日本ロボット学会第8回学術講演会予稿集, pp.303-304, 1990
- 67) Liang Shih, Andrew A. Frank, and Bahram Ravani, "Dynamic simulation of legged machines using compliant joint model", Int.J. Robotics Research, vol.6,No.4,pp.33-46, 1987
- 68) Shin-Min Song and Kenneth J.Waldron, "Machines that walk:The adaptive suspension vehicle", MIT Press, 1988
- 69) Ivan E. Sutherland and Michael K. Ullner, "Footprints in the asphalt", Int.J. Robotics Research, vol.3,No.2,pp.29-36, 1984
- 70) 高西,"二足歩行ロボットによる準動歩行",日本ロボット学会誌, Vol.1, No.3, pp.196-203, 1983,
- 71) 高西ほか,"未知の外力下における2足歩行～横方向の未知外力に対する歩行制御方式の開発～",日本ロボット学会第9回学術講演会予稿集, pp.321-324, 1991
- 72) R.Tomovic, "A General Theoretical Model of Creeping Displacement", Cybernetica, Vol.4,No.2, 1961
- 73) M.Vukobratovic,J.Stepanenko, "On the Stability of Anthoromorphic Systems", Mathematical Biosciences, vol.15, pp.1-37, 1972
- 74) Kenneth J. Waldron, Vincent J. Vohnout, Arrie Pery, and Robert B. McGhee, "Configuration Design of the Adaptive Suspension Vehicle",Int.J.Robotics Research, vol.3,No.2,pp.37-48, 1984

- 75) Kenneth J. Waldron, "Force and Motion Control in Legged Locomotion", IEEE J. of Robotics and Automation, vol.RA-2, No.4, pp.214-220, 1986
- 76) 米田,広瀬 "4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究 その15 左右揺動型クロール歩容の導入", 第6回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, pp.317-318, 1988
- 77) 米田,広瀬 "4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究 その17 静動融合型対地適応歩容における安定性保持", 第7回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, pp.433-436, 1989
- 78) 米田,広瀬, "4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究 その18 動的旋回歩容", 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.901-902, 1991
- 79) 米田,広瀬, "4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究 その19 力情報を用いた不整地歩行", 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.903-904, 1991
- 80) 米田, "光応用センサとその活用", 機械の研究, Vol.43, No.12, pp.1322-1330, 1991
- 81) 米田, "光学式センサのロボットへの応用設計", 機械設計, Vol.36, No.7, pp.111-121, 1992
- 82) K. Yoneda and S. Hirose, "Dynamic and Static Fusion Gait of a Quadruped Walking Vehicle on a Winding Path", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.143-148, 1992
- 83) 米田,広瀬, "4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究 その20 不整地に対応した動的安定軌道生成", 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.573-574, 1992
- 84) 米田,飯山,広瀬, "4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究 その21 力情報を用いた歩容制御", 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.575-578, 1992
- 85) 吉川,宮崎, "6軸力覚センサの設計と試作", 日本ロボット学会第5回学術講演会予稿集, pp.163-166, 1987
- 86) ロボット工学ハンドブック、日本ロボット学会編、コロナ社、pp.353-364, 1990

## 業績一覧

### 印刷論文

- 1) 広瀬,井上,米田, “ウイスカセンサとその複数信号の伝達”, 日本ロボット学会誌, Vol.6 No.2, pp.13-20, (1988)
- 2) 広瀬,米田, “分割型光検出器を用いた3軸力センサ”, 日本ロボット学会誌, Vol.7 No.1, pp.31-38, (1989)
- 2') S.Hirose and K.Yoneda, "Tri-axial force sensor using a split type optical sensor", Advanced robotics, Vol.5, No.2, pp.165-181 (1991)
- 3) S.Hirose and K.Yoneda, "Robotic sensors with photodetecting technology", Proc.of 20th International Symposium on Industrial Robotics, pp.271-278, (1989)
- 4) 広瀬,米田, “光学式6軸力センサの開発とその非線形校正”, 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.5, pp.523-532, (1990)
- 4') S.Hirose and K.Yoneda, "Development of optical 6-axial force sensor and its calibration considering non-linear interference" Proc.of IEEE Int.Conf. on Robotics and Automation, pp.46-53, (1990)
- 5) 広瀬,米田, “4足歩行機械の静動融合歩容とその連続軌道生成”, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.3, pp.267-275, (1991)
- 5') S.Hirose, K.Yoneda, R.Furuya, T.Takagi, "Dynamic and Static Fusion Control of Quadruped Walking Vehicle", Proc.IROS'89, pp.199-204, (1989)
- 6) 広瀬,米田,荒井,井辺, “直動型4脚歩行機械TITAN VIの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.4, pp.445-452, (1991)
- 6') S.Hirose, K.Yoneda, K.Arai, and T.Ibe, "Design of prismatic quadruped walking vehicle TITAN VI", Proc.5th International Conference on Advanced Robotics, pp.723-728, (1991)
- 7) K.Yoneda and S.Hirose, "Dynamic and Static Fusion Gait of a Quadruped Walking Vehicle on a Winding Path", Proc.of IEEE Int.Conf. on Robotics and Automation, pp.143-148, (1992)

### 口頭発表

- 1) 広瀬,米田, “弾性的光軸微小移動を用いた力センサ”, 第26回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp.593-594, (1987)
- 2) 広瀬,米田, “4分割型フォトセンサを用いた3軸変位の検出と力センサへの応用”, 第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.157-158, (1987)
- 3) 米田, “HC地形のための2足歩行ロボットの開発”, 第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.585-586, (1987)
- 4) 米田,広瀬, “4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究 その15 左右揺動型クローラ歩容の導入”, 第6回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, pp.317-318 (1988)
- 5) 広瀬,米田,高木, “4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究 その16 動的基準収束型適応歩容”, 第28回計測自動制御学会学術講演会講演予稿集, pp.427-428 (1989)

- 6) 広瀬,米田, “光学式6軸力センサの開発とその複数軸力の非干渉化処理”, 計測自動制御学会第28回学術講演会予稿集, pp.735-736, (1989)
- 7) 米田,広瀬, “4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究 その17 静動融合型対地適応歩容における安定性保持”, 第7回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, pp.433-436 (1989)
- 8) 広瀬,米田,荒井, “自動2段変速機による歩行機械の脚駆動性能向上”, 第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.441-444, (1989)
- 9) 広瀬,米田, “光学式ロボットセンサの開発”, 第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.783-786, (1989)
- 10) 広瀬,米田, “新脚機構を有する4足歩行機械TITAN VIの設計”, 第5回知能移動ロボットシンポジウム講演論文集, pp.15-20, (1990)
- 11) 大畑,米田, “2足歩行ロボットの知能的歩容制御の研究 その1 レンジファインダを使用した着地位置修正”, 第29回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp.229-230, (1990)
- 12) 米田,大畑, “2足歩行ロボットの知能的歩容制御の研究 その2 ZMP計測による外乱に対応した能受動融合制御”, 第29回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp.231-232, (1990)
- 13) 広瀬,米田,荒井,井辺, “直動型4脚歩行機械TITAN VIの開発”, 第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.283-286, (1990)
- 14) 米田,広瀬, “4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究 その18 動的旋回歩容”, 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.901-902 (1991)
- 15) 米田,広瀬, “4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究 その19 力情報を用いた不整地歩行”, 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.903-904, (1991)
- 16) 米田,広瀬, “4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究 その20 不整地に対応した動的安定軌道生成”, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.573-574, (1992)
- 17) 米田,飯山,広瀬, “4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究 その21 力情報を用いた歩容制御”, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.575-578, (1992)

## 解説

- 1) 広瀬,米田, “光学式変位センサと力センサ” 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.7, pp.108-109, (1991)
- 2) 米田, “光応用センサとその活用”, 機械の研究, Vol.43, No.12, pp.1322-1330, (1991)
- 3) 米田, “光学式センサのロボットへの応用設計”, 機械設計, Vol.36, No.7, pp.111-121, (1992)