

電子科学研究科

GD

K

0002512622

R

44

静岡大学附属図書館

二足歩行ロボットの下位レベル適応歩行に関する研究

静岡大学図書

五十嵐 越郎

目 次

1章 序論	(1)
1-1 はじめに	(1)
1-2 二足歩行の基本的特徴	(2)
1-3 従来の研究及び本研究の目的	(3)
<参考文献>	(6)
2章 実験装置	(7)
2-1 はじめに	(7)
2-2 二足歩行ロボット	(7)
2-3 実験システム	(9)
<参考文献>	(10)
3章 二足歩行ロボットの単脚支持相における力学解析と制御	(11)
3-1 はじめに	(11)
3-2 二足歩行ロボットの単脚支持相における力学解析	(11)
3-2-1 単脚支持相における運動方程式	(11)
3-2-2 二足歩行ロボットの単脚支持相における力学的制約条件	(15)
3-2-3 シミュレーション	(16)
3-3 制御則	(17)
3-4 実験及び実験結果	(20)
3-5 おわりに	(20)
<参考文献>	(21)
4章 二足歩行ロボットの両脚支持相における力学解析と制御	(22)
4-1 はじめに	(22)
4-2 閉ループリンク系の力学解析	(23)
4-2-1 拘束条件	(24)
4-2-2 閉ループリンク系の運動方程式	(25)
4-2-2-1 慣性抵抗	(26)
4-2-2-2 静的力	(27)
4-2-3 ジョイント抗力	(29)

4-3	二足歩行ロボットの両脚支持相における力学解析	(30)
4-3-1	二足歩行ロボットの両脚支持相における力学的制約条件	(30)
4-3-2	二足歩行ロボットの両脚支持相における運動方程式	(31)
4-3-3	シミュレーション	(33)
4-4	制御則	(34)
4-5	実験及び実験結果	(34)
4-6	おわりに	(35)
	<参考文献>	(36)
5章	二足歩行ロボットの低位レベル適応歩行のための歩行パターン生成法	(37)
5-1	はじめに	(37)
5-2	二足歩行ロボットのモデル化	(38)
5-3	二足歩行ロボットの歩行パターン生成法(レベル3)	(38)
5-3-1	規準軌道	(39)
5-3-2	基本歩行パターン	(41)
5-3-2-1	平坦面に対する基本歩行パターン	(41)
5-3-2-2	配管環境に対する基本歩行パターン(跨ぎ動作)	(43)
5-3-2-3	段差(上)に対する基本歩行パターン	(46)
5-3-2-4	段差(下)に対する基本歩行パターン	(49)
5-3-3	歩行パターン生成法	(52)
5-3-4	力学的制約条件	(52)
5-4	歩行実験	(53)
5-5	おわりに	(54)
	<参考文献>	(70)
6章	結論	(71)
	謝辞	(72)

1 章 序論

1-1 はじめに

近年、生産現場における産業用ロボットの普及にはめざましいものがある。このような産業用ロボットの普及にともない、原子力発電施設や海底、宇宙等、人間が作業をするには危険な環境、いわゆる極限環境における作業を人間に代わって行うロボット（極限作業用ロボット）が現実的なものとして考えられるようになってきた。

産業用ロボットの場合、その作業環境が工場内の生産ラインなど固定された環境に限定されているため、作業機能（いわゆる手の機能）のみが重視され移動機能（足の機能）にはほとんど注意が向けられてこなかった。しかし、極限作業用ロボットの場合、産業用ロボットとは異なり様々な場所に移動して作業する必要が生じるため、作業機能だけでなく移動機能についても十分な考慮がなされなければならない。現在ではロボットに付加する移動機能についての研究も注目されるようになってきており、本論文もこのような移動機能に関する研究の一部である。

ロボットに付加する移動機能の代表的なものとしては車輪式移動と脚式移動があげられる。これらは各々に長所を有しているが、環境適応性という点を重視した場合、跨ぎ動作等が行える脚式移動の方が有利であると考えられる。一口に脚式移動といっても脚の本数により種々の形式が存在し、一般に脚数が二本の二足歩行と、四本以上の多足歩行に分類されている。そこで、二足歩行と多足歩行の歩行性能に関する比較をTable 1-1¹⁾にまとめてみた。この表で示すように、安定性及び積載重量に関しては脚数の多い多足歩行の方が有利であると考えられ、エネルギー効率や機構の簡易性、或は歩行パターンの記述性の点では脚数の少ない二足歩行が優れていると考えられる。すなわち、二足歩行、多足歩行とも各々に長所短所があり絶対的に優れたある種の脚式移動の存在を仮定することは現実的ではないと思われる。このことは、自然界における脚式移動が一つの形式に統一されているのではなく、その環境に応じて種々の脚式移動が存在して

Table 1-1 Comparison between a biped locomotion and a multi-legged locomotion on walking efficiency

	Walking Stability	Carrying Capacity	Energy Efficiency	Mechanism Simplicity or Walk-pattern Description
Multi-legged Locomotion	○	○		
Biped Locomotion			○	○

いることから類推できる。

本研究では、様々な脚式移動の中から一つの形式を選択するため、ロボットの作業環境を原子力発電施設や工場などの屋内環境に想定した。このような環境は人間が移動し易いように整備されており、この点で二足歩行が有利であると考えられる。そこで、本論文では脚式移動として二足歩行を取り上げ、その研究を行っている。

1 - 2 二足歩行の基本的特徴^{2) - 5)}

本論にはいる前に、二足歩行の基本的特徴を力学的側面と制御的側面とから考えてみる。

まず力学的側面であるが、第一の特徴としては、静歩行と動歩行という概念があげられる。これらは二足歩行ロボットの歩行形態を表しており、次のように定義されている。

< 静歩行 >

歩行期間中、常に静的釣合を保ちながら歩行を行う歩行形態。歩行速度は非常に遅くなる。この場合、慣性力などの動的力はいっさい無視し静的力のみを考慮している。また、系の重心を歩行面に投影した点は常に支持脚足部裏面に存在している。

< 動歩行 >

重力や慣性力を利用して歩行を行う歩行形態。人間が一般に行っている歩行であり、静歩行より速い歩行が可能になる。この場合、常に静的釣合を保つ必要はないが慣性力などの動的力を考慮しなければならない。

従って、力学解析を行う際、いずれの歩行形態をとるかは非常に重要な問題となる。

第二の特徴として、二足歩行による歩行運動は、遊脚を振り出すことにより歩を進める単脚支持相と、蹴り動作を行い重心を進行方向に送り出し支持脚切り換えの準備を行う両脚支持相の、2つの相の繰り返しにより構成されているということがあげられる。ここで、単脚支持相はリンク列のエンドポイントが完全に自由である開ループリンク系でモデル化され、両脚支持相はその開ループリンク系のエンドポイントに幾何学的拘束条件が付加された閉ループリンク系でモデル化される。従って、両相に対する運動方程式の導出や力学解析は各々に対して個別に行う必要がある。

更に第三の特徴としては、二足歩行ロボットの足部が床面に固定されておらず、その自重と摩擦力によってのみ支持されていることから生じる力学的制約条件があげられる。この制約条件は、任意の歩行パターンに対する歩行実現性を判定する際に、非常に重要

な役割を果たしている。

次に制御的特徴について述べていく。人間が実際に行う歩行を考えた場合、様々な環境の変化に適応しながら歩行を行っていることがわかる（本論文では、このような歩行を適応歩行と呼んでいる）。適応歩行の制御アルゴリズムは階層構造をなしていることがよく知られており、Fig.1-1はそれをモデル化したものである。この図に示されているような階層構造が二足歩行の制御的特徴であり、以下、簡単にその説明を行う。

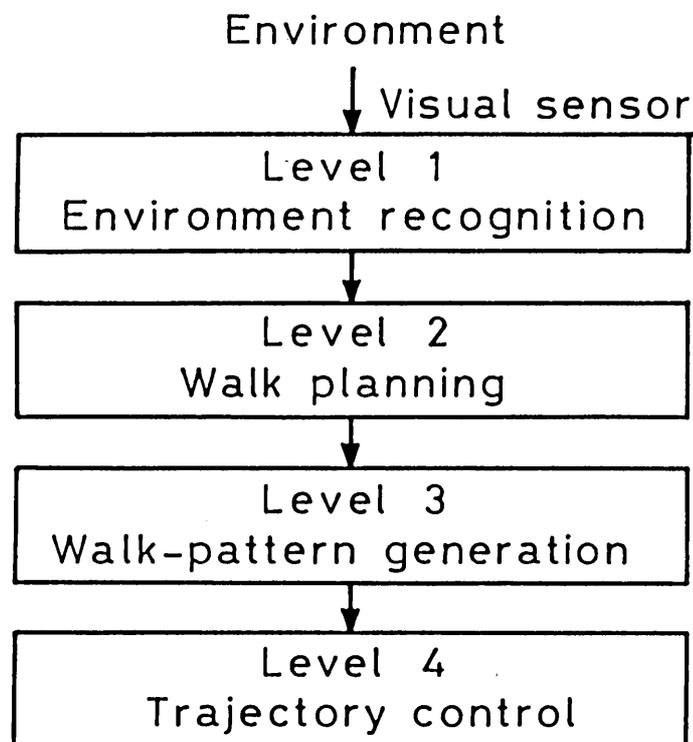


Fig.1-1 Hierarchical structure in an adaptive walking

まずレベル1において、視覚により外界がいかなる環境であるのかを認識し（環境

認識）、レベル2では、その認識結果と意志（歩行目的）に基づき、どのような歩行を行うかを決定する（歩行計画）。例えば、歩幅や歩速の決定や、先方に段差が存在する場合、その段差を越えて行くのか避けて通るのかという決定等を行っている。次にレベル3では、レベル2で立てた歩行計画に基づいて歩行パターンを生成し（歩行パターンの生成）、最後に生成した歩行パターンを実現するため、レベル4において各ジョイントの軌道制御（ジョイントの軌道制御）を行っている。本論文では、レベル3、レベル4のみで構成される歩行を、特に下位レベル適応歩行と呼ぶことにする。

以上が二足歩行の基本的な特徴であり、これらの特徴を考慮して二足歩行ロボットの研究を進めて行く。

1-3 従来の研究及び本研究の目的

我が国における二足歩行ロボットの研究は、加藤らの3次元静歩行に関する研究を先駆けに、その後、様々な研究室で行われるようになっており、最近では3次元動歩行や適応歩行といったテーマに研究の関心が向けられてきている。高西、加藤らはZMP規範により歩行パターンを設定し、単脚支持相では位置制御を基本としたプログラム制御、両脚支持相（高西、加藤らは立脚切替相と呼んでいる）では足首のトルク及び機械的イ

ンヒ°ーダンスを可変にするシーケンス制御を行い、動歩行による3次元の下位レベル適応歩行の歩行実験を行っている。有本、宮崎⁴⁾らは特異摂動法により、支持脚足部の足首トルクだけを入力とする倒立振子によって表される低次モデルで二足歩行ロボットを近似し、この低次モデルをもとに歩行パターンの検討を行い、3次元動歩行を実現している。更に、川村、宮崎、有本¹⁰⁾らは上記の制御法に対して、彼らの提案した試行の繰り返しによる学習制御を導入し歩行実験を行っている。古荘⁵⁾は局所フィードバックから得られる支配モードを用いて、支持脚足首にトルクを作用させない低次モデルで二足歩行ロボットを近似し、この低次モデルをもとに歩行の安定性に関する検討を行い、歩行実験を行っている。また、古荘、山田¹¹⁾らは両脚支持相において蹴り動作が行われた場合の歩行の安定性を角運動量に着目して考察している。下山、三浦^{2), 12)-14)}らは角運動量保存則から導出した支持脚交換期における運動方程式の接続条件と歩行解析の結果を用いて歩行パターンを設定し、その歩行パターンに対する安定化制御法を支持脚の倒立振子運動モードを利用して導出することにより動歩行を実現している。

ところで、二足歩行運動の際に現れる両脚支持相は拘束条件付力学系を構成しており、このような力学系の解析法に対しても様々な研究が行われている。Hemami¹⁵⁾らはラグランジュ乗数を用いて拘束条件付力学系を記述し、その際に生じる冗長な部分に対して次元縮小を行い、縮小した空間内で可制御性などの考察を行っている。また、成清^{16), 17)}らは次元縮小化系の基底を指定することによる単純化した次元縮小化系の導出法を示し、これをもとに両脚支持相における二足歩行ロボットの安定化制御アルゴリズムを与えた。一方、美多¹⁸⁾らは外乱局所化理論を適用することにより、ラグランジュの未定乗数法の意義と限界を示し、更に拘束条件付力学系に対するレギュレータの設計法について述べている。

以上が現在までの二足歩行ロボットの研究に関する主な成果であるが、人間のように視覚を用い、様々な環境の変化に適応しながら動歩行を行う歩行ロボットはまだ実現されておらず、各研究室ともそのような二足歩行ロボットの実現を最終目標に研究を行っている。

本論文は、二足歩行ロボットを用いて前述のような適応歩行を行わせるための第一段階として、動歩行による下位レベル適応歩行を実現することを目的にしており、次の点で従来の研究とは異なっている。

- (1) 歩行パターンの実現可能性を、二足歩行ロボットの足部が床面に固定されていないために生じる力学的制約条件により判定する。また、歩行パターン生成法

(レベル3)としては、種々の歩行パターンを簡単に生成するための簡易化した歩行パターン生成法を提案する。²⁰⁾

(2) 拘束条件付力学系である両脚支持相に対しては、系に付加される力学的制約条件との関係より、ダランベールの原理に基づき静的力と動的力をそれぞれ独立に計算し、かつ静的力は各リンクに対する静的平衡の式より求めて力学解析を行う方法を提案する。¹⁹⁾

(3) 力学的制約条件とジョイントの軌道制御法(レベル4)との間の関係をより明白にするため、動的制御を用いて各ジョイントの軌道制御を行う。

すなわち、本論文では足部が床面に固定されていないために生じる二足歩行ロボット特有の力学的制約条件を、下位レベル適応歩行の問題の中心におくことにより、その問題を統一的に扱おうとする立場を取っている。このような立場は、適応歩行の実現を考えた場合、前述のように歩行パターンの生成法を簡易化することができるため、従来の研究に比較して有利であると思われる。但し、問題を単純化するため、二足歩行運動の主要な部分が矢状面(進行方向を含む床に垂直な平面)内で行われていることに着目し、歩行運動を矢状面内の運動のみに限定して考察を進めていくことにする。

以上の考え方に基づいて二足歩行ロボットを用いた動歩行による下位レベル適応歩行問題を論じるため、まず本研究で使用した二足歩行ロボットと実験システムに関する説明を2章で行い、3章、4章において単脚支持相及び両脚支持相の力学解析と制御法に関する考察を行う。そして、5章で歩行パターンの生成法について述べ、最後に本論文で得られた結論を6章としてまとめる。

< 参 考 文 献 >

- 1) 広瀬, "歩行機械システムの機構と制御", コンピュートロール, No.9, p.99~107, コロナ社, 1985.
- 2) 三浦, 下山, "二足歩行ロボットの機構と制御", コンピュートロール, No.9, p.90~98, コロナ社, 1985.
- 3) 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, 第1巻, 第3号, pp.196~203, 1983.
- 4) 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, 第1巻, 第3号, pp.167~175, 1983.
- 5) 古荘, "動的二足歩行ロボットの制御", 日本ロボット学会誌, 第1巻, 第3号, pp.182~190, 1983.
- 6) I.Kato, et al., "The Hydraulically Powered Biped Walking Machine with High Carrying Capacity", Proc. of 4th ETAN Symp, 1972.
- 7) 加藤, 他, "二足歩行ロボット(WABOT-1)の開発", バイオメカニズム2, p.173, 1973.
- 8) 高西, 加藤, 他, "二足歩行ロボットによる動歩行の実現", 日本ロボット学会誌, 第3巻, 第4号, pp.325~336, 1985.
- 9) 高西, 加藤, 他, "環境適応力を持つ二足歩行ロボットの研究-斜面、階段における歩行の実現-", 第4回日本ロボット学会学術講演会予稿集, p.215~218, 1986.
- 10) 川村, 宮崎, 有本, 他, "運動パターン学習による二足歩行ロボットの歩行実現", 日本ロボット学会誌, 第3巻, 第3号, pp.177~187, 1985.
- 11) 古荘, 山田, "角運動量を考慮した二足歩行ロボットの動的制御-両脚支持相に蹴りを行う歩行", 計測自動制御学会論文集, 第22巻, 第4号, pp.451~458, 1986.
- 12) 下山, "竹馬型二足歩行ロボットの動的制御", 日本機械学会論文集C, 第48巻, 第433号, pp.1445~1455, 1982.
- 13) 下山, 三浦, 光石, "二足歩行ロボットBIPER-4の動歩行に関する研究", 日本機械学会論文集C, 第49巻, 第444号, pp.1372~1381, 1983.
- 14) 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, 第1巻, 第3号, pp.176~181, 1983.
- 15) H.Hemami, B.F.Wyman, "Modeling and Control of Constrained Dynamic Systems with Application to Biped Locomotion in Frontal plane", IEEE, Trans. Automatic Control, AC-24, No.4, pp.526~535, 1979.
- 16) 成清, 小林, 伊藤, 細江, "両脚支持状態における二足歩行機械の制御", 電気学会システム制御研究会, No.SC-83-13, 1983.
- 17) 伊藤, 成清, "拘束のある二足歩行運動の解析と制御", 日本ロボット学会誌, 第1巻, 第3号, pp.191~195, 1983.
- 18) 美多, 柏瀬, 坂中, "線形化拘束条件付き運動のフィードバック制御(完全力学系の制御)", 電気学会論文誌C, 第103巻, 第1号, pp.17~24, 1983.
- 19) 五十嵐, 野飼, "二足歩行運動における両脚支持状態の力学解析と制御", 第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集, p.583~584, 1987.
- 20) 五十嵐, 野飼, "逆力学問題を用いた二足歩行ロボットにおける2次元動歩行の制御", 第4回知能移動ロボットシンポジウム講演論文集, p.9~14, 1988.

2章 実験装置

2-1 はじめに

3章以降における実験は全て同一の実験装置を用いて行っているため、本章では本研究において使用した二足歩行ロボットと実験システムに関する説明を行うことにする。本研究で用いた二足歩行ロボットは全長0.665m、全質量12.33kgであり、従来の研究¹⁾⁻⁶⁾で用いられているものに比べて比較的軽量の部類に入る。また、コントローラとしてはパーソナルコンピュータを使用しており、簡単に実験システムを構成することができる。

2-2 二足歩行ロボット

本研究で用いた歩行ロボットは左右大腿部、左右けい部、左右足部の6要素からなるものとし、Fig.2-1にその自由度構成及び各リンクの名称を示す。ここで、1-3で述べたように歩行運動を矢状面内（進行方向を含む床に垂直な平面）に限定するため、二足歩行ロボットの各ジョイントに対してはピッチ軸回りに一自由度のみを与えることにした。Fig.2-2、3はFig.2-1の自由度構成に基づいて製作した歩行ロボットの写真及び全体図を示しており、各リンクの物理量はTable 2-1に示す。

Fig.2-3に示すように、二足歩行ロボットの各ジョイント部にはハーモニックドライブ付DCサーボモータ（ハーモニックドライブシステムズ製RH-14-3402）

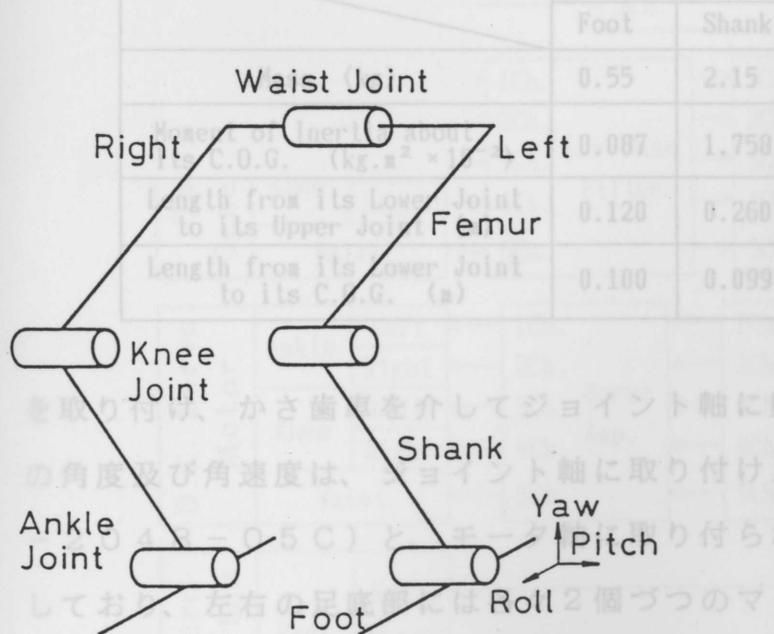


Fig.2-1 Construction of a biped locomotion robot

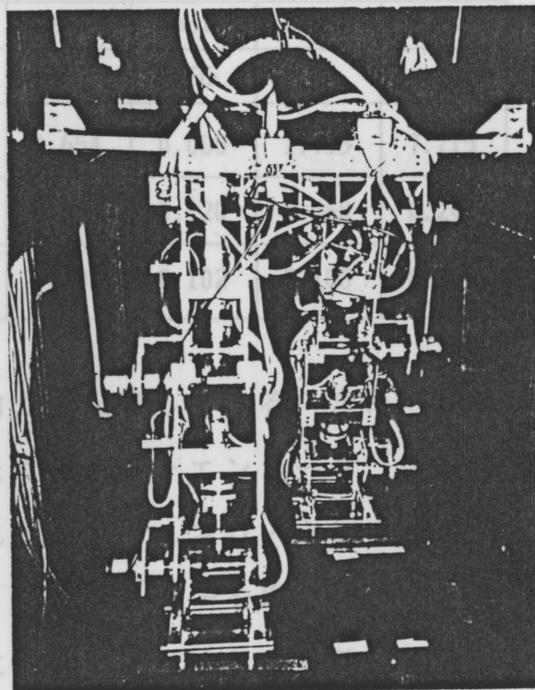


Fig.2-2 Photograph of a biped locomotion robot

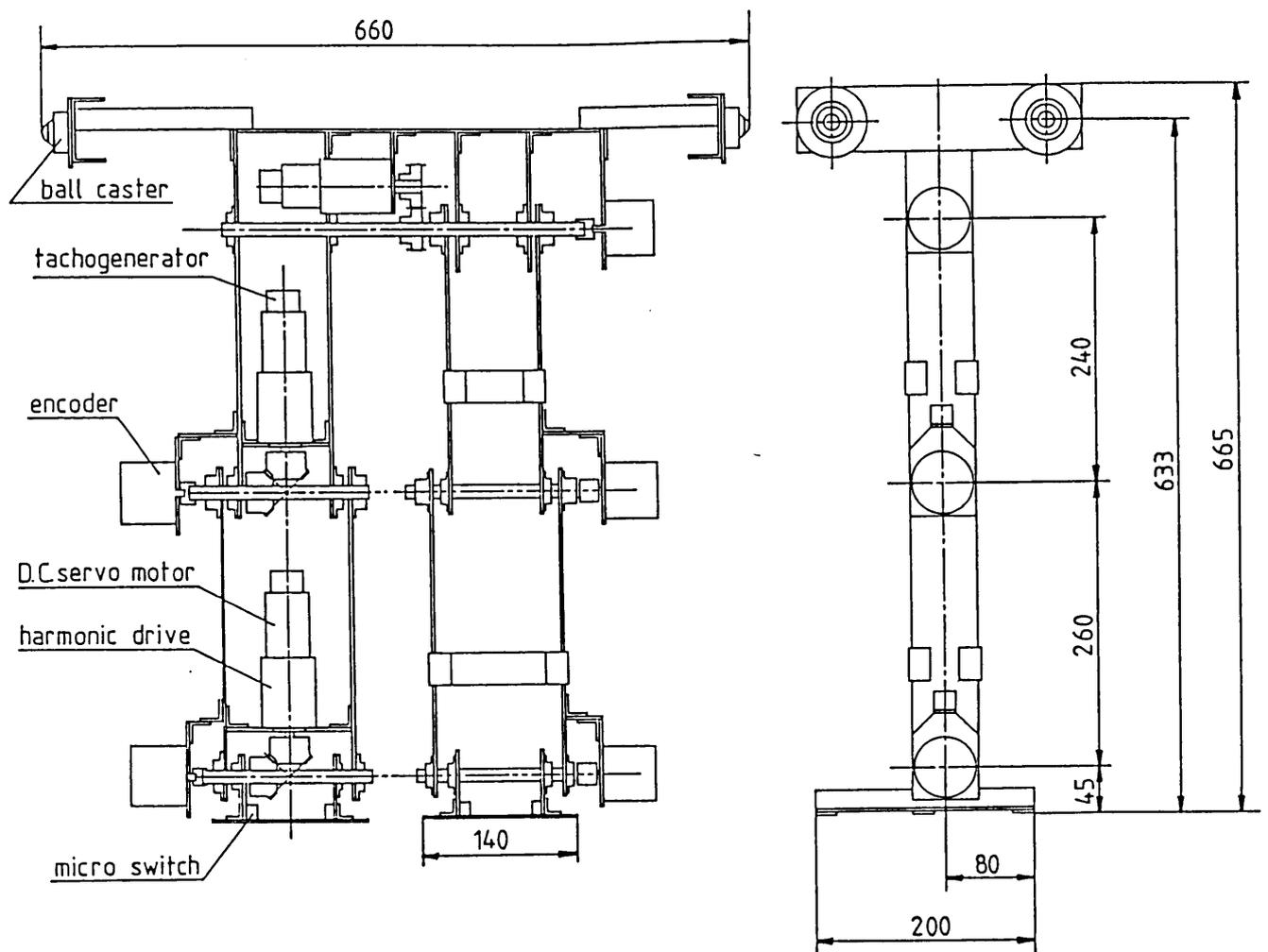


Fig.2-3 A biped locomotion robot used in experiment

Table 2-1 Physical parameters of a biped locomotion robot in Fig. 2-3

	Left			Right		
	Foot	Shank	Femur	Foot	Shank	Femur
Mass (kg)	0.55	2.15	2.19	0.56	2.14	4.74
Moment of Inertia about its C.O.G. ($\text{kg} \cdot \text{m}^2 \times 10^{-2}$)	0.087	1.758	1.654	0.088	1.753	7.715
Length from its Lower Joint to its Upper Joint (m)	0.120	0.260	0.240	0.120	0.260	0.240
Length from its Lower Joint to its C.O.G. (m)	0.100	0.099	0.108	0.102	0.108	0.203

を取り付け、かさ歯車を介してジョイント軸に動力を伝達している。また、ジョイントの角度及び角速度は、ジョイント軸に取り付けたロータリーエンコーダ（IHI製RS-2048-05C）と、モータ軸に取り付けられたタコジェネレータによって各々測定しており、左右の足底部には各々2個ずつのマイクロスイッチを取り付け、接地センサとして用いている。一方、歩行運動を矢状面内に拘束するため、歩行路に沿って左右に板（ジュラルミン製、板厚3mm）を張りガイドとしている。その際、ガイドと歩行口

ロボットが接触した時の摩擦力を軽減するため、Fig. 2 - 3 に示すように歩行ロボットの左右に各々 2 個ずつボールキャスタを取り付けている。また、歩行ロボットと床面の間の滑りを防止するため、床面にはゴムマットを敷き、足底部にはスパイク状の突起として数個のナットを取り付けている。

2 - 3 実験システム

実験システムの概略図をFig. 2 - 4 に示す。コントローラには数値演算プロセッサ (NDP) 8087 を装着した NEC 製パーソナルコンピュータ PC9801 をシステムクロック 8MHz で使用している。角度データは、ロータリエンコーダからの信号をカウンタ回路を通して 16 ビットバイナリデータ ($4.395 \times 10^{-2} \text{deg/bit}$) としてコントローラに取り込む。角速度データは、タコジェネレータからの信号をローパスフィルタにより高周波ノイズを除去して A/D コンバータに送り、12 ビットバイナリデータ ($2.197 \times 10^{-2} \text{deg/s.bit}$) に変換してコントローラに入力する。また、左右の足底部に各々 2 個ずつ取り付けられたマイクロスイッチは OR 回路で接続され、いずれかのマイクロスイッチが ON になっていれば、足部が完全接地状態にあるとみなす。従

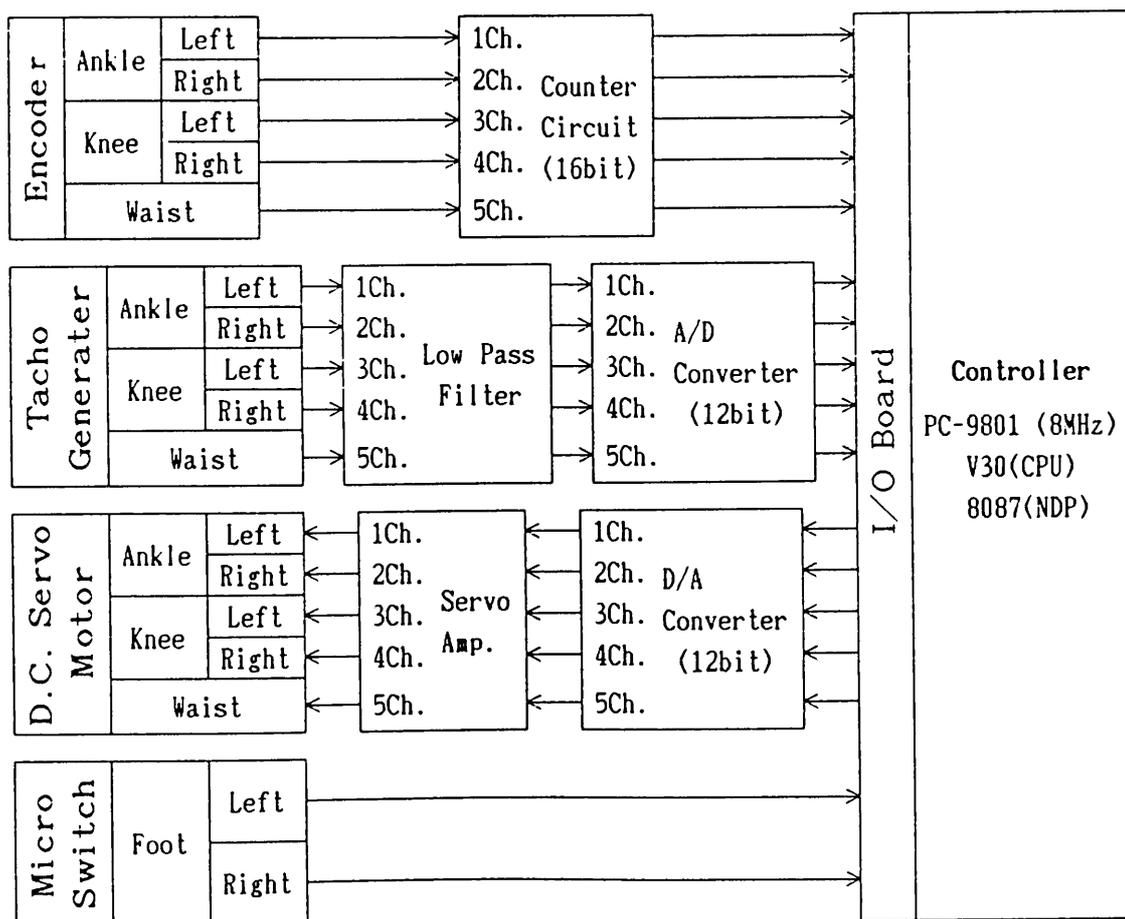


Fig.2-4 Experimental system

って、この信号は現在、左右いずれの脚が支持脚になっているかを知るために用いられ、更に単脚支持相から両脚支持相へ制御を切り換えるための割り込み信号としても利用される。一方、コントローラからの出力は12ビットD/Aコンバータを通しサーボアンプ(サーボランド社製SMB-L6-A)に入力される。このサーボアンプは電流制御系を構成しており、コントローラからの指令値に応じた電流を出力しDCサーボモータのトルクを直接制御している。

< 参 考 文 献 >

- 1) 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, 第1巻, 第3号, pp.196~203, 1983.
- 2) 高西, 加藤, 他, "二足歩行ロボットによる動歩行の実現", 日本ロボット学会誌, 第3巻, 第4号, pp.325~336, 1985.
- 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, 第1巻, 第3号, pp.167~175, 1983.
- 4) 古荘, "動的二足歩行ロボットの制御", 日本ロボット学会誌, 第1巻, 第3号, pp.182~190, 1983.
- 5) 三浦, 下山, "二足歩行ロボットの機構と制御", コンピュートロール, No.9, p.99~107, コロナ社, 1985.
- 6) 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, 第1巻, 第3号, pp.176~181, 1983.

3章 二足歩行ロボットの単脚支持相における力学解析と制御

3-1 はじめに

二足歩行運動は、遊脚を振り出すことにより歩を進める単脚支持相と、蹴り動作を行い重心を進行方向に送り出す両脚支持相の、2つの相の繰り返しの繰り返しにより構成されている。本章では、両相のうち単脚支持相における力学解析と制御について述べていく。但し、1-3で述べたように本論文では歩行運動を矢状面内に限定するため、力学解析は全て2次元平面内で行っていく。

そこで、二足歩行ロボットの単脚支持相における力学解析を行うため、初めに単脚支持相における運動方程式をラグランジュの運動方程式より誘導し、次に単脚支持相における二足歩行ロボット特有の力学的制約条件を導出する。そして、歩行パターンを与え単脚支持相における力学解析を行うことにより、歩行パターンと力学的制約条件との関係を確認する。また、二足歩行ロボットの各ジョイントに対する制御法として動的制御を用いる方法を提案し、実際に制御実験を行うことにより、その有効性を示す。

3-2 二足歩行ロボットの単脚支持相における力学解析

3-2-1 単脚支持相における運動方程式

二足歩行ロボットの単脚支持相はエンドポイントが拘束を受けない開ループリンク系

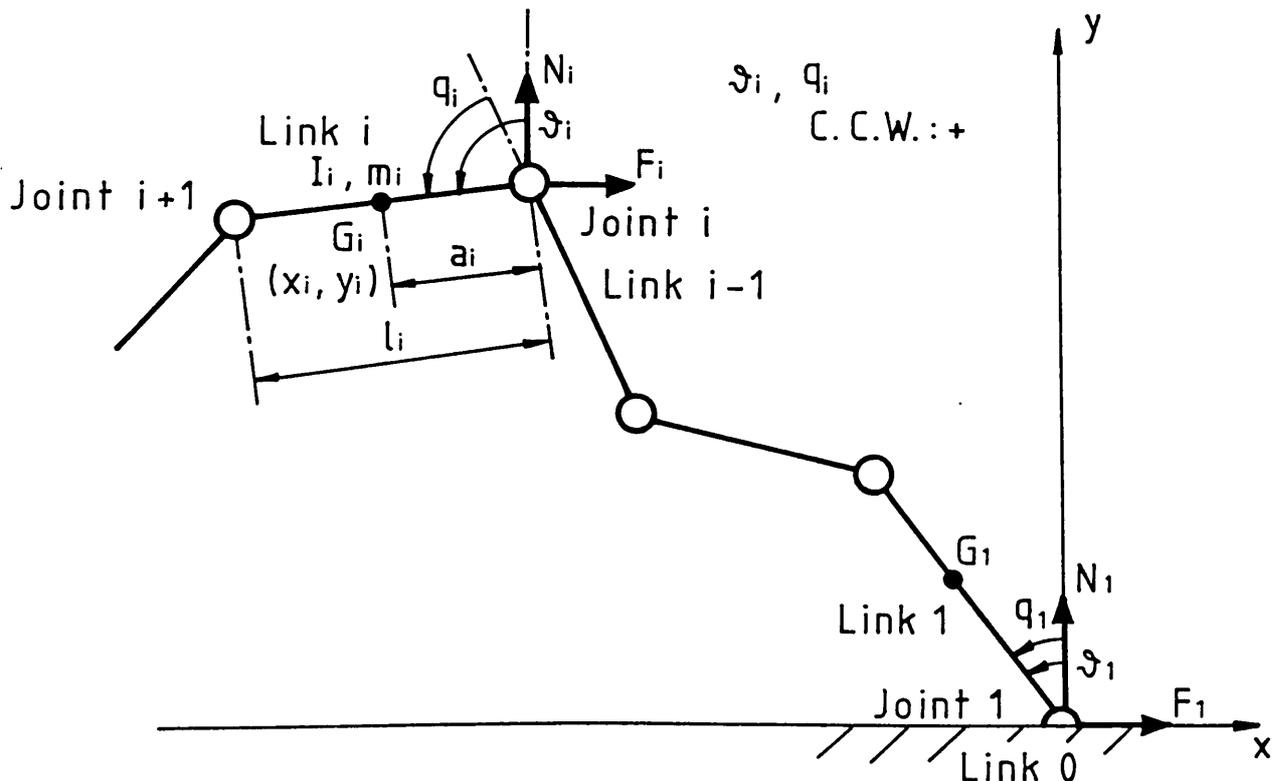


Fig.3-1 Open loop linkage with rotational joints

であると考えられるため、まずFig. 3 - 1のように各自由度が回転の自由度をもつ一般的な2次元開ループ n リンク系について考えていく。ここで、Fig. 3 - 1における各リンクのパラメータは次のように定義する。

θ_i : リンク i が鉛直軸と成す角 (絶対角)

q_i : リンク i がリンク $i - 1$ と成す角 (相対角)

τ_i : θ_i に対する一般化力

u_i : q_i に対する一般化力

N_i : リンク $i - 1$ がリンク i に作用する抗力の垂直成分

F_i : リンク $i - 1$ がリンク i に作用する抗力の水平成分

G_i : リンク i の重心 (x_i, y_i)

l_i : リンク i の全長

a_i : ジョイント i からリンク i の重心までの距離

m_i : リンク i の質量

I_i : リンク i の重心回りの慣性モーメント

但し、 θ_i 、 q_i は反時計回りを正とし、 N_i 、 F_i は正の方向を仮定しておく。

Fig. 3 - 1 において、絶対角と相対角及びそれらの一般化力の間には次のような関係が成り立っている。

$$\mathbf{q} = \mathbf{M} \boldsymbol{\theta} \quad (3-1) \quad , \quad \mathbf{u} = \mathbf{M}^T \boldsymbol{\tau} \quad (3-2)$$

$$\mathbf{q} = [q_1 \dots q_n]^T \quad , \quad \boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \dots \theta_n]^T$$

$$\mathbf{u} = [u_1 \dots u_n]^T \quad , \quad \boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \dots \tau_n]^T$$

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1 & & & & & \\ -1 & 1 & & & & 0 \\ & -1 & 1 & & & \\ & & & \ddots & & \\ 0 & & & & \ddots & \\ & & & & & -1 & 1 \end{pmatrix} \quad (n \times n)$$

一方、各リンクの重心 $G_i (x_i, y_i)$ はFig. 3 - 1より次のように表され、

$$x_i = \sum_{k=1}^{i-1} l_k \sin \theta_k + a_i \sin \theta_i \quad (3-3)$$

$$y_i = \sum_{k=1}^{i-1} l_k \cos \theta_k + a_i \cos \theta_i \quad (3-4)$$

その速度、加速度は

$$\dot{x}_i = \sum_{k=1}^{i-1} l_k \dot{\theta}_k \cos \theta_k + a_i \dot{\theta}_i \cos \theta_i \quad (3-5)$$

$$\dot{y}_i = - \sum_{k=1}^{i-1} l_k \dot{\theta}_k \sin \theta_k - a_i \dot{\theta}_i \sin \theta_i \quad (3-6)$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}_i = \sum_{k=1}^{i-1} (l_k \ddot{\theta}_k \cos \theta_k - l_k \dot{\theta}_k^2 \sin \theta_k) \\ + a_i \ddot{\theta}_i \cos \theta_i - a_i \dot{\theta}_i^2 \sin \theta_i \end{aligned} \quad (3-7)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}_i = \sum_{k=1}^{i-1} (-l_k \ddot{\theta}_k \sin \theta_k - l_k \dot{\theta}_k^2 \cos \theta_k) \\ - a_i \ddot{\theta}_i \sin \theta_i - a_i \dot{\theta}_i^2 \cos \theta_i \end{aligned} \quad (3-8)$$

で表される。

本論文では、ラグランジュの運動方程式

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_K}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial E_K}{\partial \theta} + \frac{\partial E_P}{\partial \theta} = \tau \quad (3-9)$$

E_K : 運動エネルギー

E_P : ポテンシャルエネルギー

を用いて、2次元開ループnリンク系の運動方程式を求めることにする。Fig. 3-1より、 E_K 、 E_P は

$$E_K = \sum_{i=1}^n \{ I_i \dot{\theta}_i^2 + m_i (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2) \} / 2 \quad (3-10)$$

$$E_P = \sum_{i=1}^n m_i y_i g \quad (3-11)$$

g : 重力加速度

で表される。そこで、これらの式に式(3-4)~(3-6)を代入し、行列表現に改めると、 E_K 、 E_P は次のようになる。

$$E_K = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T J(\theta) \dot{\theta} \quad (3-12)$$

$$\left. \begin{aligned} J(\theta) &= [L_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \\ L_{ii} &= I_i + m_i a_i^2 + l_i^2 \sum_{k=i+1}^n m_k \\ L_{ij} &= L_{ji} = l_i m_j a_i + l_i l_j \sum_{k=i+1}^n m_k \end{aligned} \right\} \quad (3-13)$$

($1 \leq i < j \leq n$)

$$E_p = G^T \cos \theta \quad (3-14)$$

$$G^T = [m_1 \dots m_n] \left[\begin{array}{cccc} a_1 & & & \\ l_1 a_2 & & 0 & \\ \cdot & l_2 & \cdot & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ l_1 l_2 \cdot \cdot l_{n-1} a_n \end{array} \right] \quad (3-15)$$

$$= [G_1 \dots G_n]$$

$$\cos \theta = [\cos \theta_1 \dots \cos \theta_n]^T$$

従って、式(3-12)、(3-14)をラグランジュの運動方程式(3-9)に代入すれば、Fig. 3-1で示される開ループnリンク系の運動方程式は

$$J(\theta) \ddot{\theta} + X(\theta) \dot{\theta}^2 + Z(\theta) = \tau \quad (3-16)$$

$$X(\theta) = [L_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (1 \leq i, j \leq n)$$

$$\dot{\theta}^2 = [\dot{\theta}_1^2 \dots \dot{\theta}_n^2]^T$$

$$Z(\theta) = -[G_1 \sin \theta_1 \dots G_n \sin \theta_n]^T \quad (3-17)$$

で表される。また、式(3-1)、(3-2)を用いて相対角で書き直せば

$$J(\alpha) \ddot{\alpha} + C(\alpha, \dot{\alpha}) + Z(\alpha) = u \quad (3-18)$$

$$J(\alpha) = (M^T)^{-1} J(M^{-1}\alpha) M^{-1} = [J_{ij}] \quad (1 \leq i, j \leq n)$$

$$C(\alpha, \dot{\alpha}) = (M^T)^{-1} X(M^{-1}\alpha) (M^{-1}\dot{\alpha})^2 = [c_1 \dots c_n]^T$$

$$Z(\alpha) = (M^T)^{-1} Z(M^{-1}\alpha) = [z_1 \dots z_n]^T \quad (3-19)$$

となる。

次に、2次元開ループリンク系の各ジョイントに作用する抗力(N_i, F_i)を求めていく。Fig. 3-1に示される開ループリンク系の各リンクに対しては、

$$N_i - N_{i+1} - m_i g = m_i \ddot{y}_i \quad (3-20)$$

$$F_i - F_{i+1} = m_i \ddot{x}_i \quad (1 \leq i \leq n) \quad (3-21)$$

で表される並進方向の運動方程式が成立する。但し、開ループリンク系であるので

$$N_{n+1} = F_{n+1} = 0 \quad (3-22)$$

となる。従って、式 (3-20) ~

(3-22) より各ジョイントに作用する抗力は

$$N_i = \sum_{k=i}^n (m_k g + m_k \ddot{y}_k) \quad (3-23)$$

$$F_i = \sum_{k=i}^n m_k \ddot{x}_k \quad (3-24) \quad (1 \leq i \leq n)$$

より求められる。

以上の解析をもとに、二足歩行ロボットの単脚支持相における力学解析を行うことにする。二足歩行ロボットの単脚支持相は、Fig. 3-2 に示すような開ループ6リンク系 (リンク0~リンク5) でモデル化することが

できる。この図においてリンク6は床面を表しており、 w_1 は足首からかかと迄の距離、 w_2 は足首からつま先迄の距離を表している。

ここで、単脚支持相において支持脚足首 (ジョイント1) のトルク (u_1) を姿勢制御に対し有効に作用させるため、次の仮定をおく。

< 仮定 >

『支持脚足部 (リンク0) は床面 (リンク6) に対して常に全面接地している。』
 従って、Fig. 3-2 において実際に運動を行う部分はリンク1~リンク5となり、単脚支持相の運動方程式及びジョイント抗力は式 (3-18)、(3-23)、(3-24) において $n = 5$ とおくことより得られる。

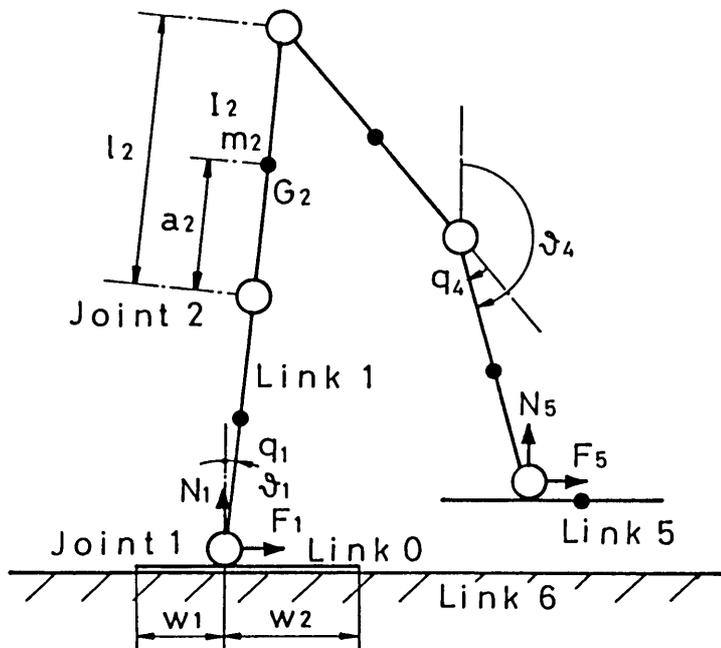


Fig.3-2 Model of biped locomotion robot in the single leg supporting phase

3-2-2 二足歩行ロボットの単脚支持相における力学的制約条件²⁾

二足歩行ロボットの場合、その性質上、足部が床面に固定されておらず自重と摩擦力によつてのみ保持されているだけであるため、単脚支持相において安定な歩行を行うには次に示す力学的制約条件を満足している必要がある。

(1) 支持脚足部がかかともしくはつま先回りに回転しない。

$$-N_1 w_1 < u_1 < N_1 w_2 \quad (3-25)$$

(2) 支持脚足部が床面から離れない。

$$N_1 > 0 \quad (3-26)$$

(3) 支持脚足部が床面上を滑らない。

$$|F_1 / N_1| < \mu_{max} \quad (3-27)$$

μ_{max} : 足部と床面との間の最大静止摩擦係数

3-2-3 シミュレーション

3-2-1 及び 3-2-2 で、二足歩行ロボットの単脚支持相における運動方程式、ジョイント抗力、力学的制約条件が得られたので、歩行パターンを与えシミュレーションを行うことにより、歩行運動と力学的制約条件との間の関係を調べていく。

Fig. 3-3 は単脚支持相における二足歩行ロボットの歩行パターンを示しており、各ジョイントの目標軌道は次のように設定する。但し、歩行パターンに関しては 5 章で詳しく述べる。

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= \begin{cases} 0 & (0 \leq t \leq t_1) \\ q_1^I + (q_1^E - q_1^I) \alpha_1 (t - t_1)^3 & (t_1 \leq t \leq t_3) \end{cases} \\ q_2 &= 0 & (0 \leq t \leq t_3) \\ q_3 &= q_3^I + (q_3^E - q_3^I) \{1 - \exp(-\alpha_3 t^3)\} & (0 \leq t \leq t_3) \\ q_4 &= \begin{cases} q_4^{I1} + (q_4^{E1} - q_4^{I1}) \{1 - \exp(-\alpha_{4a} t^3)\} & (0 \leq t \leq t_1) \\ q_4^{I2} + (q_4^{E2} - q_4^{I2}) \{1 - \exp(-\alpha_{4b} (t - t_1)^3)\} & (t_1 \leq t \leq t_3) \end{cases} \\ q_5 &= -(90^\circ + q_1 + q_2 + q_3 + q_4) & (0 \leq t \leq t_3) \end{aligned} \right\} \quad (3-28)$$

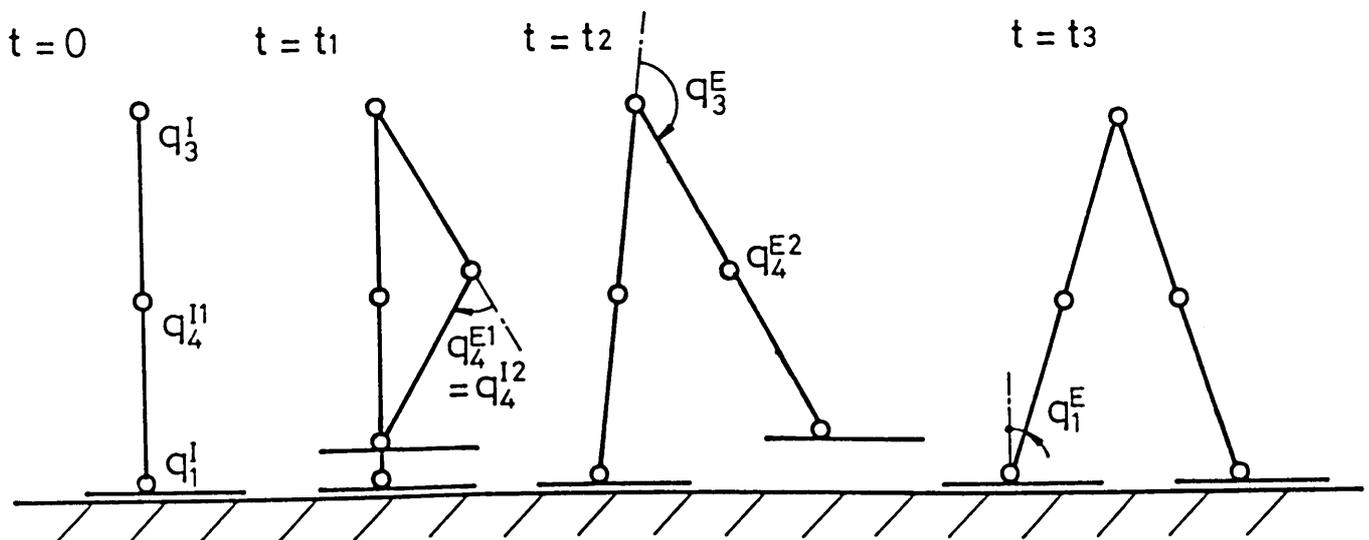


Fig.3-3 Walk-pattern in the single leg supporting phase

そこで、これらの目標軌道のパラメータを

$$\left. \begin{aligned} q_{1}^{I} &= 0^{\circ} & , & & q_{1}^{E} &= 17.5^{\circ} \\ q_{3}^{I} &= -180^{\circ} & , & & q_{3}^{E} &= -155^{\circ} \\ q_{4}^{I1} &= 0^{\circ} & , & & q_{4}^{E1} &= 50^{\circ} \\ q_{4}^{I2} &= 50^{\circ} & , & & q_{4}^{E2} &= 0^{\circ} \\ \alpha_{1} &= 14 & , & & \alpha_{3} &= 45 \\ \alpha_{4a} &= 200 & , & & \alpha_{4b} &= 200 \end{aligned} \right\} \quad (3-29)$$

とおき、式(3-18)、(3-23)、(3-24)、(但し $n=5$ とする)に代入し、シミュレーションを行った結果を Fig.3-4、5 に示す。Fig.3-4 より N_1 は常に 0 以上であり、 $|F_1/N_1|$ の最大値は 0.3 程度 (摩擦角 $\approx 17^{\circ}$) になっていることがわかる。また、Fig.3-5 より u_1 は $-N_1w_1$ と N_1w_2 を越えないことがわかる。故に、式(3-28)、(3-29)によって設定した歩行パターンは、前節で述べた力学的制約条件を満足しており、安定な歩行が可能であると考えられる。ここで、本シミュレーションにおける各リンクの物理パラメータは、Table 2-1 において支持脚を左脚とすることにより得られた値を用いている。

3-3 制御則

本論文では、Fig.3-6 に示すような動的制御を用いて各ジョイントの軌道制御を行っていく。すなわち、単脚支持相の運動方程式 (3-18) に対し設定した目標軌道及

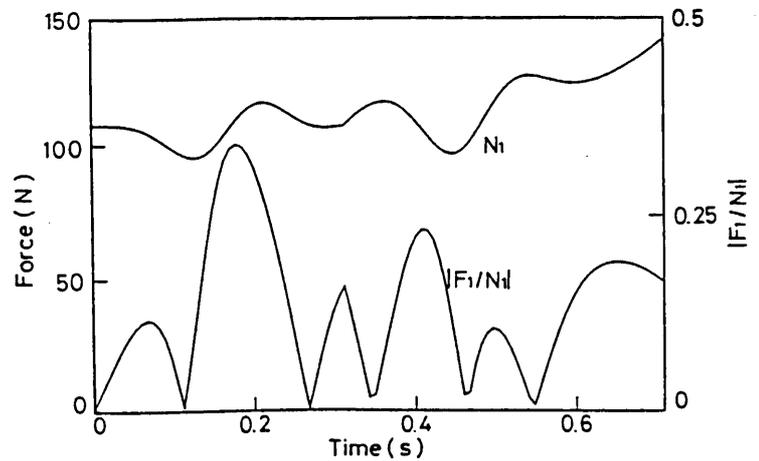


Fig.3-4 Results of simulation on N_1 and $|F_1/N_1|$ for the walk-pattern described by eq.(3-28,29)

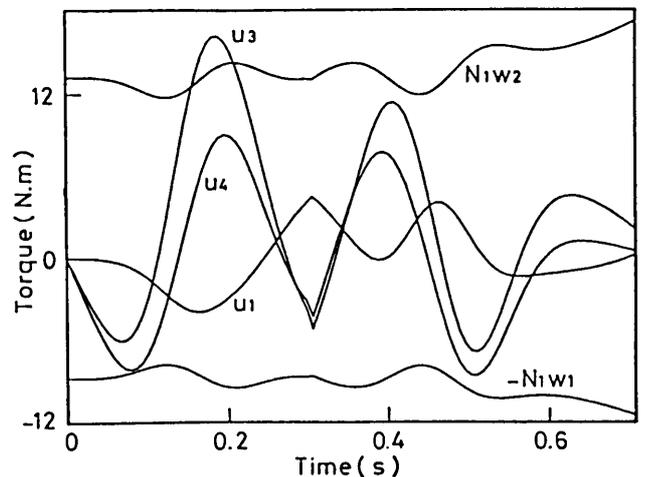


Fig.3-5 Results of simulation on u_1 , u_3 , u_4 and limit torque in the joint 1

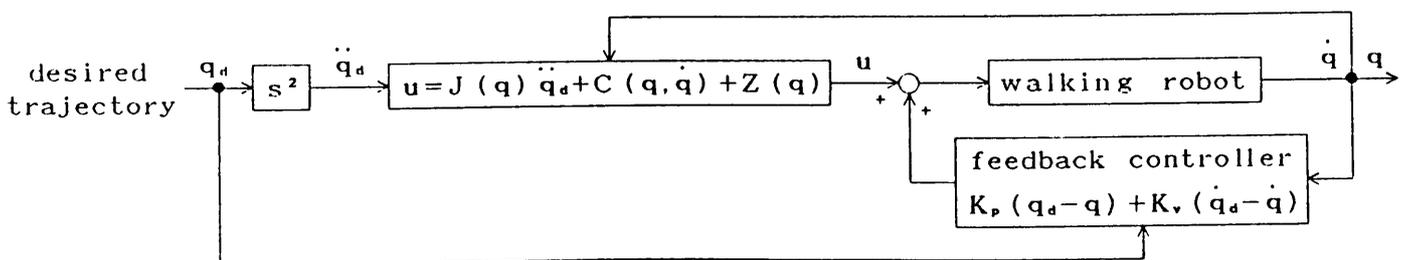


Fig.3-6 Block diagram of control system

びその速度、加速度を代入して歩行運動に必要なトルクを計算し（逆動力学問題）、得られた値を歩行ロボットへの制御入力とする。但し、トルクを計算する際、角度、角速度の値には測定データを用いることにしている。また、外乱や各リンクの物理パラメータに関する誤差の影響を小さくするため、各ジョイントに対して局所的な位置と速度のフィードバック補償も同時に行っている。

このような動的制御を用いて各ジョイントの軌道制御を行った場合、次に示す2つの利点を得られる。

- (1) 3-2-3のシミュレーションで述べたように、歩行パターンが力学的制約条件を満たしているかどうかの確認作業は逆動力学問題に他ならず、動的制御を用いることにより系に付加される力学的制約条件と軌道制御の関係が明白になる。
- (2) フィードバックゲインを小さくし、系のサーボ剛性を低くすることが可能となり、環境適応性を向上させることができる。

ところで、Fig. 3-6に示すような制御則を用いた場合、局所フィードバック補償における位置と速度のフィードバックゲインをどのようにして決めるかが問題になる。そこで、動的制御における局所フィードバック補償の意味について考えていくことにする⁷⁾。そのため、式(3-18)の*i*番目の自由度に対する運動方程式を次のように単純化する。

$$J_{ii} \ddot{q}_i + T_i^{ND} + T_i^{RC} + T_i^G + T_i^D = u_i \quad (3-30)$$

$$T_i^{ND} = \sum_{k=1}^5 J_{ik} \ddot{q}_k - J_{ii} \ddot{q}_i, \quad T_i^{RC} = c_i, \quad T_i^G = z_i$$

T_i^{ND} : 慣性力（非対角要素）

T_i^{RC} : 遠心力及びコリオリ力

T_i^G : 重力

T_i^D : 外乱

この時、制御入力を

$$u_i = J_{ii} \ddot{q}_{di} + T_i^{ND} + T_i^{RC} + T_i^G + K_{pi} (q_{di} - q_i) + K_{vi} (\dot{q}_{di} - \dot{q}_i) \quad (3-31)$$

q_{di} : 目標軌道

K_{pi} : 位置フィードバックゲイン

K_{vi} : 速度フィードバックゲイン

として式 (3-30) に代入し、ラプラス変換を行えば

$$\begin{aligned} (J_{ii}s^2 + K_{vi}s + K_{pi}) Q(s) + T_D(s) \\ = (J_{ii}s^2 + K_{vi}s + K_{pi}) Q_d(s) \end{aligned} \quad (3-32)$$

$$Q(s) = \mathcal{L}[q_i(t)]$$

$$Q_d(s) = \mathcal{L}[q_{di}(t)]$$

$$T_D(s) = \mathcal{L}[T_i^D]$$

が得られる。但し、簡単のため J_{ii} は定数と見なす。ここで、式 (3-32) に対して重ね合わせの原理を適用すれば、次の入出力関係が得られる。

$$a) \quad T_D(s) = 0$$

$$Q(s) = Q_d(s) \quad (3-33)$$

$$b) \quad Q_d(s) = 0$$

$$Q(s) = - \frac{1}{J_{ii}s^2 / K_{pi} + K_{vi}s / K_{pi} + 1} \times \frac{T_D(s)}{K_{pi}} \quad (3-34)$$

式 (3-33)、(3-34) より

$$Q(s) = Q_d(s) - \frac{1}{J_{ii}s^2 / K_{pi} + K_{vi}s / K_{pi} + 1} \times \frac{T_D(s)}{K_{pi}} \quad (3-35)$$

故に、動的制御における位置と速度に関する局所フィードバック補償は、各自由度に対して次のような意味を持っていることがわかる。

(1) 外乱トルクの影響を全ての周波数成分に対して $1/K_{pi}$ に縮小する。

(2) 外乱トルクに対して、カットオフ周波数 (ω_c)、減衰係数 (ξ) が

$$\omega_c = \sqrt{K_{pi} / J_{ii}} \quad (3-36)$$

$$\xi = K_{vi} / (2 \sqrt{J_{ii} K_{pi}}) \quad (3-37)$$

で表される2次のローパスフィルタを構成する。

従って、Fig. 3-6における局所フィードバック補償のフィードバックゲインを決定する際は、まず(1)の事項を重視して位置フィードバックゲイン (K_{pi}) を決め、次にローパスフィルタの減衰特性より減衰係数 (ξ) を決め、式 (3-37) より速度フィードバックゲイン (K_{vi}) を計算する。但し、実際の慣性モーメント (J_{ii}) は歩行ロボットの姿勢により常に変化しているので、 ξ を一定に保つため K_{vi} の値は逐次更新し

ていく。

3-4 実験及び実験結果

2章で述べた歩行ロボットと実験システムを用い、式(3-28)、(3-29)で設定した歩行パターンに対して制御実験を行う。制御プログラムはアセンブリ言語で作成し、CPU(V30)とNDP(8087)の間で簡単な並列処理を行わせることにより演算時間の短縮化を図っている。すなわち、目標軌道及びその速度、加速度はNDPによって実時間で計算し、その他の慣性モーメントや出力トルクなどの計算はCPUが行っている。これらの計算時間を考慮して、サンプリングタイムは7.5msとする。

そこで、局所フィードバック補償の減衰係数(ξ)を $1/\sqrt{2}$ と設定し、位置フィードバックゲインを40N.m/radとして制御実験を行った。Fig.3-7は支持脚足首(q_1)、腰部(q_3)、遊脚膝(q_4)に関する実験結果を示している。

これらの結果より、いずれのジョイントにおいても目標軌道に対しては多少の偏差は生じているが、整定値に関してはほぼ満足のいく制御が行われていることがわかる。従って、動的制御を用いて軌道制御を行う方法は、二足歩行ロボットの単脚支持相における各ジョイントに対する軌道制御法として有効であると考えられる。

3-5 おわりに

本章では、二足歩行ロボットの単脚支持相における運動方程式、ジョイント抗力及び

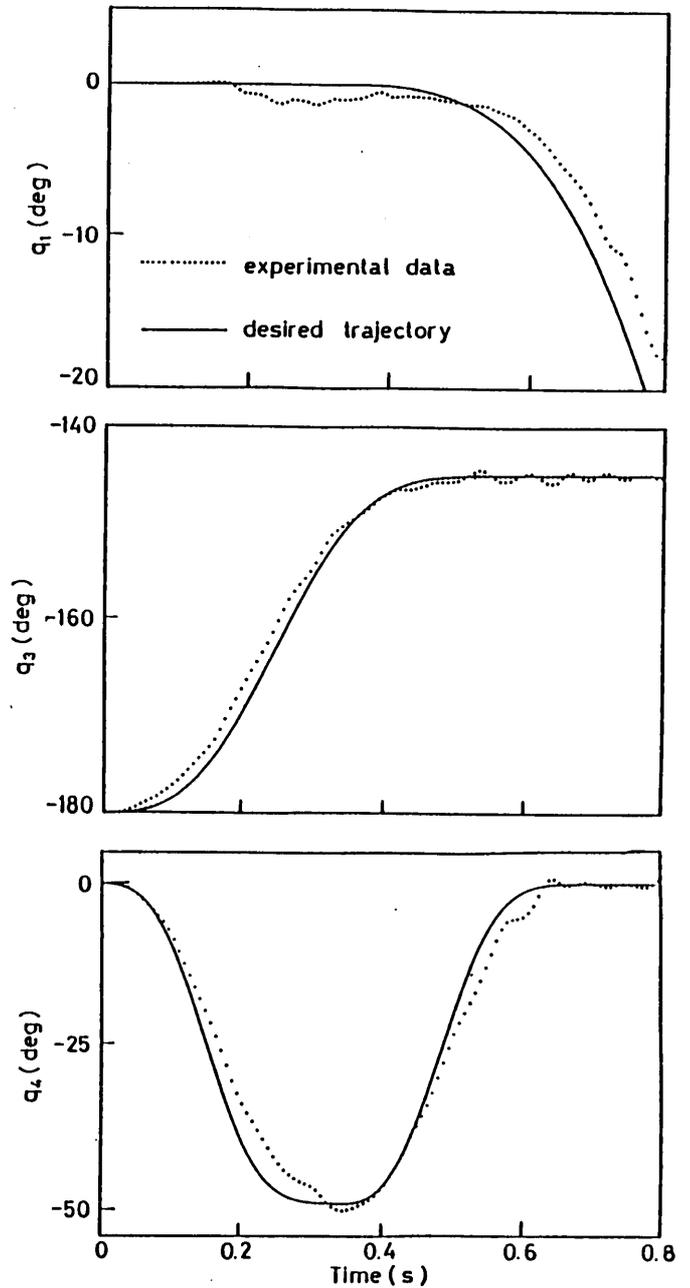


Fig.3-7 Experimental results for the walk-pattern described by eq.(3-28,29)

二足歩行ロボット特有の力学的制約条件を導出し、シミュレーションを行うことにより、歩行運動において、この力学的制約条件の果たす重要性を示した。また、二足歩行ロボットの軌道制御法として動的制御を用いることの利点を示し、制御実験により、その有効性も同時に示した。

< 参 考 文 献 >

- 1) 古田, 川路, 美多, 原, "メカニカルシステム制御", p.147~150, オーム社, 1984.
- 2) 伊藤, 成清, "拘束のある二足歩行運動の解析と制御", 日本ロボット学会誌, 第1巻, 第3号, pp.191~195, 1983.
- 3) R.P.Paul, 吉川訳, "ロボットマニピュレータ", p.152~188, コロナ社, 1984.
- 4) J.Y.S.Luh, et.al., "On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators", Trans.ASME, DSC, 102-2, pp.69~76, 1980.
- 5) M.Vukobratovic, D.Stkic, "On engineering Concept of Dynamic Control of Manipulators", Trans.ASME, DSC, 103-, PP.108~118, 1981.
- 6) 吉川, "ロボットアームの多変数制御", コンピュートロール, No.9, p.47~55, コロナ社, 1985.
- 7) 鈴木, "自動制御理論演習", p.47~55, 学献社, 1969.

4章 二足歩行ロボットの両脚支持相における力学解析と制御

4-1 はじめに

本章では、両脚支持相における力学解析と制御について述べていく。但し、1-3で述べたように本論文では歩行運動を矢状面内に限定しているため、力学解析は全て2次元平面内で行うことにする。

二足歩行ロボットの両脚支持相における力学的特徴は次の2点に要約される。

- (1) 閉ループリンク系（拘束条件付力学系）を構成している。
- (2) 足部が床面に固定されていないため、系の力学状態（床反力、ジョイント抗力、ジョイントトルク）に関する制約条件（力学的制約条件）が生じる。

ここで、(2)に示される力学的制約条件は単脚支持相の場合と同様、両脚支持相における歩行実現性を規定することになる。従って、力学的制約条件との関係より、このような力学系の解析においては系の力学状態の見通し易さや力学状態の操作性を重視するという観点から力学解析を行う必要があると考えられる。

従来、両脚支持相の力学解析に対してはラグランジュ乗数を用いる方法がとられてきた。^{1) - 5)}この方法は拘束条件さえ表せば、一定の数学的手順を踏むことにより機械的に解析を行うことが可能になるという利点がある。しかし、上述の観点からみた場合、ラグランジュ乗数という中間パラメータを用いるため、系の力学状態の見通し易さや操作性という点で扱い易いとは言い難い。

以上の点から、本論文では系の力学状態の見通し易さと操作性とを考慮して、次の考え方に基づいた閉ループリンク系の力学解析法を提案する。⁶⁾

- (1) 系の力学状態の見通し易さを考慮して、運動方程式は、ダランベールの原理に基づき静的力と動的力を独立に求め、それらの平衡の式から導出する。
- (2) 系の力学状態に関する操作性を良くするため、静的力は各リンクに対する静的平衡の式から求めることにする。その際、拘束条件を構造条件（閉ループリンク系を構成するための幾何学的条件）と軌道条件（リンク系の運動を指定するための条件）に分類し、構造条件と静的力との関係を明らかにしておく。

また、提案した方法を用い実際に両脚支持相における力学解析と制御を行い、その有効性を示す。

4-2 閉ループリンク系の力学解析

両脚支持相はエンドポイントが拘束を受ける閉ループリンク系であると考えられるため、まずFig. 4-1のように各自由度が回転の自由度をもつ一般的な2次元閉ループnリンク系について考えていく。ここで、Fig. 4-1における各リンクのパラメータは次のように定義する。

θ_i : リンク i が鉛直軸と成す角 (絶対角)

q_i : リンク i がリンク $i-1$ と成す角 (相対角)

τ_i : θ_i に対する一般化力

u_i : q_i に対する一般化力

R_i : リンク $i-1$ がリンク i に作用する抗力

N_i : R_i の垂直成分

F_i : R_i の水平成分

R_r : R_{n+1} の接触面に対する法線成分

R_t : R_{n+1} の接触面に対する接線成分

$R_i^s, N_i^s, F_i^s, R_r^s$: 各抗力の静的成分

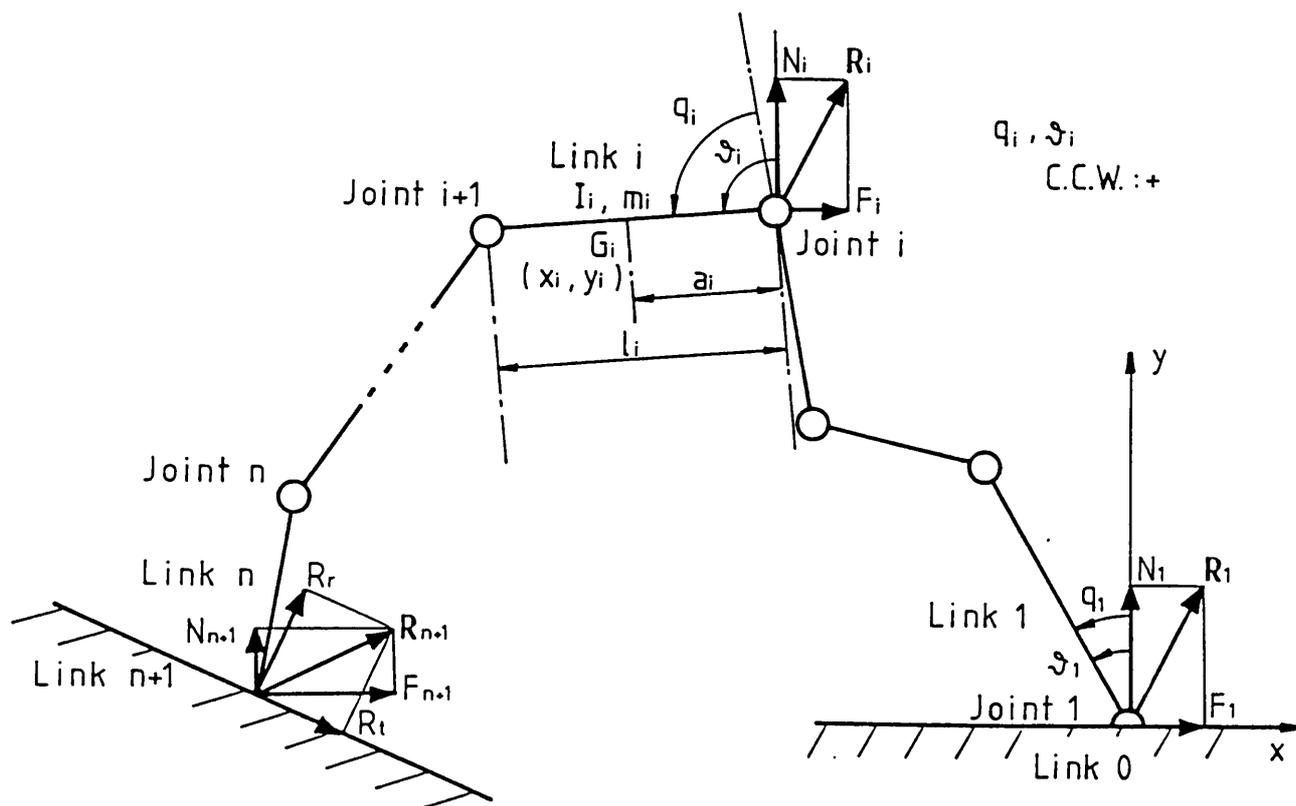


Fig.4-1 Closed loop linkage with rotational joints

$R_i^D, N_i^D, F_i^D, R_i^D$: 各抗力の動的成分

G_i : リンク i の重心 (x_i, y_i)

l_i : リンク i の全長

a_i : ジョイント i からリンク i の重心までの距離

m_i : リンク i の質量

I_i : リンク i の重心回りの慣性モーメント

但し、 θ_i, q_i は反時計回りを正とし、 N_i, F_i は正の方向を仮定しておく。

4-2-1 拘束条件⁷⁾

本論文では、閉ループリンク系に付加される拘束条件を次のように分類する。

(a) 軌道条件

リンク系の運動を指定するための条件。自由度 r のリンク系に対しては r 個の軌道条件が必要になる。

(b) 構造条件

閉ループリンク系を構成するための幾何学的条件。構造条件の数を m とすれば、2次元リンク系では $m \leq 2$ となる。

ここで、 n リンク系の場合、構造条件と軌道条件の間には

$$n = m + r \quad (4-1)$$

n : リンクの数

m : 構造条件の数

r : 軌道条件の数 (自由度の数)

という関係が成立している。

一方、2次元リンク系の場合、構造条件は $m = 1$ と $m = 2$ の2種類に分類でき、それぞれ次のように表される。

(1) エンドポイントをボールジョイントと仮定する場合 ($m = 1$)

これは、Fig. 4-2 で示されるリンク系であり、構造条件は次のようになる。

$$\text{『閉ループリンク系が構成する多角形の内角の和 } \left(\sum_{i=1}^{n+1} \delta_i \right) = (n+1)\pi \text{』} \quad (4-2)$$

ここで、 δ_i は閉ループリンク系が構成する多角形の内角を表している。

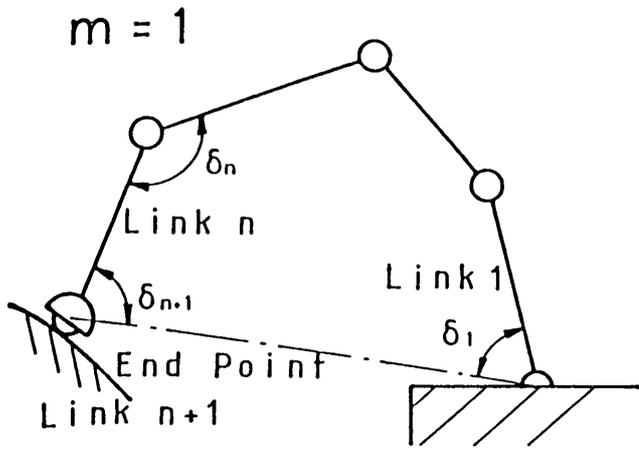


Fig.4-2 Closed loop linkage model
(End point = ball joint)

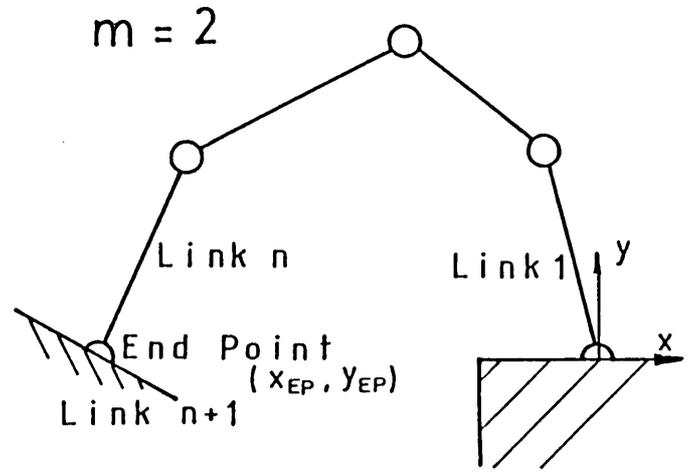


Fig.4-3 Closed loop linkage model
(End point = pin joint)

(2) エンドポイントをピンジョイントと仮定する場合 (m = 2)

これは、Fig. 4 - 3 で示されるリンク系であり、構造条件は次のようになる。

$$\text{『 } x_{EP} = C_1, \quad y_{EP} = C_2 \text{』} \quad (4-3)$$

ここで、 x_{EP} 、 y_{EP} は各々エンドポイントの x 座標、 y 座標を表しており C_1 、 C_2 は定数とする。

4-2-2 閉ループリンク系の運動方程式

本論文では、閉ループリンク系を次のように定義する。

『 エンドポイントが或る対象物と接触し、対象物に対して力 R_{n+1} を作用させ、その反作用力として対象物から $-R_{n+1}$ の力を受けている状態にあるリンク系。』

この定義に従えば、閉ループリンク系の運動方程式は 3 章で求めた開ループリンク系の運動方程式 (3-18) に対して R_{n+1} を加えることにより求められ、^{8), 9)}

$$J(\alpha) \ddot{\alpha} + C(\alpha, \dot{\alpha}) + Z(\alpha) + A^T R_{n+1} = u \quad (4-4)$$

$$\dot{r}_{EP} = A \dot{\alpha}$$

r_{EP} : エンドポイントの座標

A : ヤコビアン行列

で表される。一方、ダランベールの原理によれば、運動方程式は慣性抵抗 (u^D) と静的力 (u^S) 及び系に対する入力 (u) に関する平衡の式とみなすことができるので、式 (4-4) は次のように書き換えられる。

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^D + \mathbf{u}^S \quad (4-5)$$

$$\mathbf{u}^D = \mathbf{J}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (4-6)$$

$$\mathbf{u}^S = \mathbf{Z}(\mathbf{q}) + \mathbf{A}^T \mathbf{R}_{n+1} \quad (4-7)$$

従って、閉ループリンク系の運動方程式を導出する際は、ダランベールの原理に基づき \mathbf{u}^D と \mathbf{u}^S を各々独立に計算し、それらの平衡の式として求めていくことにする。

このようにダランベールの原理に基づいて運動方程式を導出すれば、系に作用する影響を静的成分と動的成分に分離でき系の力学状態を見通し易くすることが可能となる。

4-2-2-1 慣性抵抗

式(4-6)より、閉ループリンク系の慣性抵抗は開ループリンク系の慣性抵抗と全く同じ形で表されることがわかる。しかし、閉ループリンク系の場合、構造条件が付加されるため自由度の減少が生じる。従って、この自由度の減少を考慮して慣性抵抗を求めていく必要がある。但し、簡単のため軌道条件はジョイント変数に対して直接与えるものとし、軌道を設定するジョイント変数を $\mathbf{q}_A (\in \mathbb{R}^r)$ 残りのジョイント変数を $\mathbf{q}_P (\in \mathbb{R}^m)$ とおき、 \mathbf{q}_A と \mathbf{q}_P に分けて並べ換えたジョイント変数を新たに $\hat{\mathbf{q}} (\in \mathbb{R}^n)$ とおく。

$$\hat{\mathbf{q}} = \begin{pmatrix} \mathbf{q}_P \\ \mathbf{q}_A \end{pmatrix} \quad (4-8)$$

そこで、次式に示される軌道条件及び構造条件が付加された場合の2次元閉ループリンク系の慣性抵抗について考えていく。

$$\mathbf{f} = \begin{pmatrix} \mathbf{f}_c(\mathbf{q}) \\ \mathbf{f}_t(\mathbf{q}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{k}_1 \\ \mathbf{q}_A(t) \end{pmatrix} \quad (4-9)$$

$$\text{構造条件: } \mathbf{f}_c(\mathbf{q}) = \mathbf{k}_1 \quad (4-10)$$

$$\text{軌道条件: } \mathbf{f}_t(\mathbf{q}) = \mathbf{q}_A(t) \quad (4-11)$$

但し、エンドポイントが接触している床面は静止しているものとし、 $\mathbf{k}_1 = \text{定数}$ とする。

ここで、式(4-9)を時間微分すれば

$$\hat{\mathbf{E}} \dot{\hat{\mathbf{q}}} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\mathbf{q}}_A(t) \end{pmatrix} \quad (4-12)$$

$$\hat{\mathbf{E}} = \begin{pmatrix} \mathbf{E}_1 & \mathbf{E}_2 \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \mathbf{E}_1: (m \times m), \quad \mathbf{E}_2: (m \times r) \\ \mathbf{I}: \text{単位行列 } (r \times r) \end{array} \quad (4-13)$$

$$[E_1 \quad E_2] = \left(\begin{array}{c} \frac{\partial f_c}{\partial \hat{\mathbf{q}}} \end{array} \right) \quad (4-14)$$

が得られ、式(4-12)より $\dot{\hat{\mathbf{q}}}$ 、 $\ddot{\hat{\mathbf{q}}}$ は次のように表される。

$$\dot{\hat{\mathbf{q}}} = \hat{E}^{-1} \left(\begin{array}{c} 0 \\ \dot{\mathbf{q}}_A \end{array} \right) \quad (4-15)$$

$$\ddot{\hat{\mathbf{q}}} = \hat{E}^{-1} \left(\begin{array}{c} 0 \\ \ddot{\mathbf{q}}_A(t) \end{array} \right) + \dot{\hat{E}}^{-1} \left(\begin{array}{c} 0 \\ \dot{\mathbf{q}}_A(t) \end{array} \right) \quad (4-16)$$

$$\hat{E}^{-1} = \left(\begin{array}{cc} E_1^{-1} & -E_1^{-1}E_2 \\ 0 & I \end{array} \right) \quad (4-17)$$

従って、 $\dot{\hat{\mathbf{q}}}$ ($\dot{\mathbf{q}}$)、 $\ddot{\hat{\mathbf{q}}}$ ($\ddot{\mathbf{q}}$) は \mathbf{q}_A を設定すれば式(4-15)、(4-16)から計算できる。一方、 $\hat{\mathbf{q}}$ (\mathbf{q}) は拘束条件の幾何学的性質或は測定データから求めることにすれば、これらの値を式(4-6)に代入することにより、閉ループリンク系の慣性抵抗が得られる。

4-2-2-3 静的力

閉ループリンク系の静的力は、各リンクに対する静的平衡の式を解くことにより求めていくことにする。すなわち、式(4-7)のように静的力を重力とエンドポイントにおける床反力に分割して考えるのではなく、これらの力を静的力としてまとめて考えて

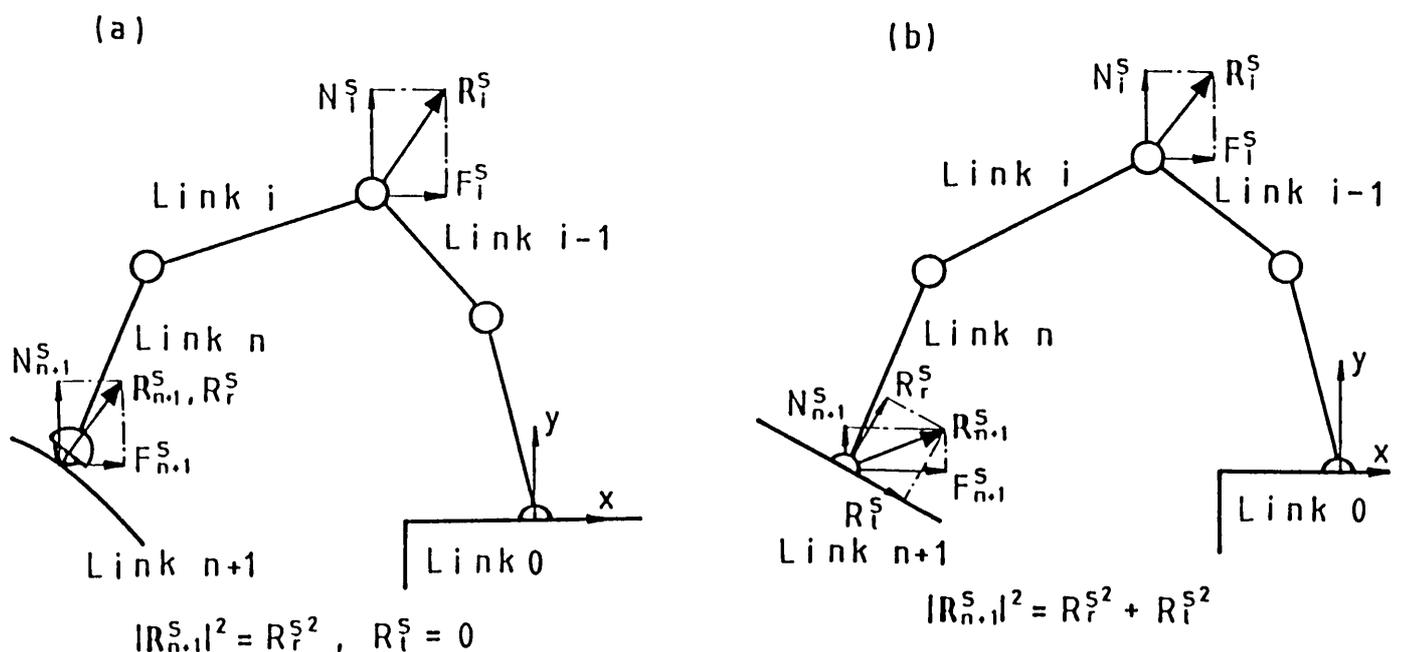


Fig.4-4 Static forces in a closed loop linkage

いく。そのため、まず静的力と構造条件の間関係について調べておく。

Fig. 4-4 は、2次元閉ループnリンク系のジョイント及びエンドポイントに作用する抗力の静的成分を表している。この図より、 $m=1$ の場合、エンドポイントにおける静的床反力 (R_{n+1}^s) の接触面に対する接線成分 (R_t^s) は、常に0となることがわかる。従って、 R_{n+1}^s はその法線成分である R_r^s だけで表すことができる。一方、 $m=2$ の場合、接触面における接線成分 (R_t^s)、法線成分 (R_r^s) は共にある値を持つことになり、 R_{n+1}^s を表すためには R_t^s と R_r^s の二つの変数が必要になる。故に、静的力と構造条件の間には次のような関係が成り立っている。

『 エンドポイントにおける静的床反力 (R_{n+1}^s) を表すために必要な独立変数の数は構造条件の数 (m) に等しい。』

$$(4-18)$$

そこで、各リンクに対する静的平衡の式より閉ループリンク系の静的力を求めていく。Fig. 4-4 において、各リンクに対する静的平衡の式は

$$N_i^s - N_{i+1}^s - m_i g = 0 \quad (4-19)$$

$$F_i^s - F_{i+1}^s = 0 \quad (4-20)$$

$$- (N_{i+1}^s l_i + m_i a_i g) \sin \left(\sum_{j=1}^i q_j \right) - F_{i+1}^s l_i \cos \left(\sum_{j=1}^i q_j \right) + u_i^s - u_{i+1}^s = 0 \quad (4-21)$$

$$\text{但し、 } u_{n+1}^s = 0 \quad (i = 1 \sim n)$$

となる。ここで、式 (4-20) より

$$F_i^s = F^s \quad (i = 1 \sim n+1) \quad (4-22)$$

とおけるので、式 (4-19) ~ (4-21) をまとめれば、各リンクに対して次の静的平衡の式が成立する。

$$u_i^s = \sum_{j=1}^i (V_j + W_j) \quad (i = 1 \sim n) \quad (4-23)$$

$$V_j = \left\{ (N_{n+1}^s + \sum_{k=j+1}^n m_k g) l_j + m_j a_j g \right\} \sin \left(\sum_{k=1}^j q_k \right) \quad (4-24)$$

$$W_j = F^s l_j \cos \left(\sum_{k=1}^j q_k \right) \quad (4-25)$$

上式において、その未知数は n 個の静的ジョイントトルク (u^s) と m 個の静的床反力成分 (R_{n+1}^s) の合計 $n+m$ 個であり、このままでは解くことはできない。しかし、自由度を r ($r < n$, $n = r + m$) の閉ループリンク系の場合、 n 個のリンクのうち r 個さえ

静止させておけば静的な平衡状態は保つことができる。すなわち、 n 個の静的ジョイントトルクのうち r 個が静的平衡状態を保つために必要なトルクであり、残りの m 個の静的ジョイントトルクはジョイント変数と同様、静的平衡状態を設定するための変数と考えることができる。従って、 m 個の静的ジョイントトルクを予め与えることにより静的平衡状態を指定すれば、残りの r 個の静的ジョイントトルクと m 個のエンドポイントにおける静的床反力成分は、式(4-23)の連立方程式より求めることができる。また、この連立方程式(4-23)より、 m 個の静的ジョイントトルクを与えるということは、エンドポイントにおける静的床反力成分(m 個)を与えることと全く等価であることがわかる。従って、静的平衡状態は次に示す3通りの方法で指定することが可能である。

<方法1>

u^s の成分のうち m 個の値を与える。

<方法2>

R_{n+1}^s の値を与える。

<方法3>

u^s の成分のうち b_1 ($< m$)個と R_{n+1}^s の成分のうち b_2 ($< m$)個の値を与える。

但し、 $m = b_1 + b_2$ である。

故に、静的平衡状態を上記3通りのいずれかの方法で指定して連立方程式(4-23)を解けば、閉ループリンク系の静的力を求めることができる。

ここで、式(4-7)のように重力とエンドポイントにおける静的床反力の和として静的力を求める場合は、<方法2>によって静的平衡状態を指定することに相当していることがわかる。一方、本論文で提案したように各リンクの静的平衡の式(4-23)から静的力を求めた場合は、<方法1>~<方法3>の3通りの方法で静的平衡状態を指定することが可能となり、系の力学状態に関する操作性を向上させることができる。

以上で閉ループリンク系の慣性抵抗と静的力が得られたので、これらの平衡の式(4-5)より運動方程式が求められる。

4-2-3 ジョイント抗力

ジョイント抗力の静的成分(N_i^s , F_i^s)は式(4-23)より求められるので、ここではジョイント抗力の動的成分について考えていく。

Fig.4-1において、各リンクの重心の位置は

$$x_i = \left\{ a_i \sin \left(\sum_{k=1}^i q_k \right) + \sum_{j=1}^{i-1} l_j \sin \left(\sum_{k=1}^j q_k \right) \right\} \quad (4-26)$$

$$y_i = \left\{ a_i \cos \left(\sum_{k=1}^i q_k \right) + \sum_{j=1}^{i-1} l_j \cos \left(\sum_{k=1}^j q_k \right) \right\} \quad (4-27)$$

(i = 1 ~ n)

で表され、各リンクに対する並進方向の動的な平衡の式は

$$N_i^D - N_{i+1}^D = m_i \ddot{y}_i \quad (4-28)$$

$$F_i^D - F_{i+1}^D = m_i \ddot{x}_i \quad (4-29)$$

(i = 1 ~ n)

で表される。但し、閉ループリンク系の慣性抵抗を式(4-6)の形で与えた場合、文献9)より、エンドポイントにおける床反力の動的成分は零 ($R_{n+1}^D = 0$) になることが示されているので

$$N_{n+1}^D = F_{n+1}^D = 0 \quad (4-30)$$

となる。今、各ジョイントに目標軌道を与えれば、その目標軌道に対する x_i 、 y_i の値は式(4-26)、(4-27)より求めることができる。そこで、これらの値を式(4-28) ~ (4-29)に代入して、この連立方程式を解くと、その時のジョイント抗力の動的成分 (N_i^D 、 F_i^D) が求められる。

更にジョイント及びエンドポイントに作用する実際の抗力 (N_i 、 F_i) は

$$N_i = N_i^S + N_i^D \quad (4-31)$$

$$F_i = F_i^S + F_i^D \quad (4-32)$$

(i = 1 ~ n + 1)

より求めることができる。

4-3 二足歩行ロボットの両脚支持相における力学解析

前節の考え方に基づいて、二足歩行ロボットの両脚支持相における力学解析を行っていく。両脚支持相はFig. 4-5に示すような閉ループ6リンク系(リンク0~リンク5)でモデル化できる。但し、エンドポイントはピンジョイント ($m = 2$) と仮定する。ここで、リンク6は床面を表すものとし、 W は前脚足首から後脚つま先迄の距離を表すものとする。

4-3-1 二足歩行ロボットの両脚支持相における力学的制約条件

二足歩行ロボットは、その性質上、足部(リンク0、リンク5)が床面(リンク6)

に固定されておらず、自重と摩擦力によってのみ保持されているだけである。従って、両脚支持相の場合も単脚支持相と同様に、安定な歩行を行うためには次に示す力学的制約条件を満足している必要がある。

- (1) 前脚足部（リンク0）がかかと、もしくはつま先回りに回転しない。

$$-N_1 w_1 < u_1 < N_1 w_2 \quad (4-33)$$

- (2) 足部が床面から離れない。

$$N_1 > 0, \quad N_6 > 0 \quad (4-34)$$

- (3) 足部が床面上を滑らない。

$$|F_1 / N_1| < \mu_{max}$$

$$|F_6 / N_6| < \mu_{max}$$

$$\mu_{max}: \text{足部と床面との間の最大静止摩擦係数} \quad (4-35)$$

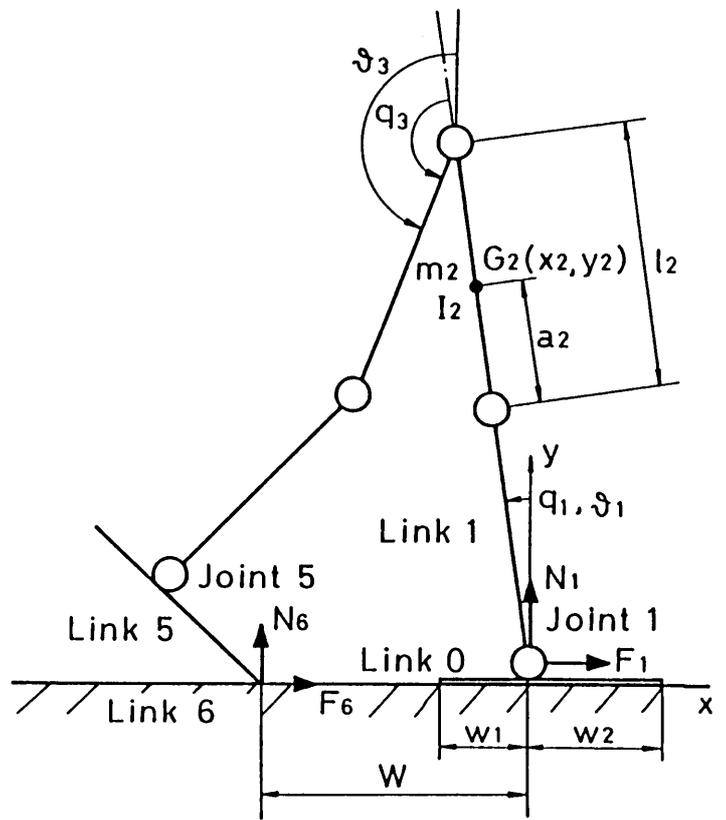


Fig.4-5 Model of a biped locomotion robot in the double legs supporting phase

4-3-2 二足歩行ロボットの両脚支持相における運動方程式

4-2-2の考え方にに基づき、系に付加される力学的制約条件を考慮して、二足歩行ロボットの両脚支持相における運動方程式を導出していく。

初めに両脚支持相における動的力について考えていくことにする。両脚支持相はFig.4-5に示すような閉ループ6リンク系でモデル化されるので、系の自由度は3となる。そこで、目標軌道を与えるジョイント変数 (α_a) として q_1 、 q_2 、 q_4 を選べば、軌道条件は

$$f_t = \alpha_a(t) = \begin{pmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ q_4(t) \end{pmatrix} \quad (4-36)$$

で表され、 $\dot{\alpha}$ は

$$\hat{\mathbf{q}} = \begin{pmatrix} \mathbf{q}_A \\ \mathbf{q}_P \end{pmatrix} \quad (4-37)$$

$$\mathbf{q}_A = [q_1 q_2 q_4]^T, \quad \mathbf{q}_P = [q_3 q_5]^T$$

となる。 \mathbf{q}_A の選び方については5章で詳しく述べる。一方、構造条件はFig.4-5より

$$\mathbf{f}_c = \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^5 l_j \sin \left(\sum_{k=1}^j q_k \right) \\ \sum_{j=1}^5 l_j \cos \left(\sum_{k=1}^j q_k \right) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -W \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4-38)$$

で表される。従って、これらの軌道条件、構造条件を式(4-12)~(4-17)に代入すれば、両脚支持相における $\dot{\hat{\mathbf{q}}}$ ($\dot{\mathbf{q}}$)、 $\ddot{\hat{\mathbf{q}}}$ ($\ddot{\mathbf{q}}$) の値が求められる。一方、 $\hat{\mathbf{q}}$ (\mathbf{q}) の値は構造条件の幾何学的性質あるいは測定データから求めれば、式(4-6)より両脚支持相における慣性抵抗が得られる。

次に両脚支持相における静的力について考えていく。両脚支持相における静的平衡の式は、式(4-23)~(4-25)において $n=5$ とおくことにより得られる。ここで、前項で述べた力学的制約条件を考慮して、<方法3>を用い静的平衡状態を次のように設定する。

$$u_1^s = -u_1^D \quad (u_1 = 0) \quad (4-39)$$

$$F^s = 0 \quad (4-40)$$

このような静的平衡状態においては前脚足部におけるかかと及びつま先回りの回転が生じなくなり ($u_1 = 0$)、また、滑りを生じさせる力が動的成分のみに単純化される ($F^s = 0$)。従って、本論文で提案した閉ループリンク系に対する力学解析法を用いれば、系に付加される力学的制約条件を考慮しながら力学状態を操作することが可能になり、両脚支持相のような閉ループリンク系の力学解析に対して非常に有効であることがわかる。

そこで、両脚支持相における静的力を、式(4-39)、(4-40)で示される静的平衡状態のもとで、各リンクに対する静的平衡の式を解くことにより求めれば、両脚支持相における運動方程式は式(4-5)より求めることができる。一方、両脚支持相の各ジョイント及びエンドポイントに作用する抗力の動的成分と実際に作用する抗力の値は、式(4-28)~(4-32)において $n=5$ とおくことにより得られる。

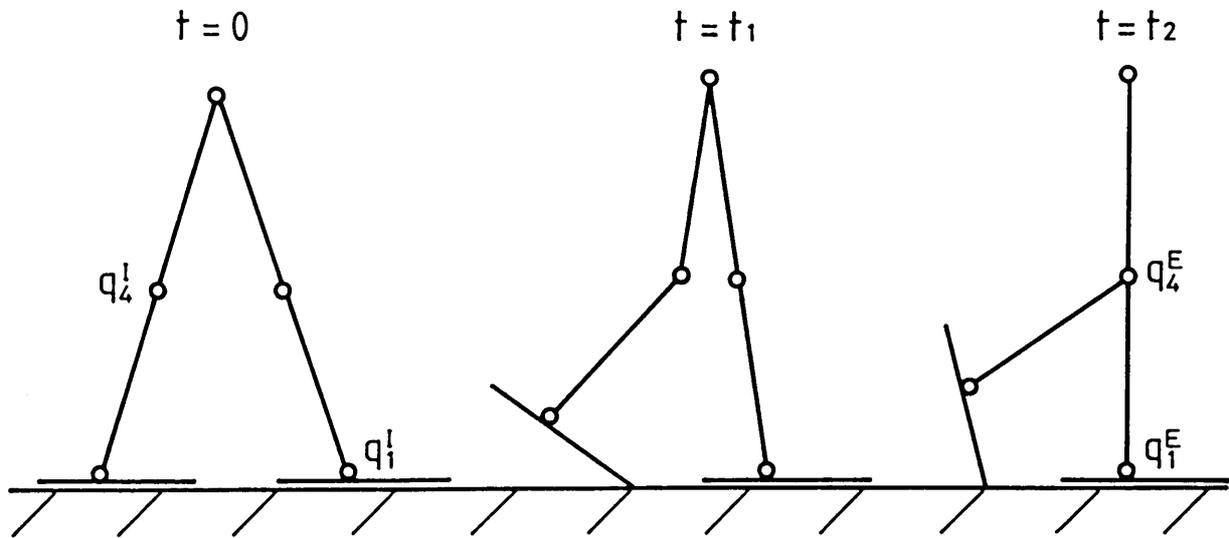


Fig.4-6 Walk-pattern in the double legs supporting phase

4-3-3 シミュレーション

二足歩行ロボットの両脚支持相における運動方程式及びジョイント抗力が得られたので、歩行パターンを与えシミュレーションを行うことにより歩行運動と力学的制約条件との間の関係を調べていく。

Fig. 4-6 は両脚支持相における二足歩行ロボットの歩行パターンを示しており、軌道条件は次の関数で与えることにする。但し、歩行パターンに関しては5章で詳しく述べる。

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= q_1^I + (q_1^E - q_1^I) \{1 - \exp(-\alpha_1 t^3)\} \\ q_2 &= 0 \\ q_4 &= q_4^I + (q_4^E - q_4^I) \{1 - \exp(-\alpha_4 t^3)\} \end{aligned} \right\} \quad (4-41)$$

そこで、軌道条件(4-41)及び構造条件(4-38)におけるパラメータを

$$\left. \begin{aligned} W &= 0.3 \text{ (m)} \\ q_1^I &= 17.5^\circ, \quad q_1^E = 0^\circ, \quad \alpha_1 = 3 \\ q_4^I &= 0^\circ, \quad q_4^E = -49.5^\circ, \quad \alpha_4 = 3 \end{aligned} \right\} \quad (4-42)$$

とおき、シミュレーションを行った結果をFig.4-7、8に示す。Fig.4-7より、歩行運動中は常に $N_1 > 0$ 、 $N_6 > 0$ であることがわかる。一方、Fig.4-8より、

$|F_1/N_1|$ の最大値は約1.8(摩擦角 $\cong 61^\circ$)になり、このままでは滑りが生じると考えられる。従って、この対策として2章で述べたように、床面にはゴムマットを敷き足底部にはスパイク状のものを取り付けることにする。このような滑り止め対策を講じれば、式(4-36)、(4-38)、(3-41)、(4-42)によって設定

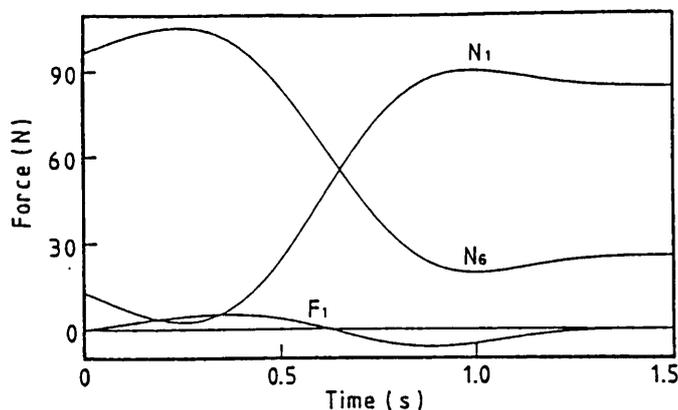


Fig.4-7 Results of simulation on floor reactions(N_1, N_6, F_1) for the walk-pattern described by eq.(4-36,38,41,42)

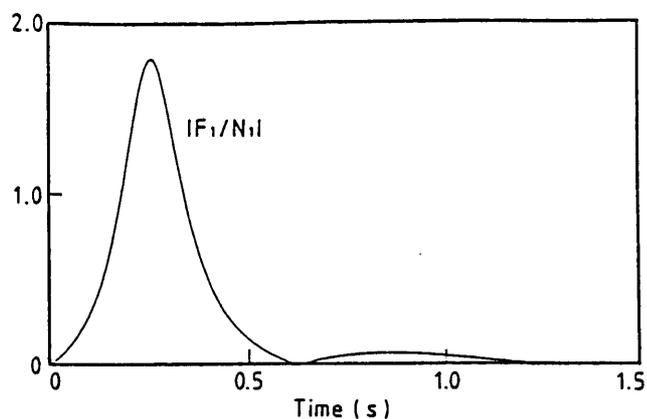


Fig.4-8 Result of simulation on $|F_1/N_1|$

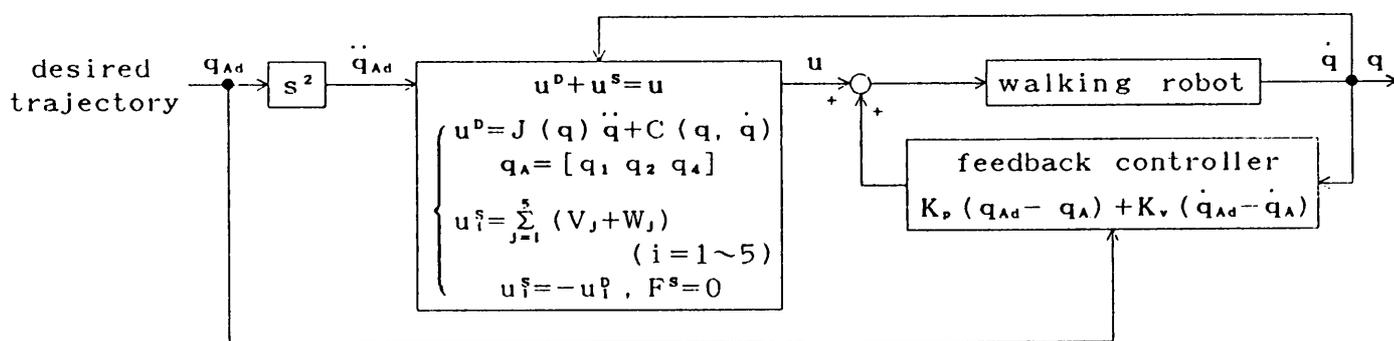


Fig.4-9 Block diagram of control system

された歩行パターンは実現可能であると考えられる。但し、本シミュレーションにおける各リンクの物理パラメータはTable 2-1において左脚を前脚として得られた値を用いている。

4-4 制御則

単脚支持相と同様、両脚支持相の場合もFig. 4-9に示されるような動的制御を用いて各ジョイントの軌道制御を行うことにする。すなわち、4-3-2で導出した両脚支持相の運動方程式に対し与えられた目標軌道及びその速度、加速度を代入して歩行運動に必要なトルクを計算し、得られた値を歩行ロボットに対する制御入力とする。但し、トルクを計算する際、角度、角速度の値には測定データを用いることにしている。また、外乱や各リンクの物理パラメータに関する誤差の影響を小さくするため、目標軌道を設定するジョイント (q_a) に対して局所的な位置と速度のフィードバック補償も同時に行っている。

4-5 実験及び実験結果

2章で述べた歩行ロボットと実験システムを用い、式(4-36)、(4-38)、(4-41)、(4-42)で設定した歩行パターンに対して制御実験を行う。制御プログラムはアセンブリ言語で作成し、CPU(V30)とNDP(8087)の間で簡単な並列処理を行わせることにより演算時間の短縮化を図っている。すなわち、目標軌道及びその速度、加速度はNDPによって実時間で計算し、その他の慣性モーメントや出力トルクなどの計算はCPUが行っている。これらの計算時間を考慮して、サンプリングタイムは7.5msとする。

そこで、局所フィードバック補償の減衰係数(ξ)を $1/\sqrt{2}$ と設定し、位置フィードバックゲインを40 N.m/radとして制御実験を行った。Fig.4-10は前脚足首(q_1)、後脚膝(q_4)に関する実験結果を示している。

これらの結果より、いずれのジョイントにおいても目標軌道に対しては多少の偏差は生じているが、整定値に関してはほぼ満足のいく制御が行われていることがわかる。従って、二足歩行ロボットの両脚支持相のように系の力学状態に制約条件が付加された閉ループリンク系の制御に対して、本論文で提案した力学解析法に基づく制御則は有効であると考えられる。

4-6 おわりに

本章では、二足歩行ロボットにおける両脚支持相のように系の力学状態に制約条件が付加される閉ループリンク系に対する力学解析法として、ダランベールの原理に基づき系に作用する力を静的成分と動的成分に分け、かつ静的成分を各リンクに関する静的平衡の式から求めて解析を行う方法を提案した。また、この方法は系の力学状態の見通し易さや操作性という点で扱い易く、二足歩行ロボットの両脚支持相における力学解析に

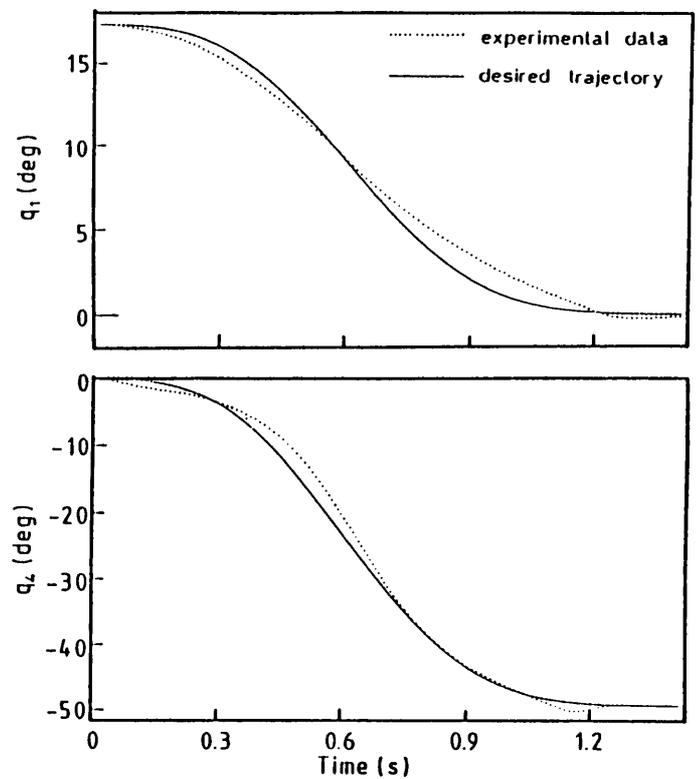


Fig.4-10 Experimental results for the walk-pattern described by eq.(4-36,38,41,42)

対しては特に有効であることが示された。更に制御実験を行うことにより、その実用性も示した。

< 参 考 文 献 >

- 1) H.Hemami, B.F.Wyman, " Modeling and Control of Constrained Dynamic Systems with Application to Biped Locomotion in Frontal plane", IEEE, Trans. Automatic Control, AC-24, No.4, pp.526~535, 1979.
- 2) 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, 第1巻, 第3号, pp.167~175, 1983.
- 3) 伊藤, 成清, " 拘束のある二足歩行運動の解析と制御", 日本ロボット学会誌, 第1巻, 第3号, pp.191~195, 1983.
- 4) 美多, 柏瀬, 坂中, " 線形化拘束条件付き運動のフィードバック制御(完全力学系の制御)", 電気学会論文誌C, 第103巻, 第1号, pp.17~24, 1983.
- 5) 古荘, 山田, " 角運動量を考慮した二足歩行ロボットの動的制御-両脚支持相に蹴りを行う歩行", 計測自動制御学会論文集, 第22巻, 第4号, pp.451~458, 1986.
- 6) 五十嵐, 野飼, " 二足歩行運動における両脚支持状態の力学解析と制御", 第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集, p.583~584, 1987.
- 7) M.Vukobratovic, V.Pontkojak, 古田監訳, " ロボット工学の基礎-マニピュレータの動力学", p.121~127, シュプリンガー・フェアラーク東京, 1986.
- 8) R.P.Paul, 吉川訳, " ロボットマニピュレータ", p.152~188, コロナ社, 1984.
- 9) 中村, " ロボットマニピュレータの操作力発生の必要十分条件", 日本ロボット学会誌, 第4巻, 第1号, pp.3~8, 1986.
- 10) 吉川, " ロボットアームの多変数制御", コンピュートロール, No.9, p.47~55, コロナ社, 1985.

5章 二足歩行ロボットによる下位レベル適応歩行のための歩行パターン生成法

5-1 はじめに

様々な環境の変化に適応しながら行う歩行、いわゆる適応歩行の制御アルゴリズムは階層構造をなしていることが良く知られており、Fig. 5-1はそれを簡単にモデル化したものである。この図において、レベル3とレベル4のみで構成される歩行を、本論文では特に下位レベル適応歩行と定義した。本研究の目的は二足歩行ロボットにより、この下位レベル適応歩行を実現することであり、レベル4（ジョイントの軌道制御法）に関しては既に3章、4章で詳しく論じてきた。そこで本章では、その上位レベルであるレベル3に着目し、下位レベル適応歩行を実現するための歩行パターン生成法に関する考察を行うことにする。但し、問題を単純化するため、1-3で述べたように歩行運動は矢状面内の運動のみに限定している。

歩行パターン生成法として、高西、加藤らはZMP規範を用いることにより実現可能な歩行パターンを生成する方法を提案している。^{1), 2)} この方法を用いれば常に実現可能な歩行パターンを生成することができる。しかし、少しでも歩行パターンに変更が生じれば歩行パターン生成手順を初めから行わなければならない、様々な環境に対する歩行パターンが簡単に生成できるとは言い難い。

本論文では、この歩行パターン生成法を簡易化するため、予め代表的な環境に対して基本となる歩行パターンを設定しておき、それらを適当に調節しながら組み合わせることにより種々の歩行パターンを生成する方法を提案する。³⁾ その際、歩行パターンの実現性問題は系に付加される力学的制約条件によって判定している。また、上記の考え方に基づいて歩行実験を行い、この簡易化した歩行パターン生成法の実用性を示し、同時に、平坦面、配管環境、段差（上り、下り）及びこれらを組み合わせた環境に対する歩行結果も紹介する。

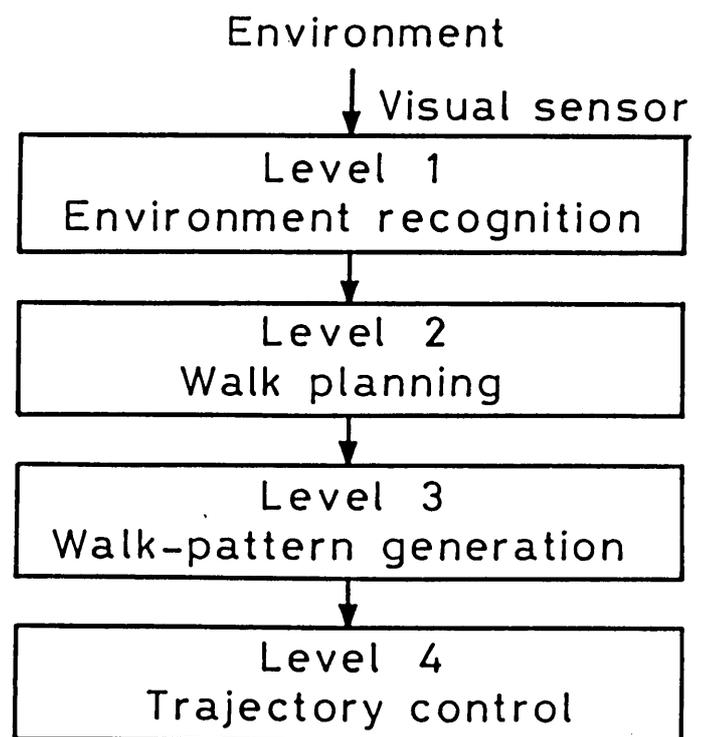


Fig.5-1 Hierarchical structure in an adaptive walking

5-2 二足歩行ロボットのモデル化

歩行運動を矢状面内の運動のみに限定するため、Fig. 5-2 に示す 2次元リンク系によって二足歩行ロボットをモデル化する。ここで、Fig. 5-2 における各リンクのパラメータは次のように定義する。

θ_i : リンク i が鉛直軸と成す角 (絶対角)

q_i : リンク i がリンク $i-1$ と成す角
(相対角)

τ_i : θ_i に対する一般化力

u_i : q_i に対する一般化力

R_i : リンク $i-1$ がリンク i に作用する
抗力

N_i : R_i の垂直成分

F_i : R_i の水平成分

G_i : リンク i の重心

l_i : リンク i の全長

a_i : ジョイント i からリンク i の重心までの距離

m_i : リンク i の質量

I_i : リンク i の重心回りの慣性モーメント

但し、 θ_i 、 q_i は反時計回りを正とし、 N_i 、 F_i は正の方向を仮定しておく。

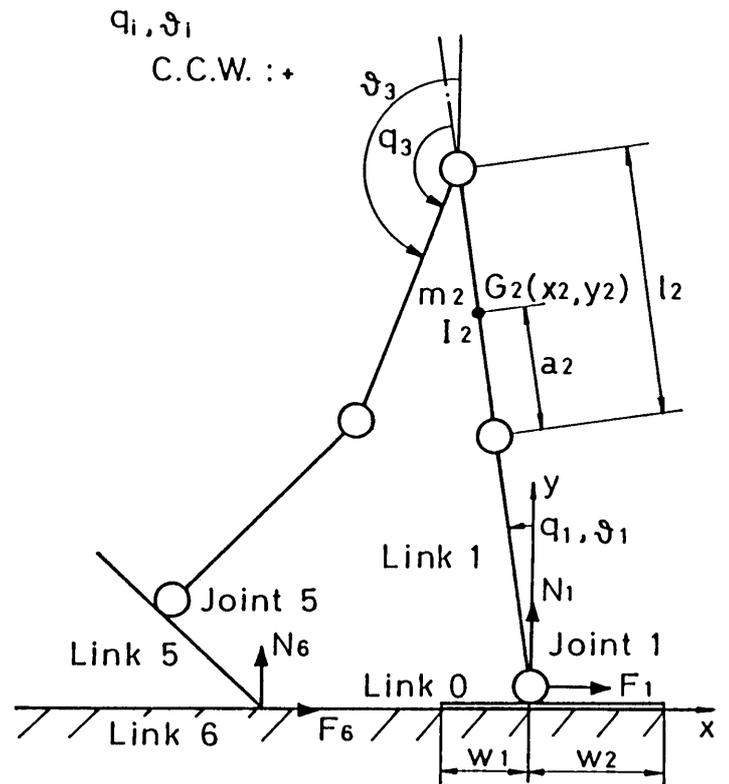


Fig.5-2 Model of a biped locomotion robot

5-3 二足歩行ロボットの歩行パターン生成法 (レベル3)

本論文では、次に示す考え方に基づく簡易化した歩行パターン生成法を提案する。

(1) 予め代表的な環境に対して基本となる歩行パターンを設定しておき、これを基本歩行パターンと定義する。そして、歩行パターンを生成する際は、周囲の環境に応じて基本歩行パターンを適当に調節しながら、それらを組み合わせることにより種々の歩行パターンを生成する。

(2) 基本歩行パターンは直接ジョイントに対する軌道として設定する。

(3) 基本歩行パターンは単脚支持相と両脚支持相の繰り返しにより構成されているものとし、単脚支持相における支持脚足首に対しては、重力の作用を考慮し

た目標軌道を設定する。また両脚支持相においては、遊脚接地時の接地脚足首回りの角速度を利用し、その角速度に応じた歩行パターンを設定する。

(4) 歩行パターンの実現性問題は系に付加される力学的制約条件によって判定する。

5-3-1 規準軌道

基本歩行パターンは直接、各ジョイントに対する軌道として与えるため、ジョイント軌道の加減速パターンが基本歩行パターンの最小構成要素となる。本論文では、この加減速パターンを規準軌道と呼ぶことにし、次の関数で定義する。

$$\begin{aligned} x &= x_0 + (x_1 - x_0) \{ 1 - \exp(-\alpha t^3 - \beta t^2 - \gamma t) \} \\ &= f(x_0, x_1, \alpha, \beta, \gamma) \end{aligned} \quad (5-1)$$

ここで、 x_0 は初期値、 x_1 は整定値とする。

この規準軌道の速度、加速度は式(5-1)より

$$\dot{x} = (x_1 - x_0) (3\alpha t^2 + 2\beta t + \gamma) \exp(-\alpha t^3 - \beta t^2 - \gamma t) \quad (5-2)$$

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= (x_1 - x_0) \{ -9\alpha^2 t^4 - 12\alpha\beta t^3 - (4\beta^2 + 6\alpha\gamma) t^2 \\ &\quad + (4\beta\gamma - 6\alpha) t + 2\beta - \gamma^2 \} \exp(-\alpha t^3 - \beta t^2 - \gamma t) \end{aligned} \quad (5-3)$$

と表され、その初期速度(\dot{x}_0)、初期加速度(\ddot{x}_0)は

$$\dot{x}_0 = \gamma (x_1 - x_0) \quad (5-4)$$

$$\ddot{x}_0 = (2\beta - \gamma^2) (x_1 - x_0) \quad (5-5)$$

で与えられる。従って、 β 、 γ は規準軌道の初期状態を表すパラメータと考えることができる。

一方、規準軌道の収束速度を表す整定時間(T_s)を99.9%収束時間すなわち

$$\begin{aligned} x_0 + 0.999(x_1 - x_0) \\ = x_0 + (x_1 - x_0) \{ 1 - \exp(-\alpha T_s^3 - \beta T_s^2 - \gamma T_s) \} \end{aligned} \quad (5-6)$$

によって定義すれば

$$1 - \exp(-7) \doteq 0.999 \quad (5-7)$$

より、整定時間は次の3次方程式の解として得られる。

$$\alpha T_s^3 + \beta T_s^2 + \gamma T_s - 7 = 0 \quad (5-8)$$

ここで、 β 、 γ は初期状態を表すパラメータであるので、 α が規準軌道の収束速度を表

すパラメータになる。また、

$$x = x_0 + w (x_1 - x_0) / 100 \quad (5-9)$$

となる時間を $w\%$ 収束時間 (T_w) と呼ぶことにすれば、 T_w も同様に

$$\alpha T_w^3 + \beta T_w^2 + \gamma T_w + \ln(1 - w/100) = 0 \quad (5-10)$$

の解より得られる。

式 (5-1) で表される規準軌道において、特に初期状態が静止している場合 ($\dot{x}_0 = 0$ 、 $\ddot{x}_0 = 0$) は

$$\beta = \gamma = 0 \quad (5-11)$$

となり、規準軌道は次のように単純化される。

$$\begin{aligned} x &= x_0 + (x_1 - x_0) \{1 - \exp(-\alpha t^3)\} \\ &= f_0(x_0, x_1, \alpha) \end{aligned} \quad (5-12)$$

また、その時の整定時間及び $w\%$ 収束時間は

$$T_s = (7/\alpha)^{1/3} \quad (5-13)$$

$$T_w = \{-\ln(1 - w/100)/\alpha\}^{1/3} \quad (5-14)$$

より求められる。一例として静止初期状態を仮定し

$$x_0 = 0, \quad x_1 = 1, \quad \alpha = 7$$

とした時の規準軌道及びその速度、加速度を Fig. 5-3 に示す。

規準軌道として式 (5-1) で表される関数を用いる理由は、初期状態に応じた目標軌道の設定が自動的に行えるという点にある。すなわち、初期状態を予め知ることができない場合、まず静止初期状態を仮定して収束速度を表すパラメータである α の値を決め、次に初期状態を知った時点で式 (5-4)、(5-5) より β 、 γ を計算すれば、その初期状態に応じた目標軌道を自動的に設定することが可能になるということにある。この特徴は、両脚支持相において遊脚接地時の接地脚足首回りの角速度

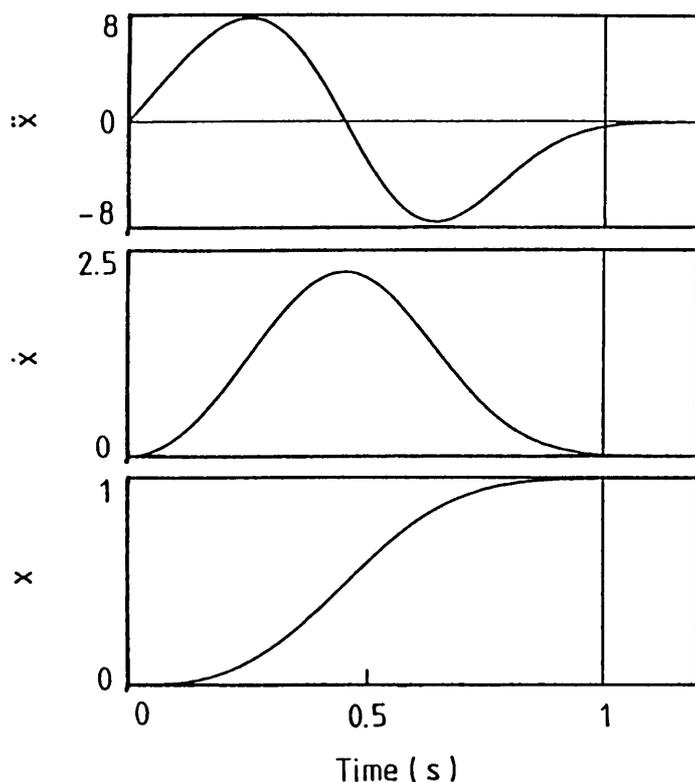


Fig.5-3 Elementary trajectory
($x_0=0, x_1=1, \alpha=7, \beta=\gamma=0$)

を利用した歩行パターンを設定を行う際、非常に重要な役割を果たしている。

5-3-2 基本歩行パターン

本論文では、屋内を歩行環境に想定しているため、基本歩行パターンとしては次の3種類のことを考慮すれば十分であると考えられる。

- (a) 平坦面
- (b) 配管環境
- (c) 段差

ここで、階段は段差の連続とみなし、斜面は段差の変形と考えることにする。

5-3-2-1 平坦面に対する基本歩行パターン

平坦面における定常歩行時の基本歩行パターンをFig.5-4に示す。(a)~(b)は両脚支持相を表し、(b)~(e)は単脚支持相を表している。

両脚支持相では遊脚接地時の接地脚足首回りの角速度(\dot{q}_1^{i1})を利用して、歩行パターンの高速化を図っている。また、その際に重心を進行方向に十分移動させるため、後脚膝(q_4)の曲げ動作も同時に行っている。従って、自由度が3である両脚支持相においては、前脚膝(q_2)を常に伸展状態に保持することを考慮し、 q_1 、 q_2 、 q_4 に対して目標軌道を与えることにする。

一方、単脚支持相においては支持脚足首回りに

$$T = M g l_0 \sin \psi \doteq M l_0 \psi g \quad (5-15)$$

$$\text{但し、} M = \sum_{i=1}^5 m_i$$

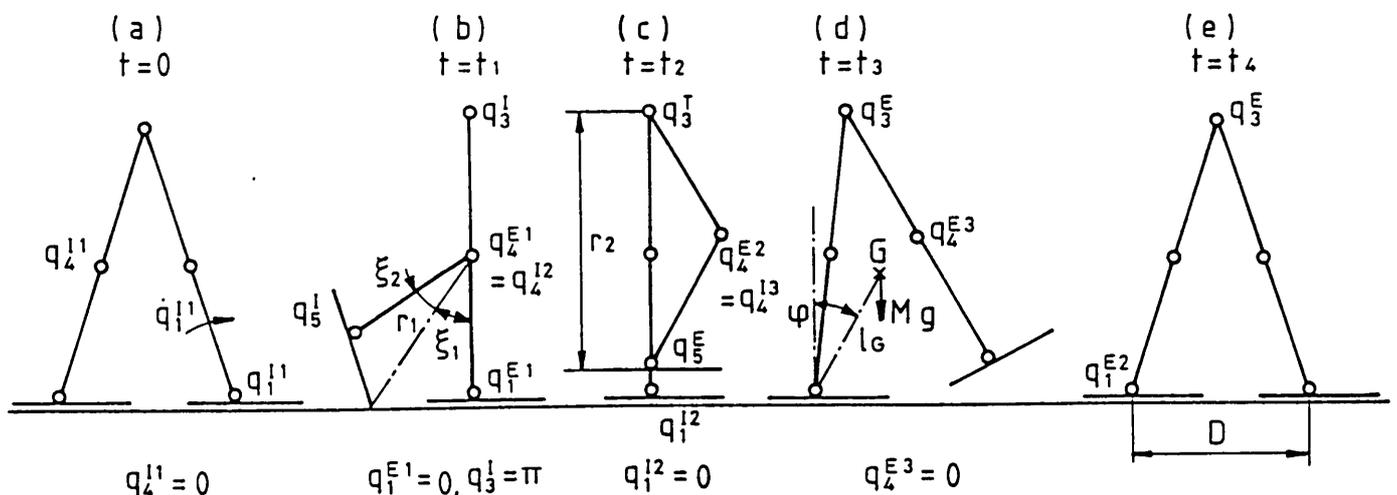


Fig.5-4 Basic walk-pattern for a flat plane

で表される重力によるトルクが作用している。そこで、この作用を考慮して支持脚足首 (q_1) の目標軌道は3次関数で与えるものとする。また、単脚支持相における腰 (q_3) 及び遊脚膝 (q_4)、遊脚足首 (q_5) に対する目標軌道は、遊脚を振り出す際に遊脚足部が途中で床面に接地しないよう、幾何学的条件を考慮して決定する。

以上の考え方にに基づき、各ジョイントの目標軌道を次のように設定する。

(I) 両脚支持相 ($0 \leq t \leq t_1$)

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= f(q_1^{I1}, q_1^{E1}, \alpha_1^d, \beta_1, \gamma_1) \\ q_2 &= 0 \\ q_4 &= f_0(q_4^{I1}, q_4^{E1}, \alpha_4^d) \end{aligned} \right\} (5-16)$$

(II) 単脚支持相 ($t_1 \leq t \leq t_4$)

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= \begin{cases} q_1^{E1} & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ q_1^{I2} + (q_1^{E2} - q_1^{I2}) \alpha_1^s t^3 & (t_2 \leq t \leq t_4) \end{cases} \\ q_2 &= 0 & (t_1 \leq t \leq t_4) \\ q_3 &= f_0(q_3^I, q_3^E, \alpha_3^s) & (t_1 \leq t \leq t_4) \\ q_4 &= \begin{cases} q_4^{E1} & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ f_0(q_4^{I2}, q_4^{E2}, \alpha_4^s) & (t_2 \leq t \leq t_4) \end{cases} \\ q_5 &= \begin{cases} f_0(q_5^I, q_5^E, \alpha_5^s) & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ -(\pi/2 + q_1 + q_2 + q_3 + q_4) & (t_2 \leq t \leq t_4) \end{cases} \end{aligned} \right\} (5-17)$$

ここで、 q_i^I は初期値、 q_i^E は整定値を表しており、 α の右肩添字 d 、 s は各々、両脚支持相、単脚支持相を表している。

次に式 (5-16)、(5-17) における目標軌道のパラメータ (q_i^I , q_i^E , α_i 等) 設定アルゴリズムを示す。

<ステップ1>

歩幅 (D)、歩速 (α_1^d , α_3^s) の決定。

<ステップ2> 整定値の計算

(I) Fig. 5-4 (e) より

$$q_1^{I1} = -q_1^{E2} = \sin^{-1} \{ 2(l_1 + l_2) / D \}$$

$$q_3^E = \pi - 2q_1^{E2}$$

(II) Fig. 5-4 (b) より

$$q_4^{E1} = q_4^{I2} = -(\xi_1 + \xi_2)$$

$$\xi_1 = \tan^{-1} \{ (D - l_5) / l_1 \}$$

$$\xi_2 = \cos^{-1} \{ (r_1^2 + l_4^2 - l_5^2) / (2 r_1 l_4) \}$$

$$r_1^2 = l_1^2 + (D - l_5)^2$$

(III) Fig. 5-4 (c) より

$$q_3^T = \cos^{-1} \{ (r_2^2 + l_3^2 - l_4^2) / (2 r_2 l_3) \}$$

$$q_5^E = -(\pi/2 + q_3^T + q_4^{I2})$$

$$r_2^2 = l_3^2 + l_4^2 - 2 l_3 l_4 \cos(\pi + q_4^{I2})$$

<ステップ3> 収束速度の計算

(I) $\beta_1, \gamma_1, \alpha_4^d$ の決定

$\ddot{q}_1^{I1} = 0$ と仮定すれば、式(5-4)、(5-5)より

$$\gamma_1 = \dot{q}_1^{E1} / (q_1^{E1} - q_1^{I1}), \quad \beta_1 = \gamma_1^2 / 2$$

となる。また t_1 は

$$\alpha_4^d t_1^3 + \beta_1 t_1^2 + \gamma_1 t_1 - 7 = 0$$

の解より求められる。従って

$$\alpha_4^d = 7 / t_1^3$$

となる。

(II) α_5^s の決定

$$\alpha_5^s = 7 \alpha_3^s / \{-\ln(1-w)\}$$

$$w = (q_3^T - q_3^I) / (q_3^E - q_3^I)$$

(III) α_4^s, α_1^s の決定

$$t_2 = \{-\ln(1-w) / \alpha_3^s\}^{1/3} + t_1$$

$$t_3 = (7 / \alpha_3^s)^{1/3} + t_1, \quad t_4 = t_3 + 0.1$$

但し、0.1は着地時の脚形状が決まってから着地するまでの余裕である。従って

$$\alpha_4^s = 7 / (t_3 - t_2)^3, \quad \alpha_1^s = 1 / (t_4 - t_2)^3$$

となる。

5-3-2-2 配管環境に対する基本歩行パターン(跨ぎ動作)

高さ h_1 の配管を越えるための基本歩行パターンをFig. 5-5に示す。ここで、(a) ~ (b)が両脚支持相であり、(b) ~ (g)が単脚支持相である。

本論文では、上体のない歩行ロボットを考えているので、両脚支持相において重心を

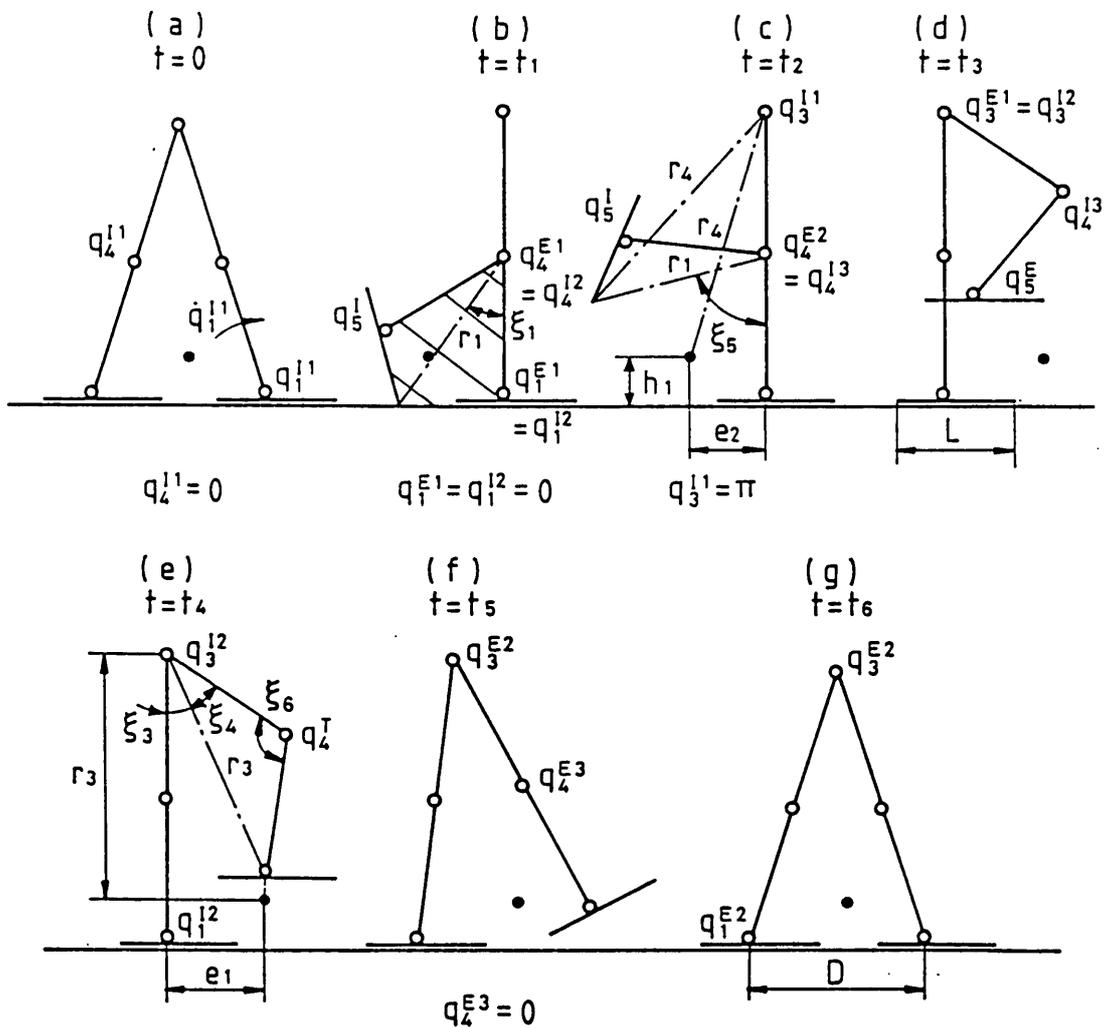


Fig.5-5 Basic walk-pattern for an obstacle as a pipe

進行方向に十分移動させるためには後脚膝 (q_4) の曲げ動作が必要になる。従って、配管の存在領域はFig.5-5 (b) に示す斜線部に制限するものとした。このような制限をおけば、両脚支持相の歩行パターンは平坦面における両脚支持相の歩行パターンをそのまま使用できることになる。一方、単脚支持相の歩行パターンは、遊脚を振り出す際に配管に接触しないよう、幾何学的条件 (Fig.5-5 (c)、(e)) を考慮して決定する。

以上の考え方にに基づき、各ジョイントの目標軌道を次のように設定する。

(I) 両脚支持相 ($0 \leq t \leq t_1$)

$$\left. \begin{aligned}
 q_1 &= f(q_1^{I1}, q_1^{E1}, \alpha_1^d, \beta_1, \gamma_1) \\
 q_2 &= 0 \\
 q_4 &= f_0(q_4^{I1}, q_4^{E1}, \alpha_4^d)
 \end{aligned} \right\} (5-18)$$

(II) 単脚支持相 ($t_1 \leq t \leq t_6$)

$$\left. \begin{aligned}
 q_1 &= \begin{cases} q_1^{E1} & (t_1 \leq t \leq t_4) \\ q_1^{I2} + (q_1^{E2} - q_1^{I2}) \alpha_1^s t^3 & (t_4 \leq t \leq t_6) \end{cases} \\
 q_2 &= 0 & (t_1 \leq t \leq t_6) \\
 q_3 &= \begin{cases} q_3^{I1} & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ f_0(q_3^{I1}, q_3^{E1}, \alpha_3^{s1}) & (t_2 \leq t \leq t_3) \\ q_3^{E1} & (t_3 \leq t \leq t_4) \\ f_0(q_3^{I2}, q_3^{E2}, \alpha_3^{s2}) & (t_4 \leq t \leq t_6) \end{cases} \\
 q_4 &= \begin{cases} f_0(q_4^{I2}, q_4^{E2}, \alpha_4^{s1}) & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ q_4^{E2} & (t_2 \leq t \leq t_3) \\ f_0(q_4^{I3}, q_4^{E3}, \alpha_4^{s2}) & (t_3 \leq t \leq t_6) \end{cases} \\
 q_5 &= \begin{cases} q_5^I & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ f_0(q_5^I, q_5^E, \alpha_5^s) & (t_2 \leq t \leq t_3) \\ -(\pi/2 + q_1 + q_2 + q_3 + q_4) & (t_3 \leq t \leq t_6) \end{cases}
 \end{aligned} \right\} (5-19)$$

次に式(5-18)、(5-19)における目標軌道のパラメータ設定アルゴリズムを示す。

<ステップ1>

- (I) 配管の高さ(h_1)、歩幅(D)の決定
- (II) 歩速(α_1^d , α_3^{s1} , α_3^{s2})の決定。

<ステップ2> 整定値の計算

- (I) Fig.5-5(g)より

$$\begin{aligned}
 q_1^{I1} &= -q_1^{E2} = \sin^{-1} \{ 2(l_1 + l_2) / D \} \\
 q_3^{E2} &= \pi - 2q_1^{E2}
 \end{aligned}$$

- (II) Fig.5-5(e)より

$$\begin{aligned}
 q_3^{E1} &= q_3^{I2} = \pi + \xi_3 + \xi_4, \quad q_4^I = -\pi + \xi_6 \\
 q_5^E &= -(\pi/2 + q_1^{I2} + q_3^{I2} + q_4^{I3})
 \end{aligned}$$

$$\xi_3 = \sin^{-1}(e_1 / r_3)$$

$$\xi_4 = \cos^{-1} \{ (r_3^2 + l_3^2 - l_4^2) / (2r_3l_3) \}$$

$$\xi_6 = \cos^{-1} \{ (l_3^2 + l_4^2 - r_3^2) / (2l_3l_4) \}$$

$$e_1 = l_5 + (D - L) / 2, \quad r_3 = l_1 + l_2 - h_1$$

- (III) Fig.5-5(c)より

$$q_4^{E2} = q_4^{I3} = -(\pi - \xi_5 + \xi_1)$$

$$\xi_5 = \tan^{-1}(r_6 / r_5)$$

$$r_4^2 = (l_1 + l_2 - h_1)^2 + e_2^2, \quad e_2 = D - e_1$$

$$r_5 = (r_4^2 - r_1^2 - l_2^2) / (2l_2), \quad r_6^2 = r_1^2 - r_5^2$$

<ステップ3> 収束速度の計算

(I) $\beta_1, \gamma_1, \alpha_4^d$ の決定

$\ddot{q}_{11} = 0$ と仮定すれば、式(5-4)、(5-5)より

$$\gamma_1 = \dot{q}_{11} / (q_{1E1} - q_{11}), \quad \beta_1 = \gamma_1^2 / 2$$

となる。また t_1 は

$$\alpha_4^d t_1^3 + \beta_1 t_1^2 + \gamma_1 t_1 - 7 = 0$$

の解より求められる。従って

$$\alpha_4^d = 7 / t_1^3$$

となる。

(II) α_4^{s2} の決定

$$7 / \alpha_4^{s2} = \{ 7^{1/3} - (-1 \ln(1-w))^{1/3} \}^3 / \alpha_4^{s2}$$

$$w = (q_4^T - q_4^{I2}) / (q_4^{E2} - q_4^{I2})$$

(III) α_1^s, α_5^s の決定

$$\alpha_1^s = 1 / \{ (7 / \alpha_4^{s2})^{1/3} + 0.1 \}^3, \quad \alpha_5^s = \alpha_3^{s1}$$

5-3-2-3 段差(上り)に対する基本歩行パターン

平坦面や配管環境に対する歩行パターンの場合は、遊脚接地時に両膝が伸展状態にあるため、歩幅を決めれば脚形状は一意に定まる。しかし、段差(上り)の場合、遊脚接地時にはFig.5-6に示すような閉ループ4リンク状態にあるため、 $\delta_1 \sim \delta_4$ のうち何れか1つの角度を定めなければ脚形状は決定できない。そのため、仮想平坦面という概念を導入する。段差(上り)の場合、支持脚接地面を仮想平坦面と定義し、実際の歩幅 D (P_0P_1)を仮想平坦面上に投影したものを D' (P_0P_1')とおき、仮想平坦面上で歩幅 D' の歩行を行う際の支持脚倒れ込み角(δ_1')を遊脚接地時の δ_1

$$\delta_1 = \delta_1' = \cos^{-1}(2(l_1 + l_2)/D')$$

$$D' = \overline{P_0P_1'}$$

$$D = \overline{P_0P_1}$$

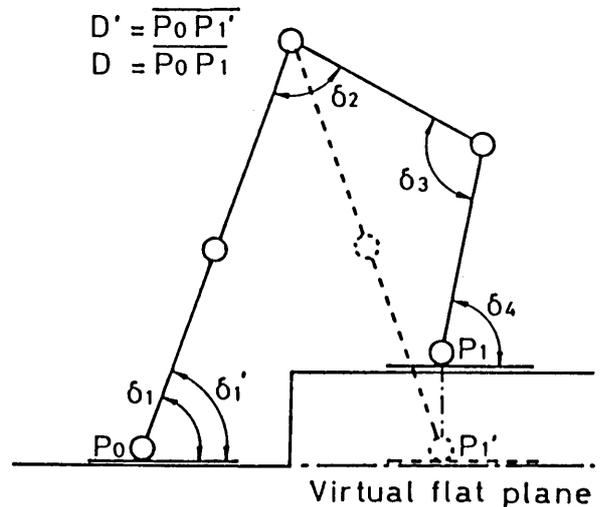


Fig.5-6 Virtual flat plane for an up stair

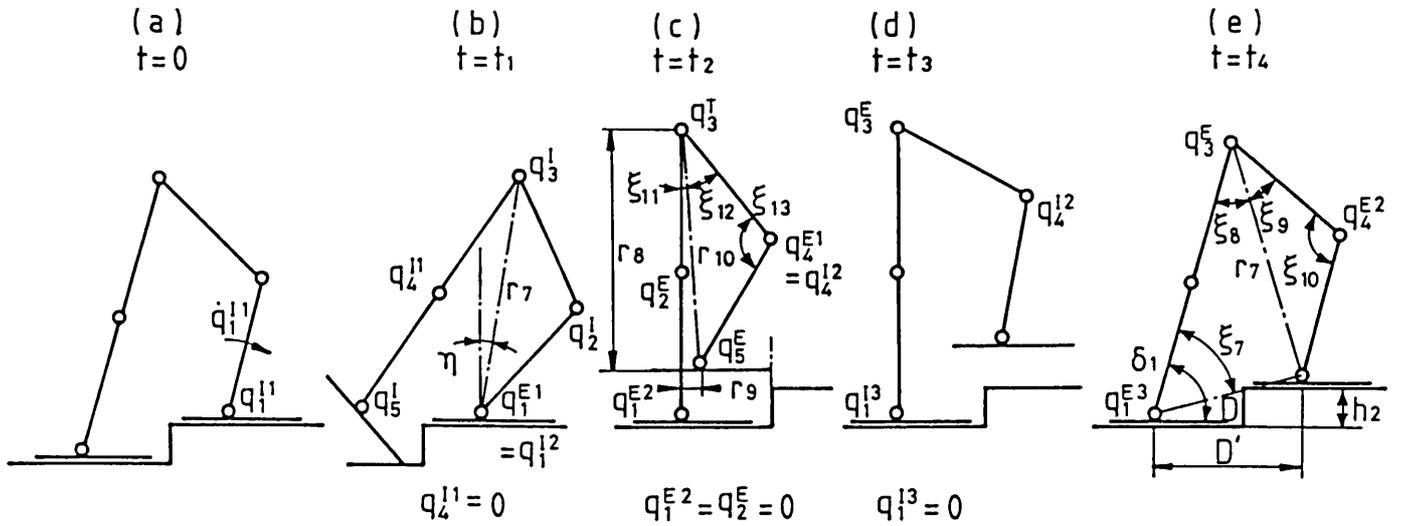


Fig.5-7 Basic walk-pattern for an up stair

とおくことにより遊脚接地時の脚形状を決定する (Fig.5 - 6)。

高さ h_2 の段差 (上り) に対する基本歩行パターンを Fig.5 - 7 に示す。ここで、(a) ~ (b) が両脚支持相であり、(b) ~ (e) が単脚支持相である。

両脚支持相では、重心が十分進行方向に移動するように、腰部ジョイントと前脚足首ジョイントの成す線分が鉛直軸から η の角度に達するまで蹴り動作を行う (Fig.5 - 7 (b))。但し、前脚及び後脚の膝 (q_2, q_4) は遊脚接地時の角度を保持しておくものとする。一方、単脚支持相の歩行パターンは、遊脚を振り出す際、段差に接触しないように幾何学的条件 (Fig.5 - 7 (c)) を考慮して決定する。

以上の考え方にに基づき、各ジョイントの目標軌道を次のように設定する。

(I) 両脚支持相 ($0 \leq t \leq t_1$)

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= f(q_1^{I1}, q_1^{E1}, \alpha_1^d, \beta_1, \gamma_1) \\ q_2 &= q_2^I \\ q_4 &= q_4^{I1} \end{aligned} \right\} (5-20)$$

(II) 単脚支持相 ($t_1 \leq t \leq t_4$)

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= \begin{cases} f_0(q_1^{I2}, q_2^{E2}, \alpha_1^{s1}) & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ q_1^{E2} & (t_2 \leq t \leq t_3) \\ q_1^{I3} + (q_1^{E3} - q_1^{I3}) \alpha_1^{s2} t^3 & (t_3 \leq t \leq t_4) \end{cases} \\ q_2 &= \begin{cases} f_0(q_2^I, q_2^E, \alpha_2^s) & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ q_2^E & (t_2 \leq t \leq t_4) \end{cases} \\ q_3 &= f_0(q_3^I, q_3^E, \alpha_3^s) & (t_1 \leq t \leq t_4) \end{aligned} \right\} (5-21)$$

$$\left. \begin{aligned}
 q_4 &= \begin{cases} f_0(q_4^{11}, q_4^{E1}, \alpha_4^{s1}) & (t_1 \leq t \leq t_2) \\
 q_4^{E1} & (t_2 \leq t \leq t_3) \\
 f_0(q_4^{12}, q_4^{E2}, \alpha_4^{s2}) & (t_3 \leq t \leq t_4) \end{cases} \\
 q_5 &= \begin{cases} f_0(q_5^1, q_5^E, \alpha_5^s) & (t_1 \leq t \leq t_2) \\
 -(\pi/2 + q_1 + q_2 + q_3 + q_4) & (t_2 \leq t \leq t_4) \end{cases}
 \end{aligned} \right\}$$

次に式(5-20)、(5-21)における目標軌道のパラメータ設定アルゴリズムを示す。

<ステップ1>

- (I) 段差の高さ(h₂)、仮想平坦面上における歩幅(D')
- (II) 歩速(α_{1^d}, α_{3^s}, α_{4^{s2}})の決定。

<ステップ2> 整定値の計算

(I) Fig.5-7(e)より

$$\begin{aligned}
 q_1^{E3} &= -\pi/2 + \delta_1, \quad q_3^E = \pi + \xi_8 + \xi_9, \quad q_4^{E2} = -\pi + \xi_{10} \\
 \delta_1 &= \cos^{-1} \{ 2(l_1 + l_2) / D' \} \\
 \xi_8 &= \cos^{-1} \{ ((l_1 + l_2)^2 + r_7^2 - D^2) \\
 &\quad / (2r_7(l_1 + l_2)) \} \\
 \xi_9 &= \cos^{-1} \{ (r_7^2 + l_3^2 - l_4^2) / (2r_7l_3) \} \\
 \xi_{10} &= \cos^{-1} \{ (l_3^2 + l_4^2 - r_7^2) / (2l_3l_4) \} \\
 D^2 &= D'^2 + h_2^2, \quad \xi_7 = \delta_1 - \tan^{-1}(h_2 / D') \\
 r_7^2 &= (l_1 + l_2)^2 + D^2 - 2D(l_1 + l_2) \cos \xi_7
 \end{aligned}$$

(II) Fig.5-7(c)より

$$\begin{aligned}
 q_3^I &= \pi + \xi_{11} + \xi_{12}, \quad q_4^{E2} = -\pi + \xi_{13} \\
 q_5^E &= -(\pi/2 + q_3^I + q_4^{E1}) \\
 \xi_{11} &= \cos^{-1} \{ (r_8^2 + r_{10}^2 - r_9^2) / (2r_8r_{10}) \} \\
 \xi_{12} &= \cos^{-1} \{ (r_{10}^2 + l_3^2 - l_4^2) / (2r_{10}l_3) \} \\
 \xi_{13} &= \cos^{-1} \{ (l_3^2 + l_4^2 - r_{10}^2) / (2l_3l_4) \} \\
 r_8 &= l_1 + l_2 - h_2 - 0.05, \quad r_9 = (D' - L) / 2 - l_5 \\
 r_{10}^2 &= r_8^2 + r_9^2
 \end{aligned}$$

(III) Fig.5-7(b)より

$$q_1^{E1} = -(\eta - \xi_9 - \xi_{10} + \pi)$$

但し、ηは重心が十分前脚足部に移動するよう考慮して決める。

<ステップ3> 収束速度の計算

(I) $\beta_1, \gamma_1, \alpha_4^d$ の決定

$\ddot{q}_1^{11} = 0$ と仮定すれば、式(5-4)、(5-5)より

$$\gamma_1 = \dot{q}_1^{11} / (q_1^{E1} - q_1^{11}), \quad \beta_1 = \gamma_1^2 / 2$$

となる。また t_1 は

$$\alpha_4^d t_1^3 + \beta_1 t_1^2 + \gamma_1 t_1 - 7 = 0$$

の解より求められる。従って

$$\alpha_4^d = 7 / t_1^3$$

となる。

(II) $\alpha_2^s, \alpha_4^{s1}, \alpha_5^s$ の決定

$$\alpha_2^s = \alpha_4^{s1} = \alpha_5^s = 7 \alpha_3^s / \{-1 \ln(1-w)\}$$

$$w = (q_3^T - q_3^1) / (q_3^E - q_3^1)$$

(III) α_1^{s2} の決定

$$\alpha_1^{s2} = 1 / \{(7 / \alpha_4^{s2})^{1/3} + 0.1\}^3$$

5-3-2-4 段差(下り)に対する基本歩行パターン

段差(下り)の場合も段差(上り)の場合と同様、遊脚接地時の脚形状を決定するため、Fig.5-8に示すような仮想平坦面を定義する。但し、段差(下り)の場合は遊脚接地面を仮想平坦面とし、遊脚の傾き角(δ_4)よりその脚形状を決定する。

高さ h_3 の段差(下り)に対する基本歩行パターンをFig.5-9に示す。ここで、(a)~(b)が両脚支持相であり、(b)~(e)が単脚支持相である。

両脚支持相では前脚が垂直($q_1 = 0$)になるまで蹴り動作を行う(Fig.5-9(b))。但し、前脚及び後脚の膝(q_2, q_4)は遊脚接地時の角度を保持しておくものとする。一方、単脚支持相の歩行パターンは遊脚を振り出す際、段差に接触しないように幾何学的条件(Fig.5-9(c),(d))を考慮して決定する。

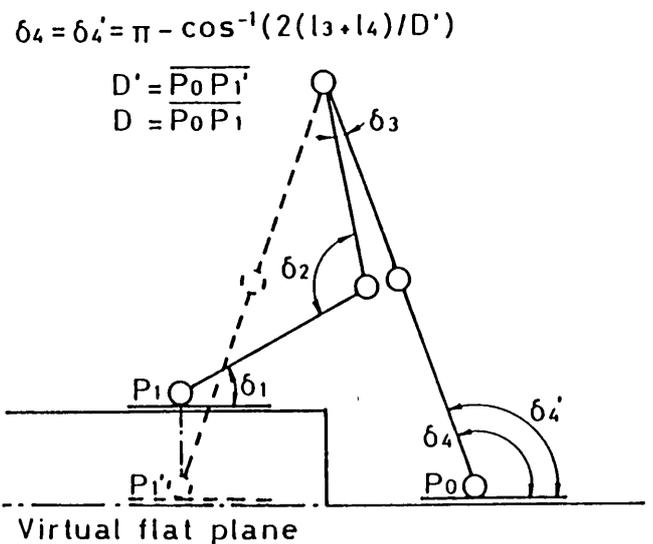


Fig.5-8 Virtual flat plane for a down stair

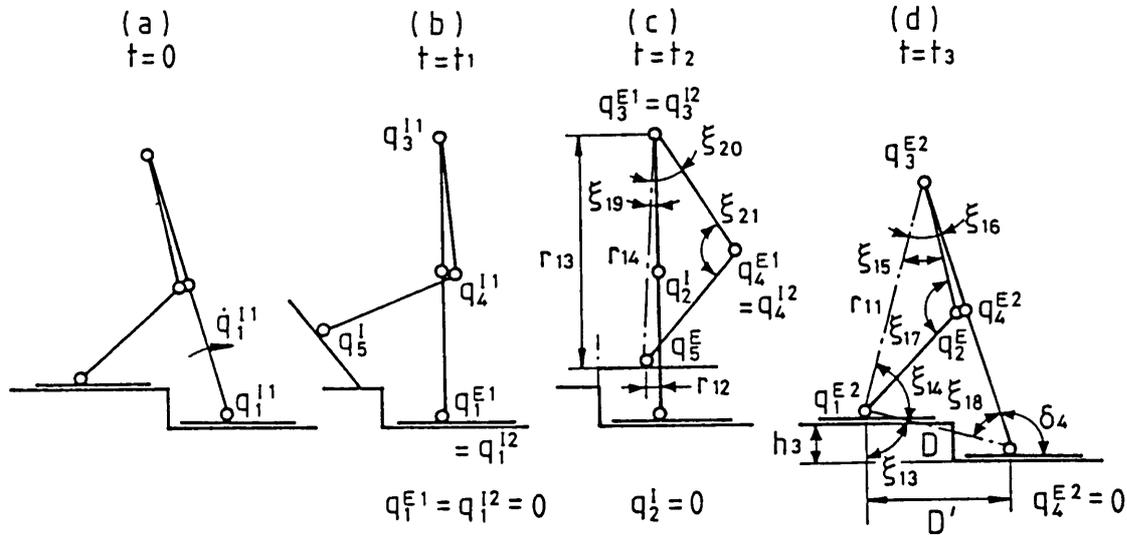


Fig.5-9 Basic walk-pattern for a down stair

以上の考え方にに基づき、各ジョイントの目標軌道を次のように設定する。

(I) 両脚支持相 ($0 \leq t \leq t_1$)

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= f(q_1^{i1}, q_1^{E1}, \alpha_1^d, \beta_1, \gamma_1) \\ q_2 &= q_2^i \\ q_4 &= q_4^{i1} \end{aligned} \right\} (5-22)$$

(II) 単脚支持相 ($t_1 \leq t \leq t_3$)

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= \begin{cases} q_1^{E1} & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ q_1^{i2} + (q_1^{E2} - q_1^{i2}) \alpha_1^s t^3 & (t_2 \leq t \leq t_3) \end{cases} \\ q_2 &= \begin{cases} q_2^i & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ f_0(q_2^i, q_2^E, \alpha_2^s) & (t_2 \leq t \leq t_3) \end{cases} \\ q_3 &= \begin{cases} f_0(q_3^{i1}, q_3^{E1}, \alpha_3^{s1}) & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ f_0(q_3^{i2}, q_3^{E2}, \alpha_3^{s2}) & (t_2 \leq t \leq t_3) \end{cases} \\ q_4 &= \begin{cases} f_0(q_4^{i1}, q_4^{E1}, \alpha_4^{s1}) & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ f_0(q_4^{i2}, q_4^{E2}, \alpha_4^{s2}) & (t_2 \leq t \leq t_3) \end{cases} \\ q_5 &= \begin{cases} f_0(q_5^i, q_5^E, \alpha_5^s) & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ -(\pi/2 + q_1 + q_2 + q_3 + q_4) & (t_2 \leq t \leq t_3) \end{cases} \end{aligned} \right\} (5-23)$$

次に式(5-22)、(5-23)における目標軌道のパラメータ設定アルゴリズムを示す。

<ステップ1>

- (I) 段差の高さ (h_3)、仮想平坦面上における歩幅 (D') の決定
- (II) 歩速 (α_1^d , α_3^{s1} , α_3^{s2}) の決定。

<ステップ2> 整定値の計算

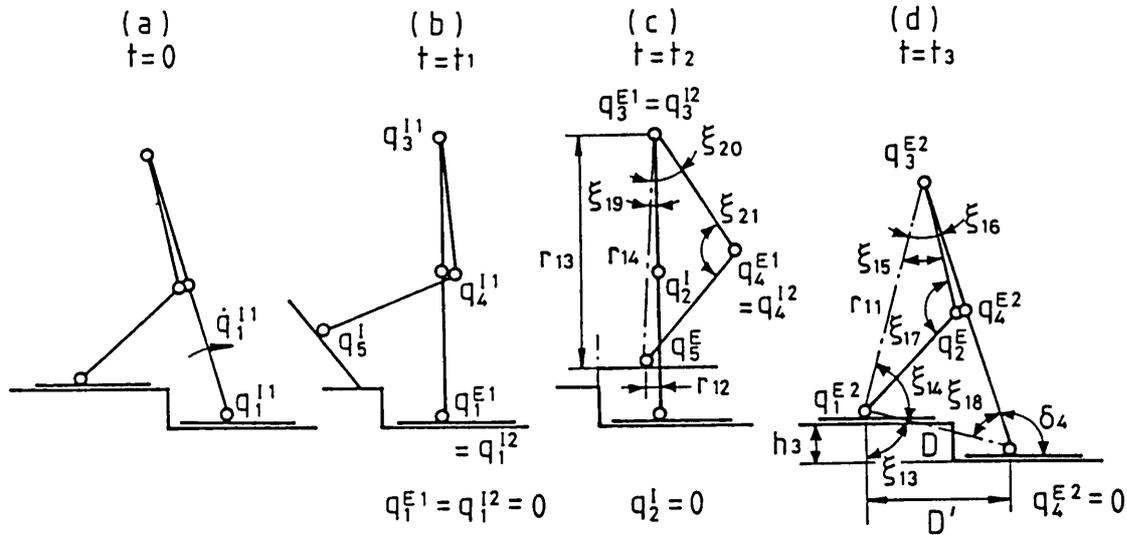


Fig.5-9 Basic walk-pattern for a down stair

以上の考え方にに基づき、各ジョイントの目標軌道を次のように設定する。

(I) 両脚支持相 ($0 \leq t \leq t_1$)

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= f(q_1^{11}, q_1^{E1}, \alpha_1^d, \beta_1, \gamma_1) \\ q_2 &= q_2^1 \\ q_4 &= q_4^{11} \end{aligned} \right\} (5-22)$$

(II) 単脚支持相 ($t_1 \leq t \leq t_3$)

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= \begin{cases} q_1^{E1} & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ q_1^{12} + (q_1^{E2} - q_1^{12}) \alpha_1^s t^3 & (t_2 \leq t \leq t_3) \end{cases} \\ q_2 &= \begin{cases} q_2^1 & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ f_0(q_2^1, q_2^E, \alpha_2^s) & (t_2 \leq t \leq t_3) \end{cases} \\ q_3 &= \begin{cases} f_0(q_3^{11}, q_3^{E1}, \alpha_3^{s1}) & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ f_0(q_3^{12}, q_3^{E2}, \alpha_3^{s2}) & (t_2 \leq t \leq t_3) \end{cases} \\ q_4 &= \begin{cases} f_0(q_4^{11}, q_4^{E1}, \alpha_4^{s1}) & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ f_0(q_4^{12}, q_4^{E2}, \alpha_4^{s2}) & (t_2 \leq t \leq t_3) \end{cases} \\ q_5 &= \begin{cases} f_0(q_5^1, q_5^E, \alpha_5^s) & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ -(\pi/2 + q_1 + q_2 + q_3 + q_4) & (t_2 \leq t \leq t_3) \end{cases} \end{aligned} \right\} (5-23)$$

次に式(5-22)、(5-23)における目標軌道のパラメータ設定アルゴリズムを示す。

<ステップ1>

- (I) 段差の高さ (h_3)、仮想平坦面上における歩幅 (D') の決定
- (II) 歩速 ($\alpha_1^d, \alpha_3^{s1}, \alpha_3^{s2}$) の決定。

<ステップ2> 整定値の計算

(I) Fig. 5-9 (d) より

$$q_1^{E2} = \xi_{13} + \xi_{14} - \pi, \quad q_2^{E2} = -\pi + \xi_{17}, \quad q_3^{E2} = \pi + \xi_{16} - \xi_{15}$$

$$\delta_4 = \cos^{-1} \{ 2 (l_3 + l_4) / D' \}$$

$$\xi_{13} = \tan^{-1} (D' / h_3)$$

$$\xi_{14} = \cos^{-1} \{ (D^2 + r_{11}^2 - (l_3 + l_4)^2) / (2 D r_{11}) \}$$

$$\xi_{16} = \cos^{-1} \{ (r_{11}^2 + (l_3 + l_4)^2 - D^2) / (2 r_{11} (l_3 + l_4)) \}$$

$$\xi_{15} = \cos^{-1} \{ (r_{11}^2 + l_2^2 - l_1^2) / (2 r_{11} l_2) \}$$

$$\xi_{17} = \cos^{-1} \{ (l_1^2 + l_2^2 - r_{11}^2) / (2 l_1 l_2) \}$$

$$D^2 = D'^2 + h_3^2$$

$$r_{11}^2 = (l_3 + l_4)^2 + D^2 - 2 D (l_3 + l_4) \cos \xi_{18}$$

$$\xi_{18} = \pi - \delta_4 - \tan^{-1} (h_3 / D')$$

(II) Fig. 5-9 (c) より

$$q_3^{E1} = \pi - \xi_{19} + \xi_{20}, \quad q_4^{E1} = -\pi + \xi_{21}$$

$$q_5^E = -(\pi / 2 + q_3^{E1} + q_4^{E1})$$

$$\xi_{19} = \tan^{-1} (r_{12} / r_{13})$$

$$\xi_{20} = \cos^{-1} \{ (r_{14}^2 + l_3^2 - l_4^2) / (2 r_{14} l_3) \}$$

$$\xi_{21} = \cos^{-1} \{ (l_3^2 + l_4^2 - r_{14}^2) / (2 l_3 l_4) \}$$

$$r_{13} = l_1 + l_2 - h_3 - 0.05, \quad r_{12} = (D' - L) / 2 + l_5$$

$$r_{14}^2 = r_{12}^2 + r_{13}^2$$

<ステップ3> 収束速度の計算

(I) $\beta_1, \gamma_1, \alpha_4^d$ の決定

$$\ddot{q}_1^{11} = 0 \text{ と仮定すれば、式 (5-4)、(5-5) より}$$

$$\gamma_1 = \dot{q}_1^{11} / (q_1^{E1} - q_1^{11}), \quad \beta_1 = \gamma_1^2 / 2$$

となる。また t_1 は

$$\alpha_4^d t_1^3 + \beta_1 t_1^2 + \gamma_1 t_1 - 7 = 0$$

の解より求められる。従って

$$\alpha_4^d = 7 / t_1^3$$

となる。

(II) $\alpha_2^s, \alpha_4^{s1}, \alpha_5^s$ の決定

$$\alpha_2^s = \alpha_3^{s2}, \quad \alpha_4^{s1} = \alpha_5^s = \alpha_3^{s1}$$

(III) $\alpha_1^s, \alpha_4^{s2}$ の決定

$$\alpha_1^s = 1 / \{ (7 / \alpha_3^{s2})^{1/3} + 0.1 \}^3$$

$$\alpha_4^{s2} = 7 / \{ (7 / \alpha_3^{s2})^{1/3} - 0.1 \}^3$$

5-3-3 歩行パターン生成法

歩行パターンは、前項で述べた基本歩行パターンを適当に調節し、更にそれらを組み合わせることにより生成していくことにする。このような方法を用いた場合、次に示す利点を得られる。

(1) 類似した環境（例えば、平坦面において歩幅が異なる場合や、段差において高さが異なる場合等）に対する歩行パターンを一つの歩行パターンとしてまとめて考えることができる。

(2) (1)との関係において、基本歩行パターンの調節（例えば、平坦面において歩幅を変更する場合など）は目標軌道のパラメータ設定アルゴリズムにおける<ステップ1>のパラメータを変更するだけで自動的に行うことが可能になる。

(3) 基本歩行パターン間の移行（例えば、平坦面→配管環境等）は単脚支持相の歩行パターンを適当に調節するだけで簡単に行うことができる。

従って、歩行計画レベル（レベル2）において、周囲の環境に応じどの基本歩行パターンを選択し、目標軌道パラメータ設定アルゴリズムにおける<ステップ1>のパラメータをどのような値にするかということを決めておけば、歩行パターン生成レベル（レベル3）では目標軌道パラメータ設定アルゴリズムを実行するだけで簡単に環境に応じた歩行パターンを生成することが可能になる。

5-3-4 力学的制約条件

前項までは歩行パターンの生成法について述べてきたが、次に問題になることは生成した歩行パターンが実現可能かどうかということである。本論文では、3章、4章で述べてきたように二足歩行ロボットの足部が床面に固定されていないために生じる力学的制約条件を基準にして歩行実現性問題を考えていくことにする。すなわち、歩行パター

ンは次に示す力学的制約条件を満たしている必要がある。

- (1) 支持脚足部（前脚足部）がかかともしくはつまさき回りに回転しない。

$$-N_1 w_1 < u_1 < N_1 w_2 \quad (5-24)$$

- (2) 支持脚足部（両脚足部）が床面から離れない。

$$N_1 > 0, \quad (N_6 > 0) \quad (5-25)$$

- (3) 支持脚足部（両脚足部）が床面上を滑らない。

$$|F_1 / N_1| < \mu_{max}, \quad (|F_6 / N_6| < \mu_{max}) \quad (5-26)$$

μ_{max} : 足部と床面との間の最大静止摩擦係数

但し、両脚支持相の時は括弧内を含む。

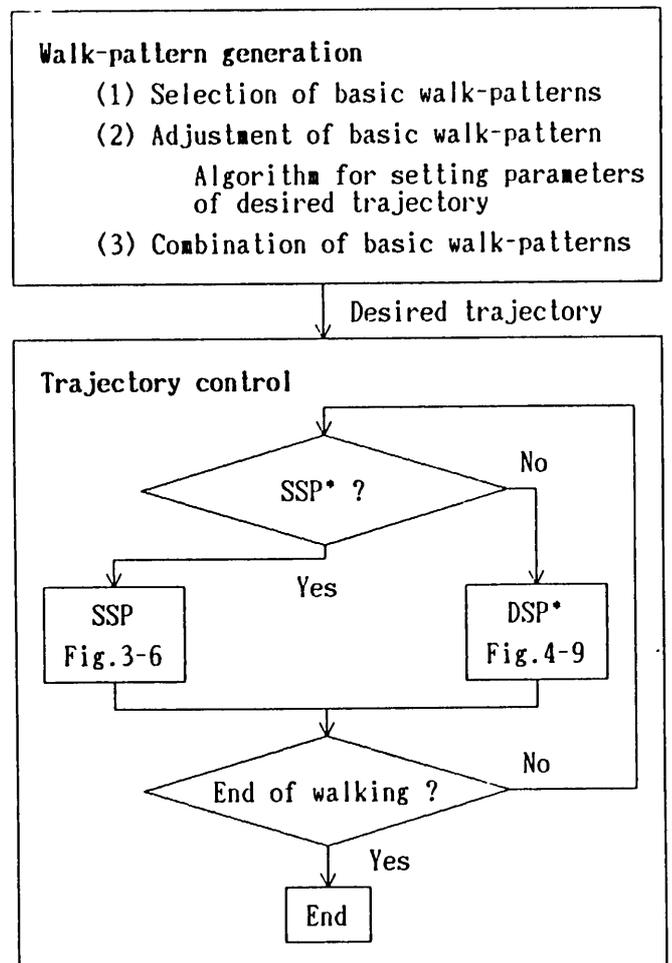
このようにして歩行実現性問題を考えた場合、基本歩行パターンに対して予め力学解析を行うことにより、その基本歩行パターンに対する歩行限界条件を求めておくことが可能になる。そこで、これらの条件をデータベースとして歩行計画レベル（レベル2）に蓄えておけば、歩行計画を立てる際、簡単に実現可能な歩行パターンを選ぶことができ、歩行パターン生成レベル（レベル3）では歩行実現性問題に関して全く考慮する必要がなくなる。従って、この点からも歩行パターン生成法の簡易化を図ることができる。

5-4 歩行実験

2章で述べた歩行ロボットと実験システムを用いて歩行実験を行う。また、各ジョイントの軌道制御には3章、4章で述べた動的制御⁴⁾を用いており、制御系のフローチャートはFig.5-10に示す。

歩行実験の結果、歩幅0.3m、1歩約

1. 5秒の平坦面動歩行、歩幅0.3m、
1歩約2.8秒の配管環境 ($h_1 = 0.1m$)
に対する歩行、歩幅0.25m、1歩約



SSP : Single-leg Supporting Phase
DSP : Double-legs Supporting Phase

Fig.5-10 Algorithm of the lower level adaptive walking

3. 3秒の段差（上り： $h_2 = 0.05\text{ m}$ ）に対する歩行、歩幅 0.25 m 、1歩約
1.9秒の段差（下り： $h_3 = 0.05\text{ m}$ ）に対する歩行、及びこれらを組み合わせた環境に対する歩行と平坦面動歩行時の歩行途中における歩幅の変更を実現した。実験結果はFig.5-11(a)～(o)に示す。Fig.5-11(a)は平坦面における歩行結果を示しており、同(b)は平坦面において歩行途中で歩幅を変更した場合の歩行結果を示している。同図(c)、(d)、(e)はそれぞれ配管環境、段差（上り）、段差（下り）における歩行結果を示しており、同図(f)、(g)は階段（段差の連続）の上り、下りに対する歩行結果を示している。同図(h)、(i)は平坦面と配管環境を組み合わせた環境における歩行結果を示しており、同図(j)～(o)は平坦面、配管環境、段差を組み合わせた環境における歩行結果を示している。

これらの実験において、目標歩幅からの偏差がジョイントの軌道制御の場合に比べ比較的大きいものとなった。これは、軌道制御が歩幅に対してではなく各ジョイントに対して行なわれているため、歩行開始時に正確な直立状態が確保されていないことによる誤差から生じているものと考えられる。

5-5 おわりに

本章では、二足歩行ロボットによる下位レベル適応歩行を実現するための歩行パターン生成法として、次の考え方に基づく簡易化した歩行パターン生成法を提案した。

- (1) 代表的な環境に対して設定した基本歩行パターンを適当に調節し、更にそれらを組み合わせることにより種々の歩行パターンを生成する。
- (2) 基本歩行パターンは直接ジョイントに対する軌道として設定する。
- (3) 単脚支持相における支持脚足首の軌道は重力の作用を考慮して設定し、両脚支持相では遊脚接地時の接地脚足首回りの角速度を利用する。
- (4) 歩行パターンの実現可能性問題は系に付加される力学的制約条件によって判定する。

また、様々な環境に対する歩行実験を行うことにより、この簡易化した歩行パターン生成法の有効性を示し、平坦面、配管環境、段差（上り、下り）及びこれらを組み合わせた環境における矢状面内での下位レベル適応歩行を実現した。

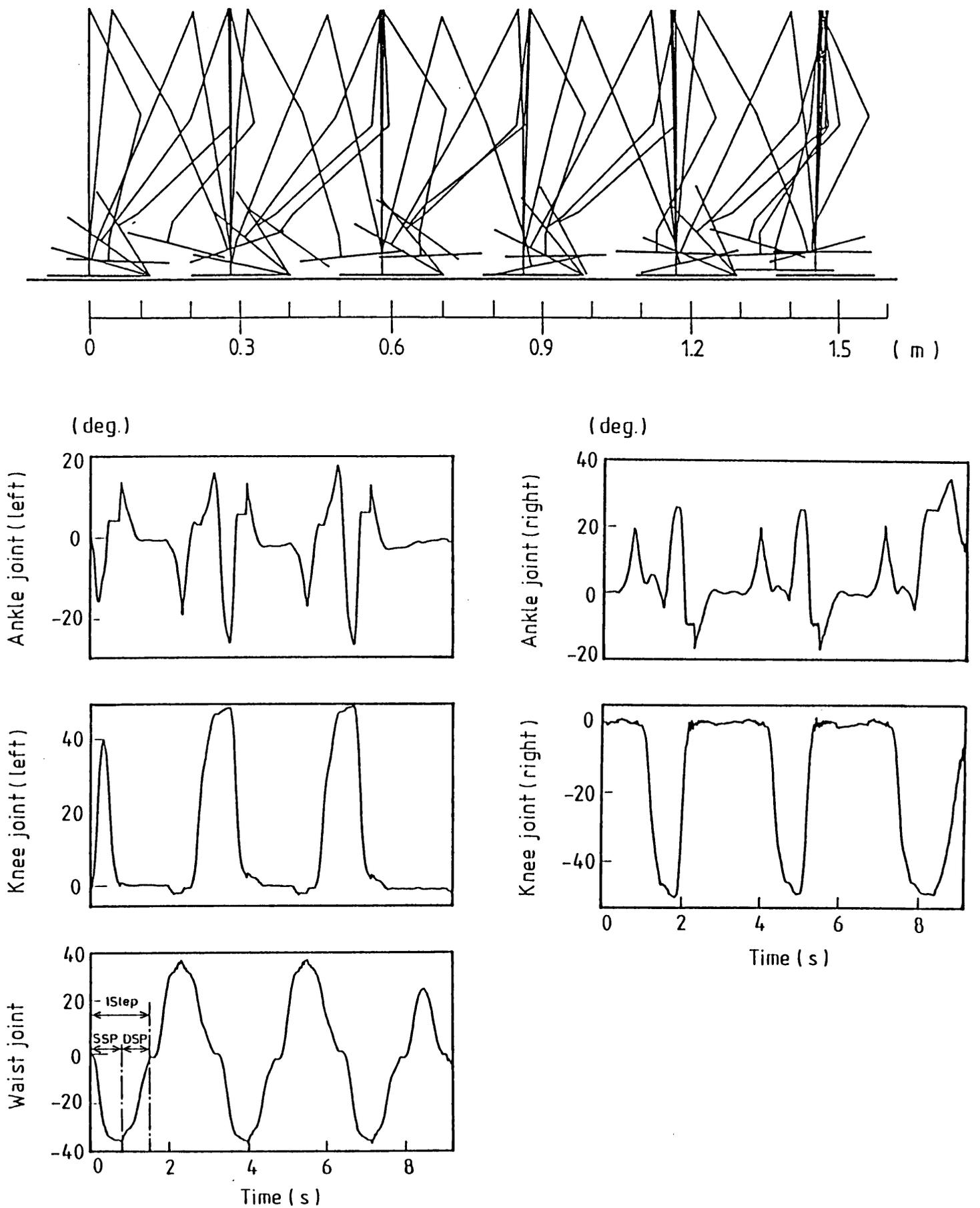


Fig.5-11 Results on walking experiments in various environments

(a) A flat plane (about 1.5s per a step, $D=0.3\text{m}$, stick interval= 0.3s)

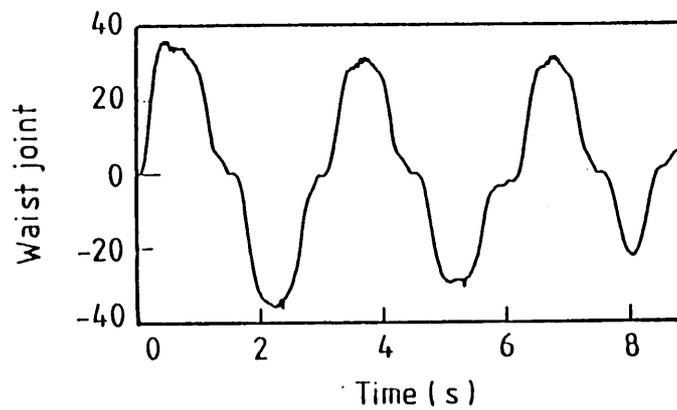
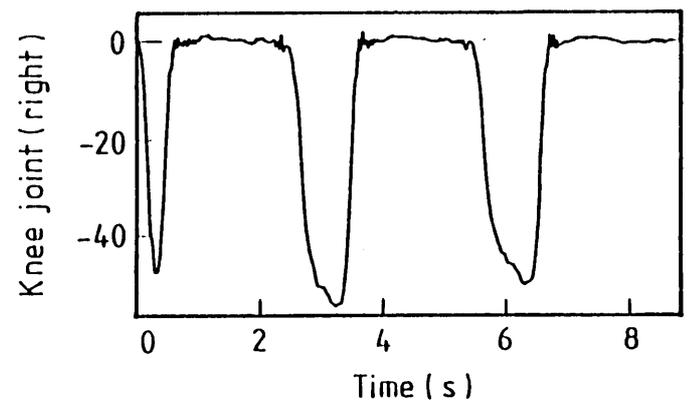
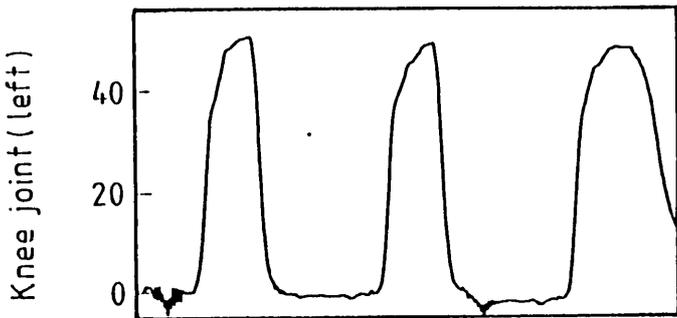
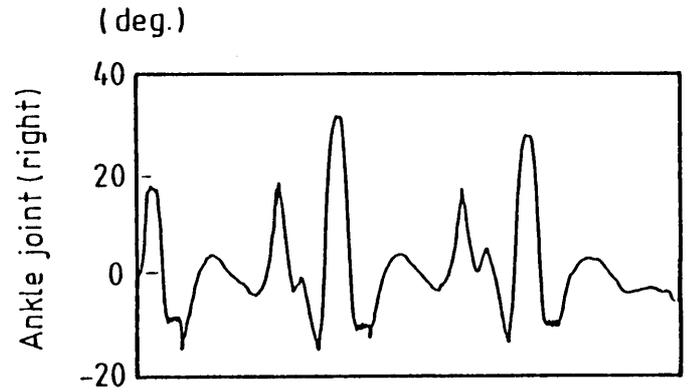
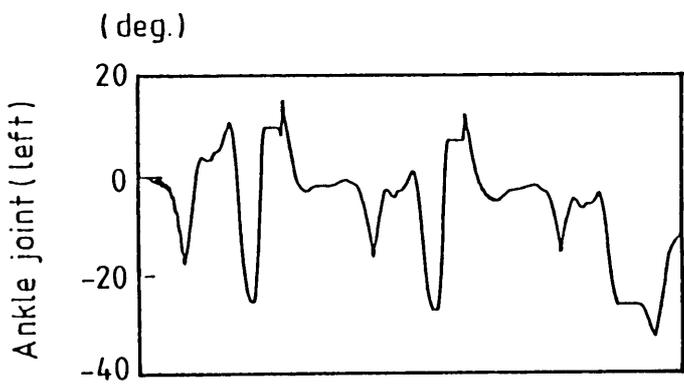
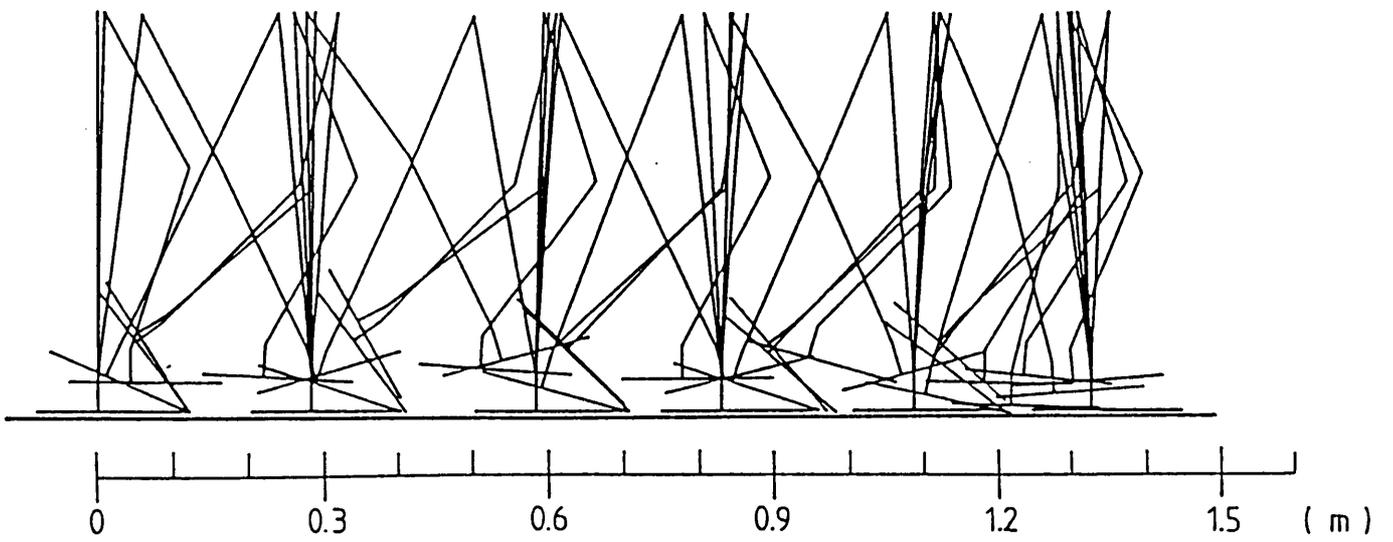


Fig.5-11(b) A walk with change of step width in walking on flat plane (1st, 2nd; $D=0.3m$, 3rd-5th; $D=0.25m$, stick interval= $0.3s$)

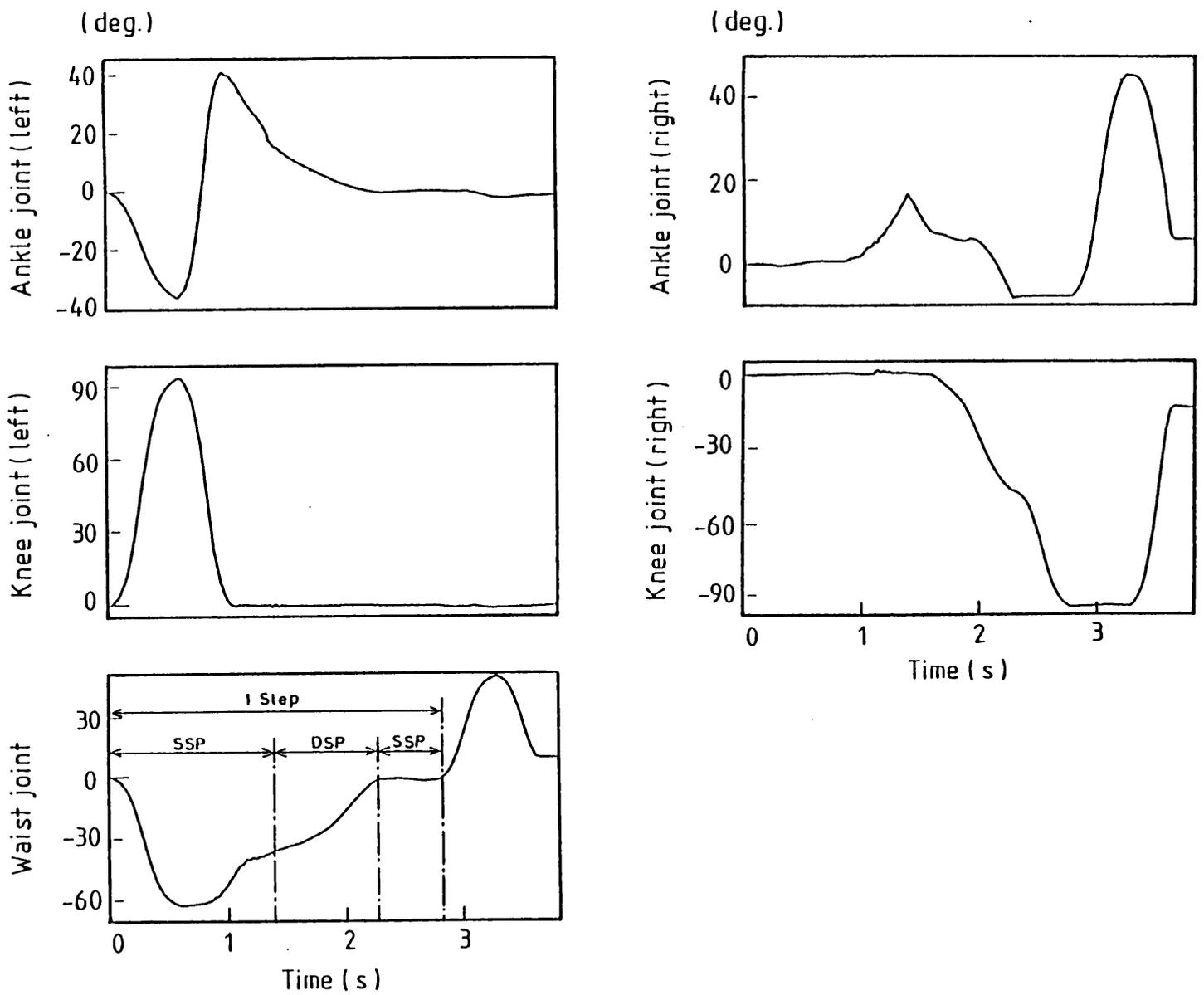
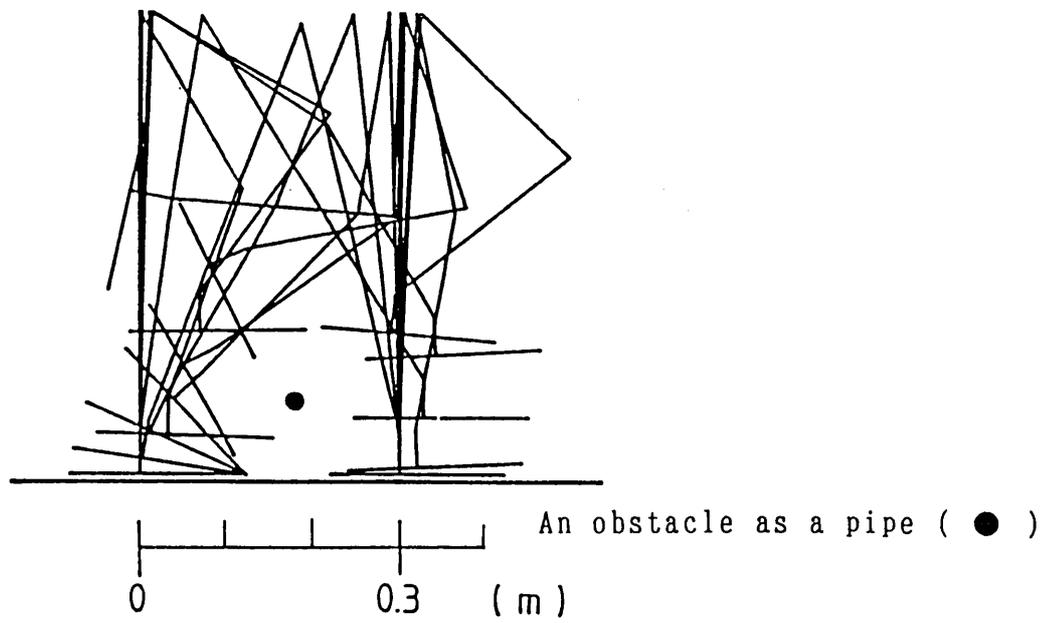


Fig.5-11(c) An obstacle as a pipe (about 2.8s per a step, $D=0.3\text{m}$, $h_1=0.1\text{m}$, stick interval=0.3s)

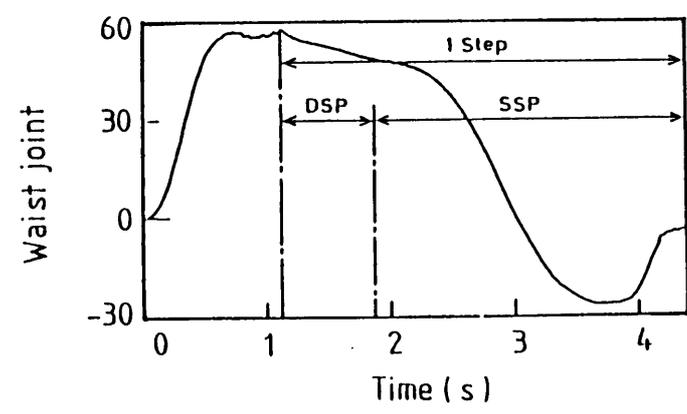
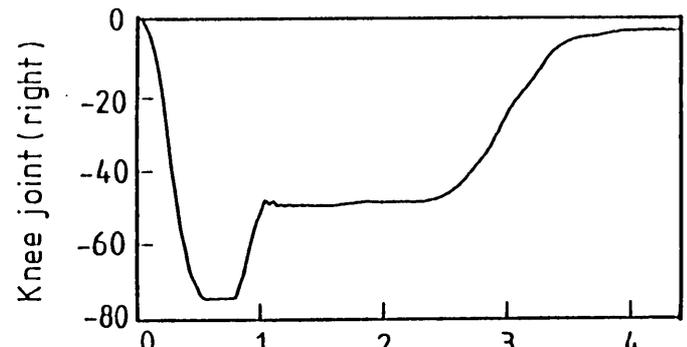
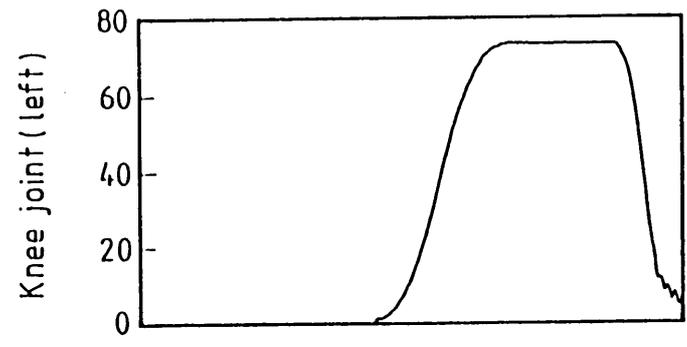
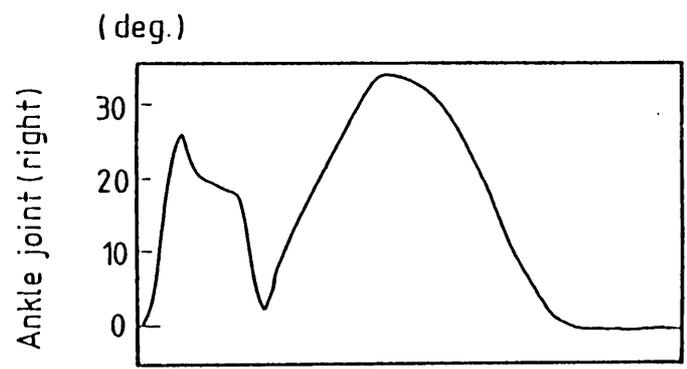
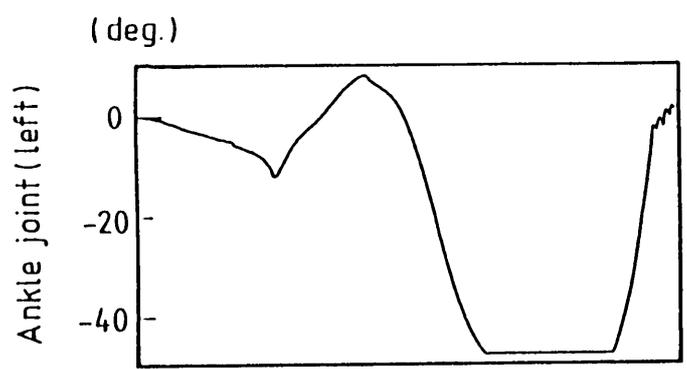
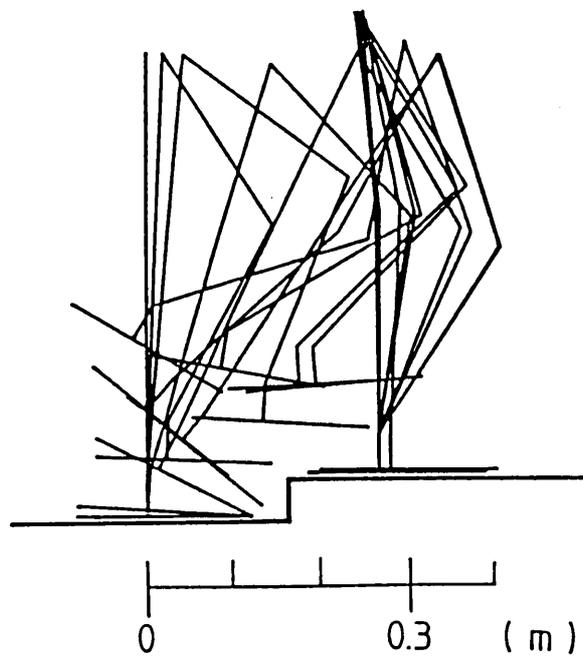


Fig.5-11(d) An up stair (about 3.3s per a step, $D'=0.25m$, $h_2=0.05m$, stick interval=0.357s)

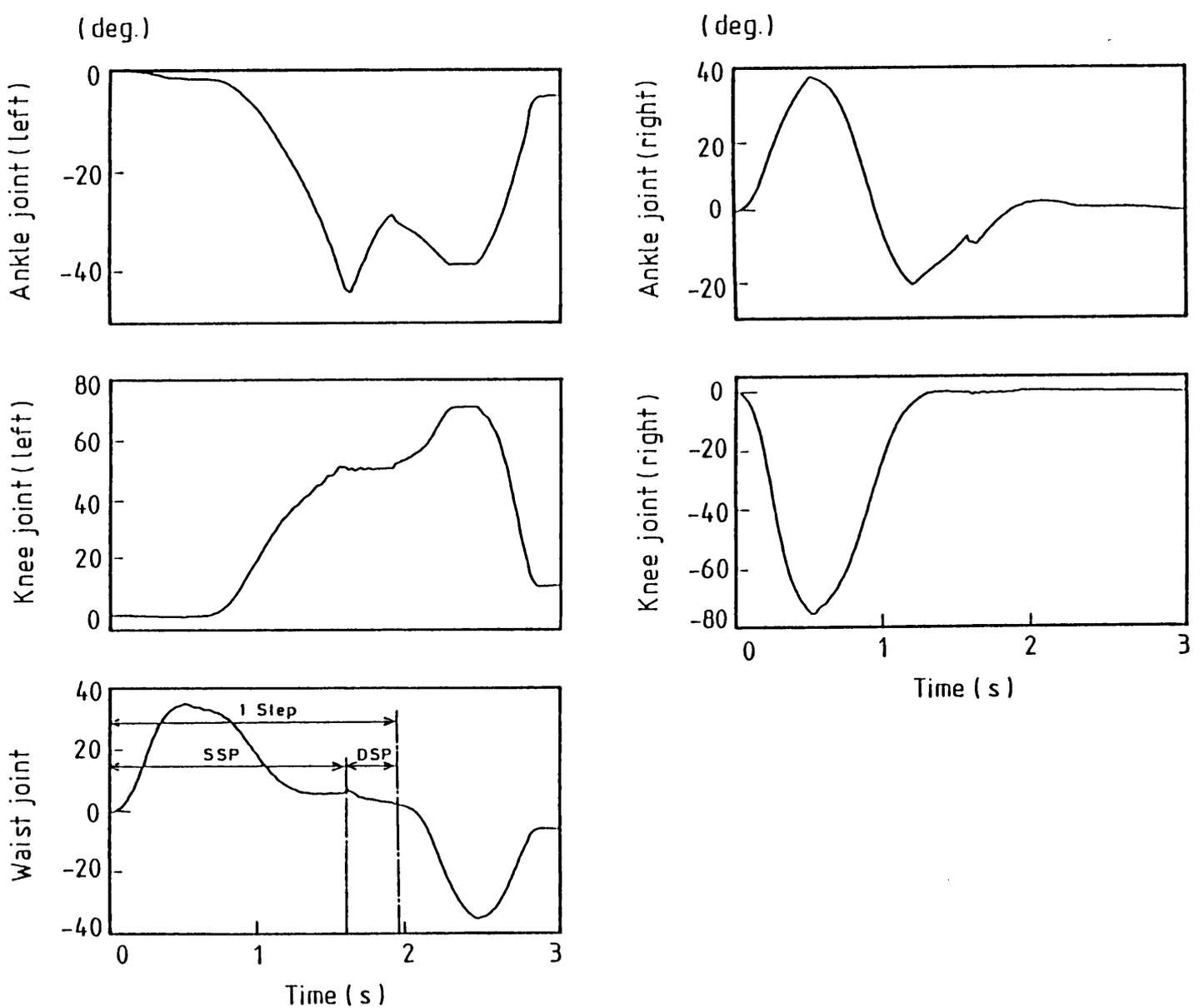
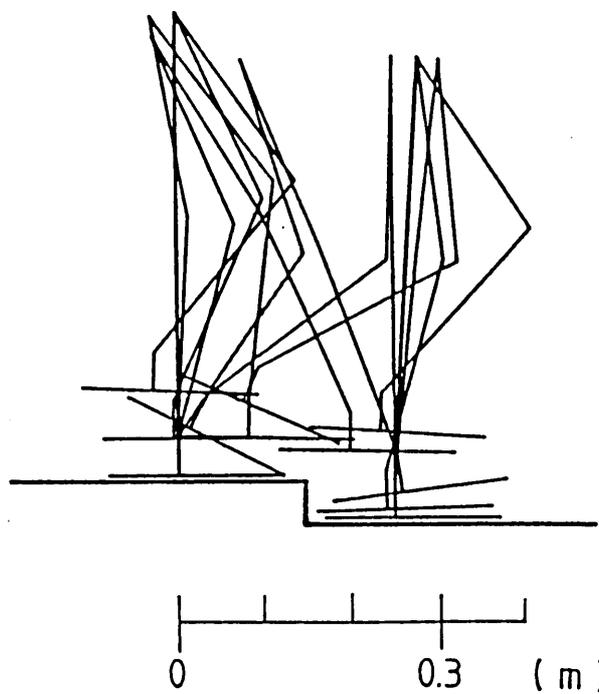


Fig.5-11(e) A down stair (about 2.0s per a step, $D'=0.25\text{m}$, $h_3=0.05\text{m}$, stick interval=0.3s)

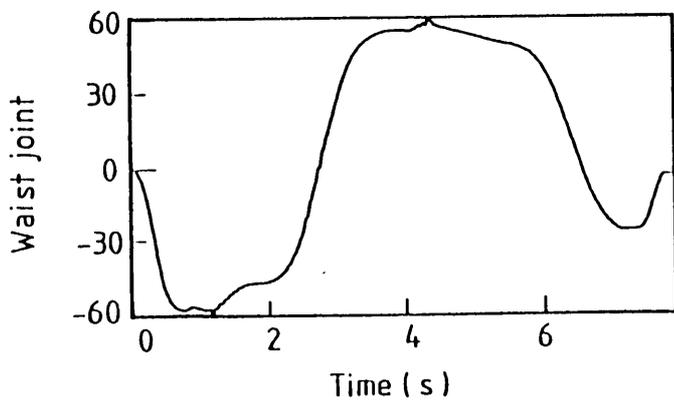
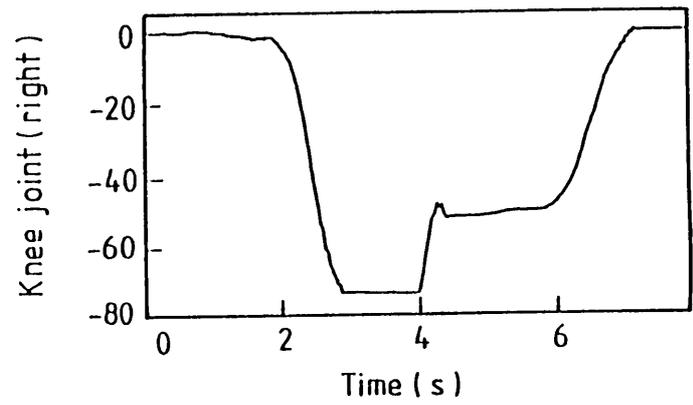
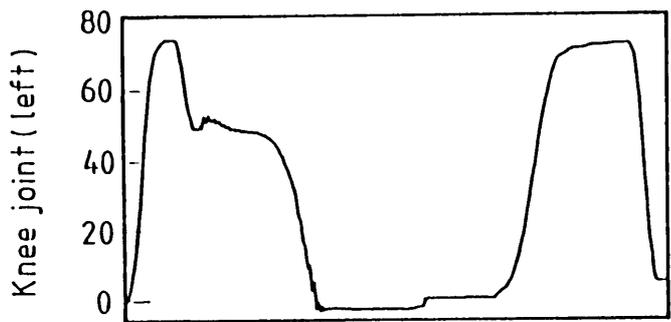
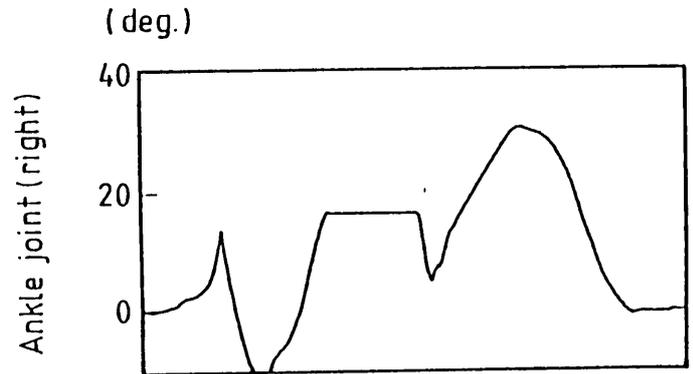
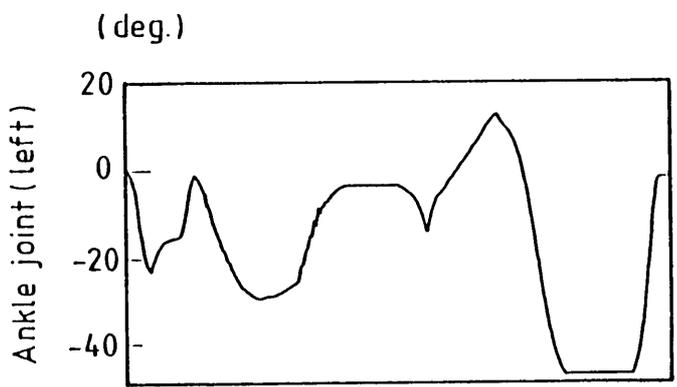
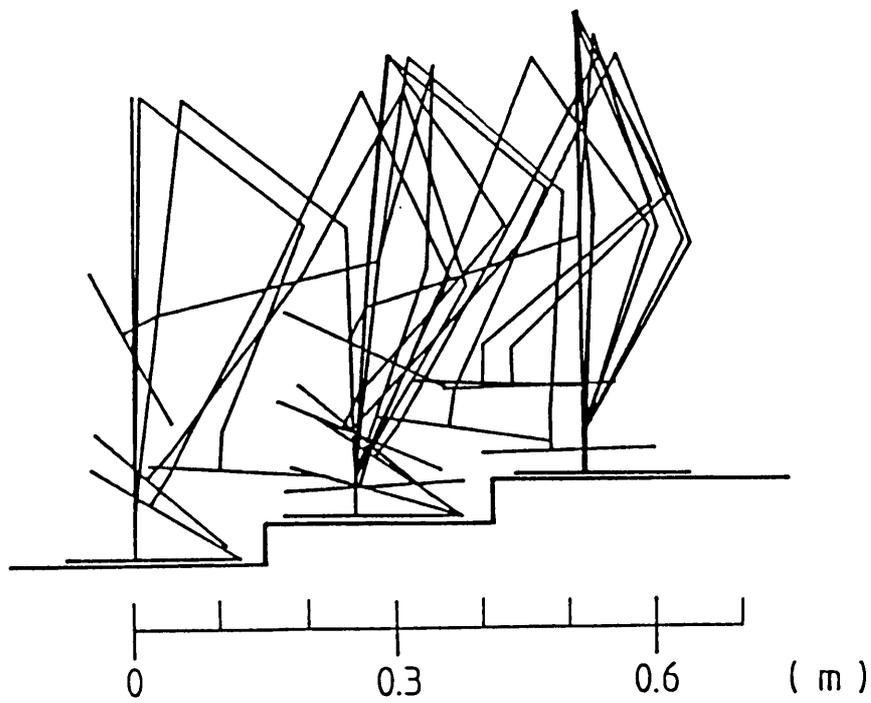


Fig.5-11(f) Up stairs ($D'=0.25\text{m}$, $h_2=0.05\text{m}$, stick interval= 0.525s)

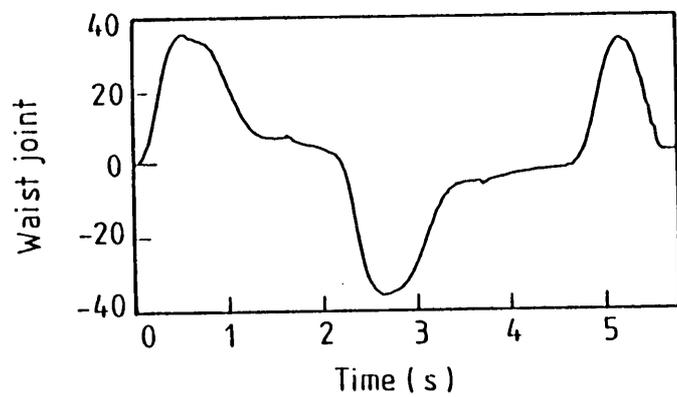
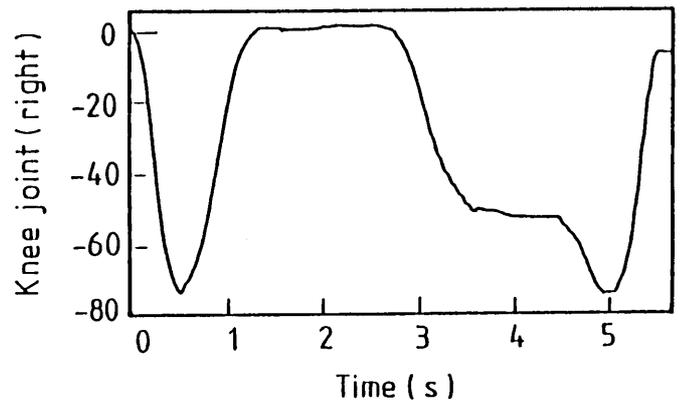
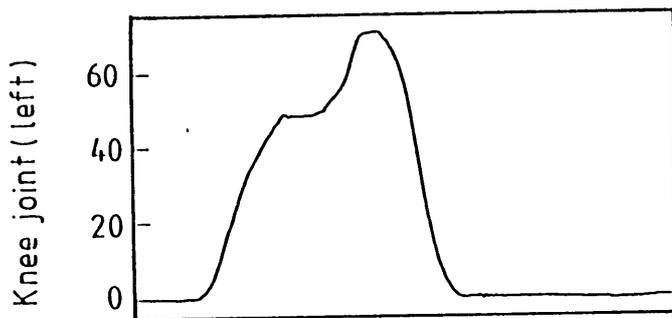
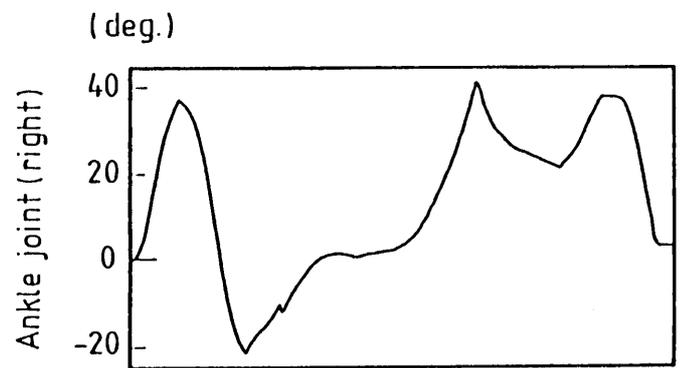
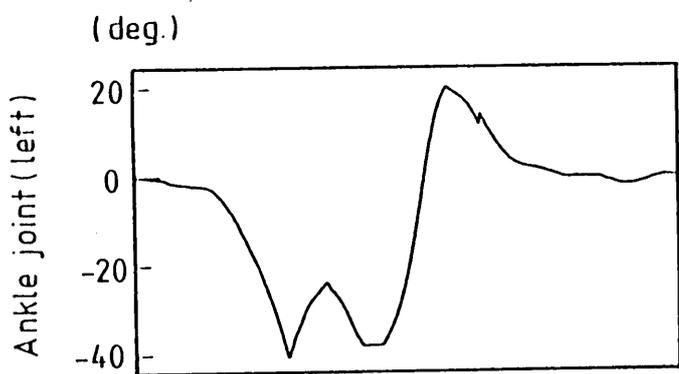
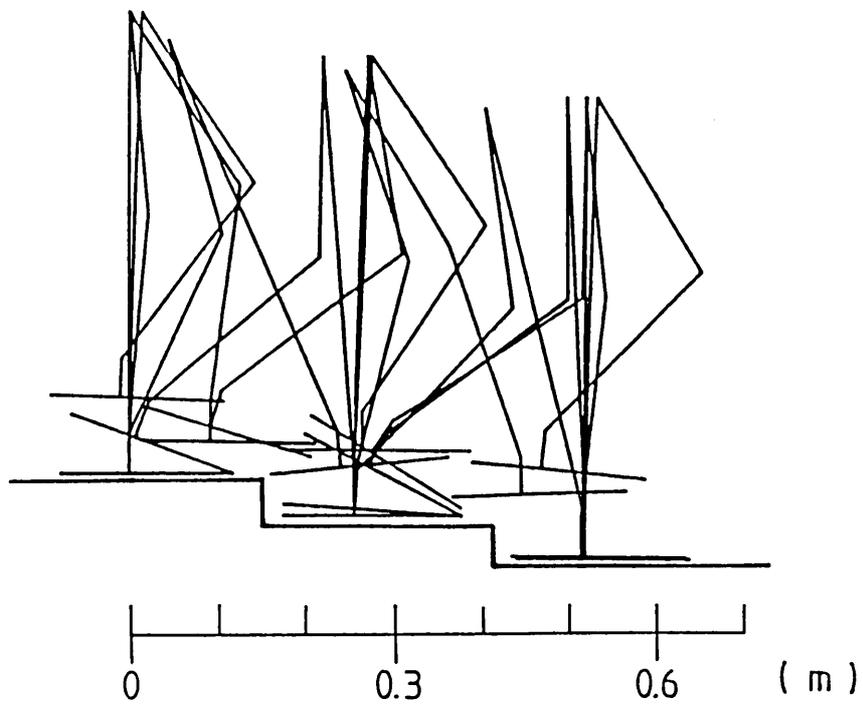


Fig.5-11(g) Down stairs ($D'=0.25\text{m}$, $h_3=0.05\text{m}$, stick interval= 0.45s)

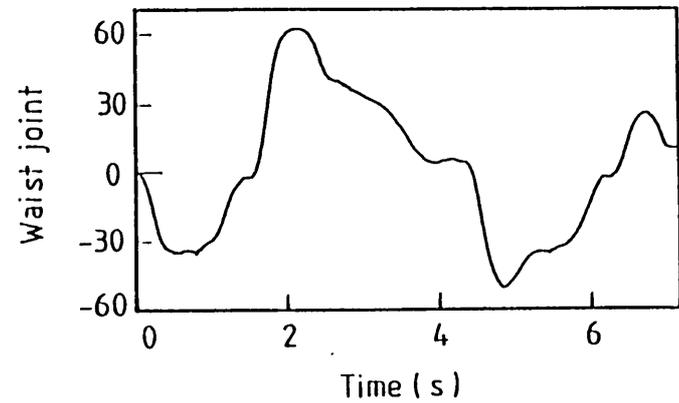
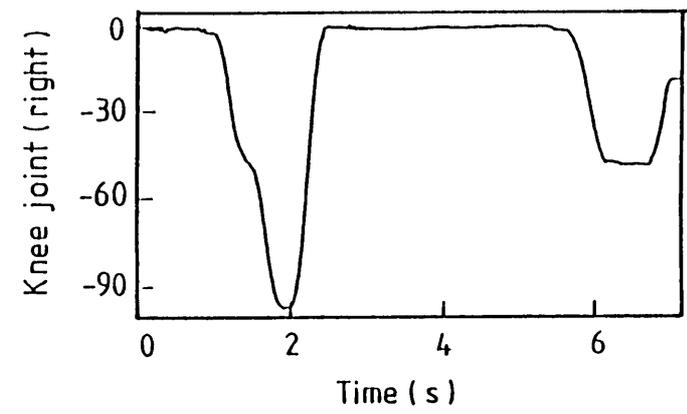
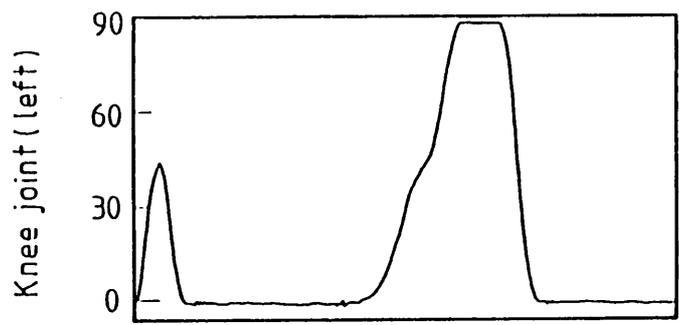
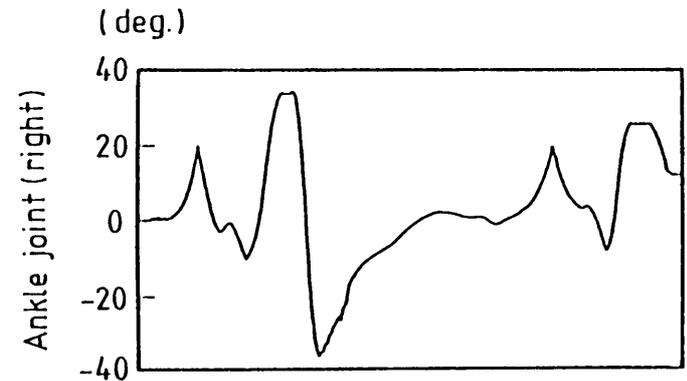
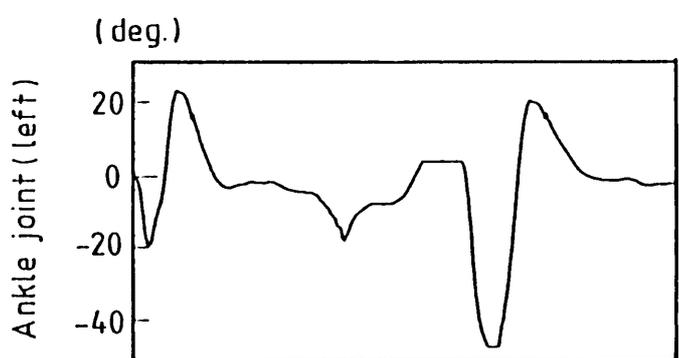
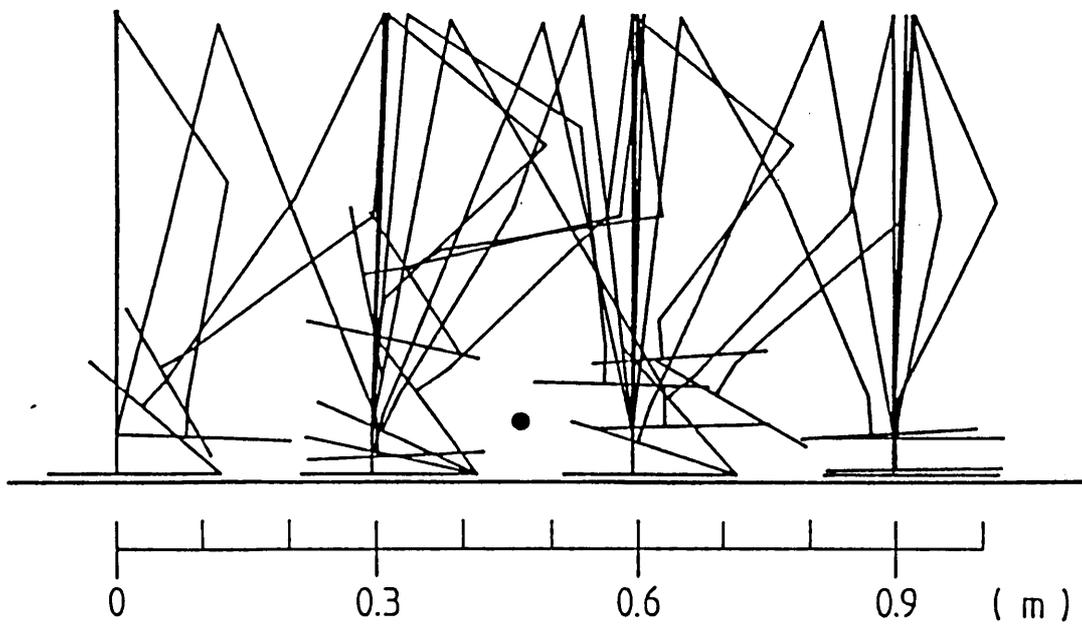


Fig.5-11(h) A flat plane($D=0.3\text{m}$), a pipe($D=0.3\text{m}$, $h_1=0.1\text{m}$), a flat plane ($D=0.3\text{m}$), stick interval= 0.375s

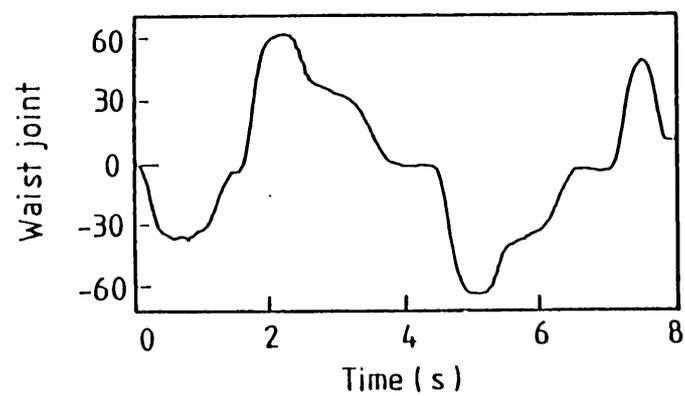
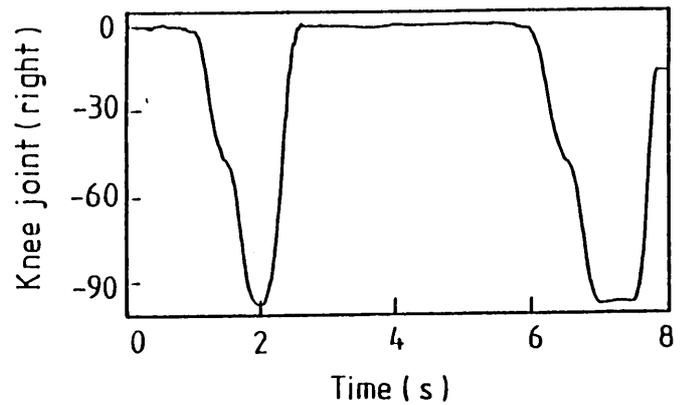
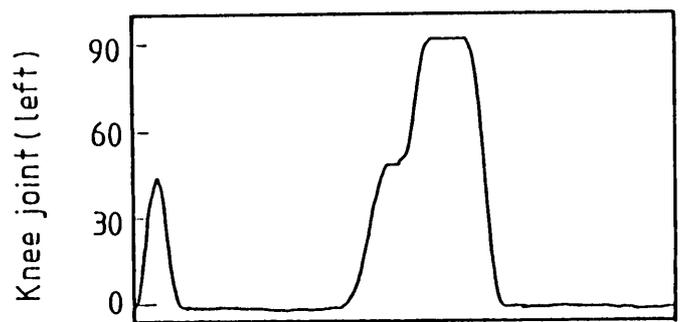
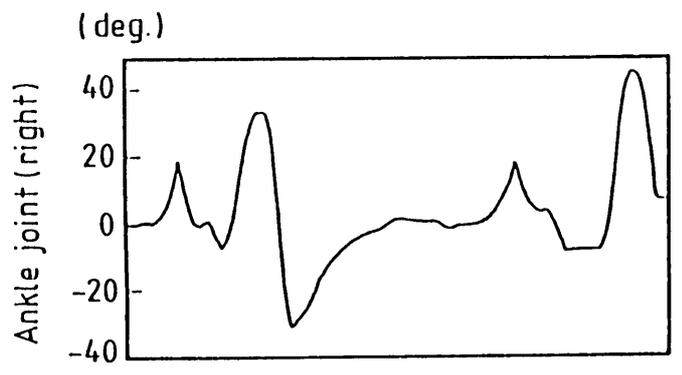
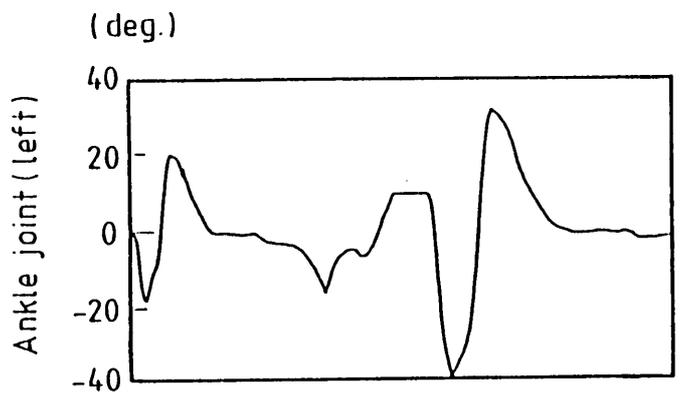
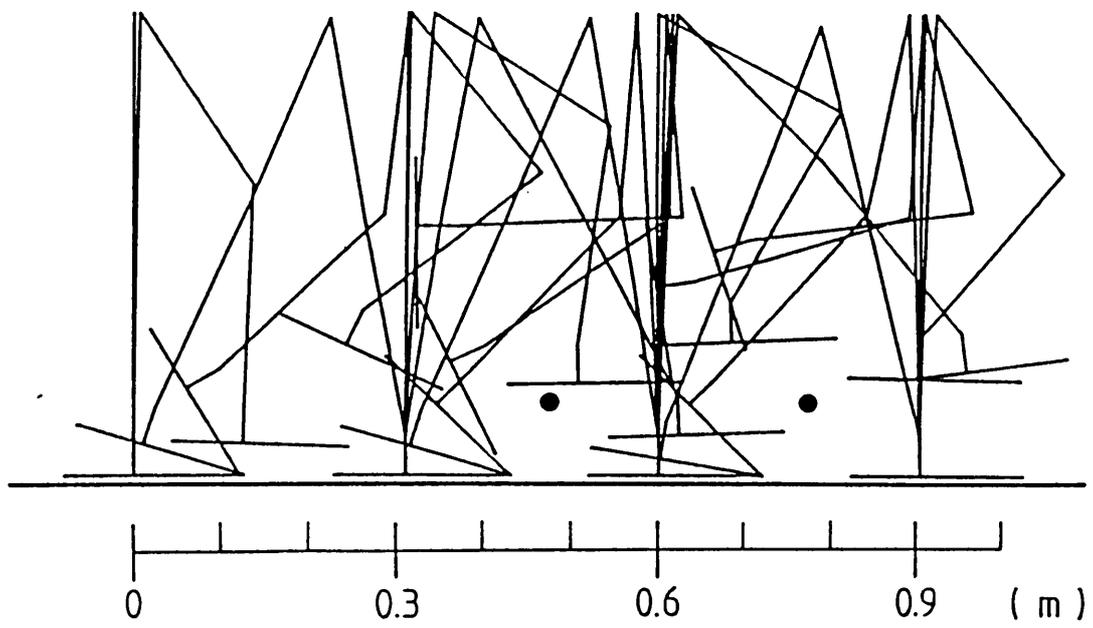


Fig.5-11(i) A flat plane($D=0.3\text{m}$), a pipe($D=0.3\text{m}$, $h_1=0.1\text{m}$), a pipe($D=0.3\text{m}$, $h_1=0.1\text{m}$), stick interval= 0.45s

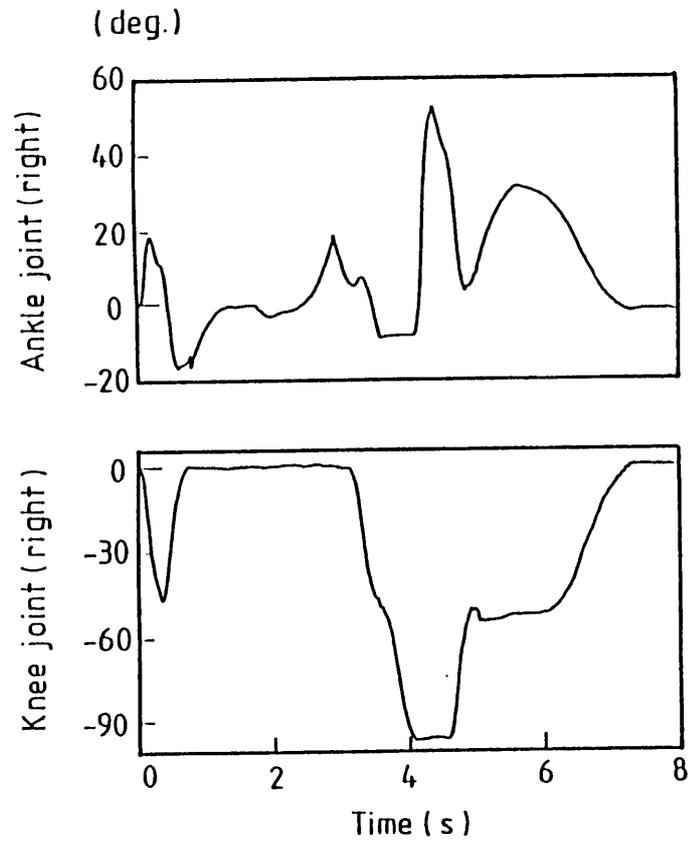
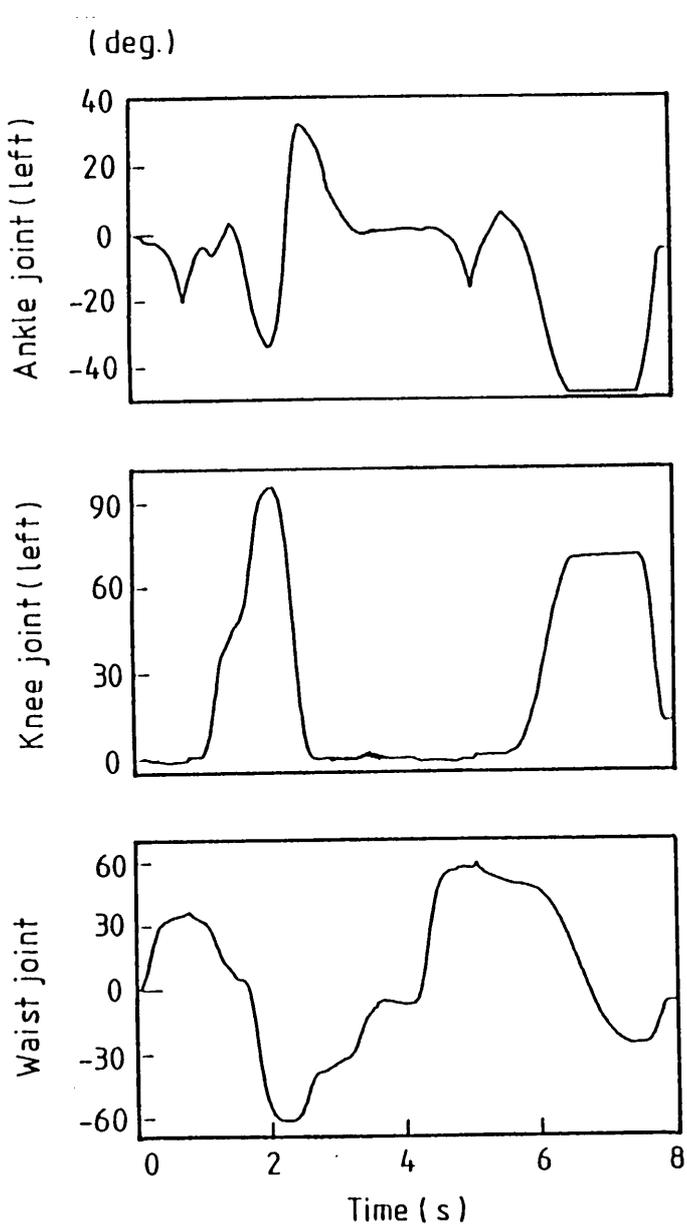
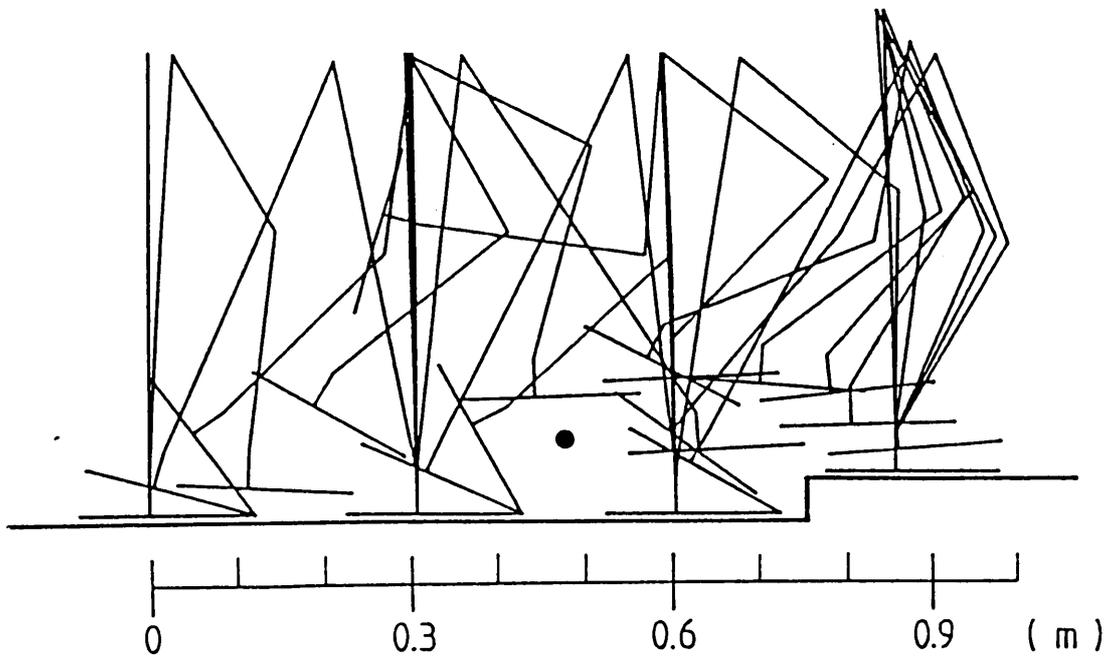


Fig.5-11(j) A flat plane($D=0.3m$), a pipe($D=0.3m, h_1=0.1m$), an up stair ($D'=0.25m, h_2=0.05m$), stick interval= $0.45s$

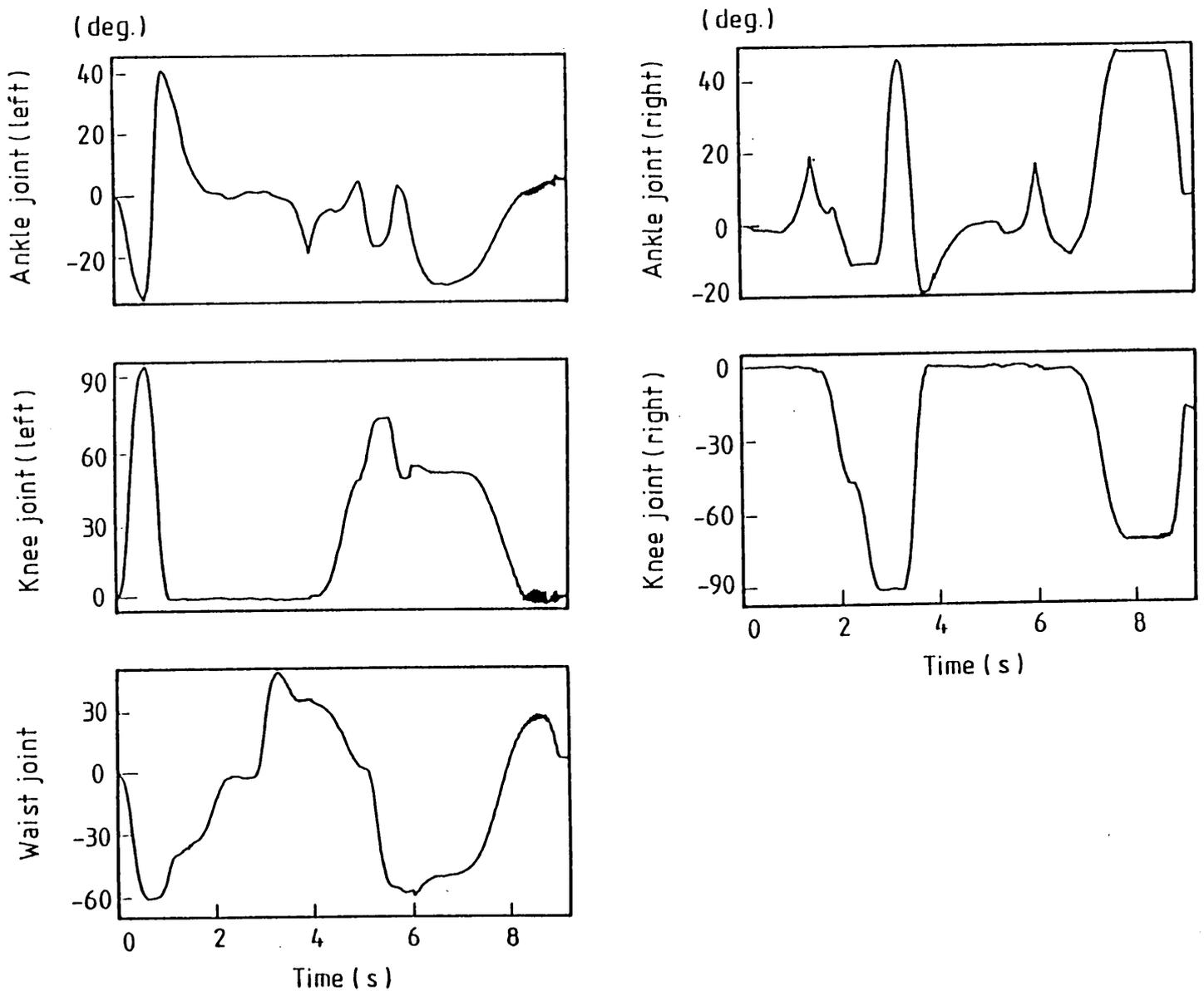
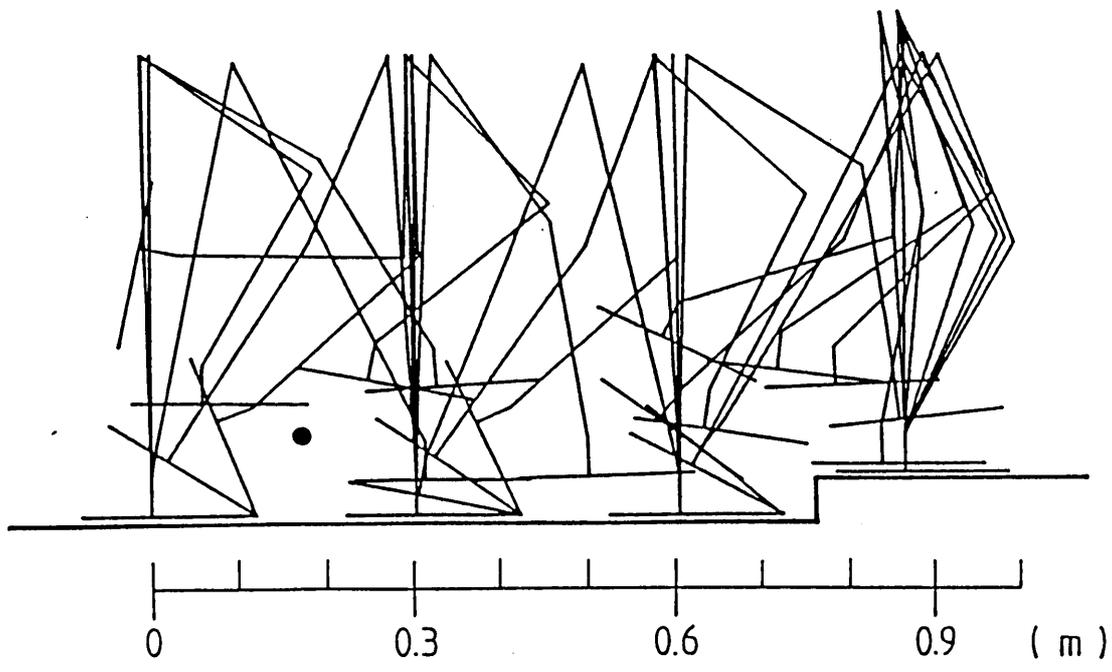


Fig.5-11(k) A pipe($D=0.3\text{m}$, $h_1=0.1\text{m}$), a flat plane($D=0.3\text{m}$), an up stair ($D'=0.25\text{m}$, $h_2=0.05\text{m}$), stick interval= 0.45s

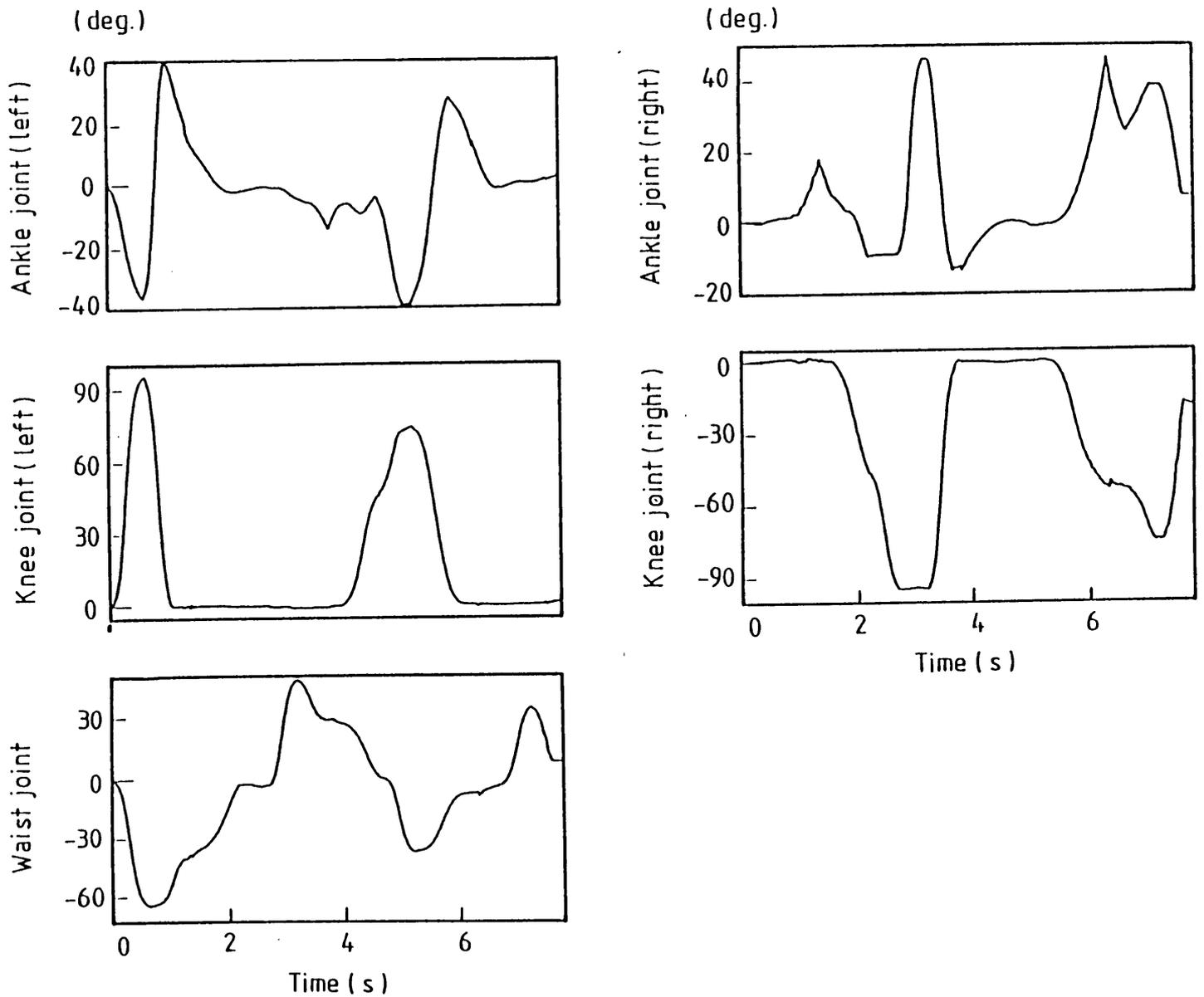
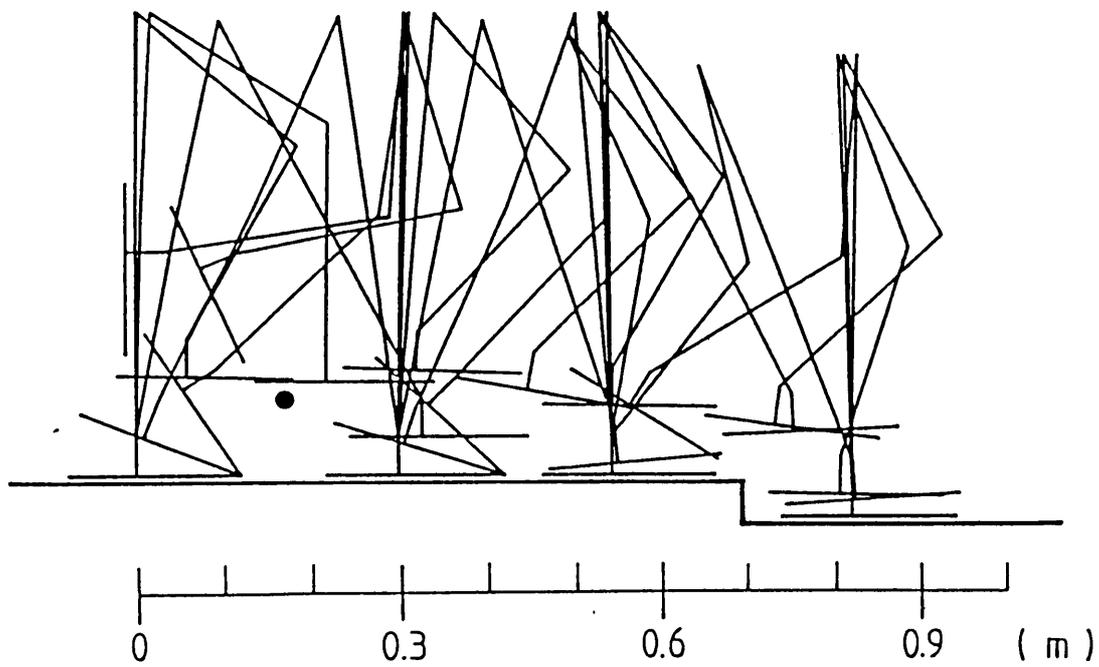


Fig.5-11(1) A pipe($D=0.3\text{m}$, $h_1=0.1\text{m}$), a flat plane($D=0.25\text{m}$), a down stair ($D'=0.25\text{m}$, $h_3=0.05\text{m}$), stick interval= 0.4125s

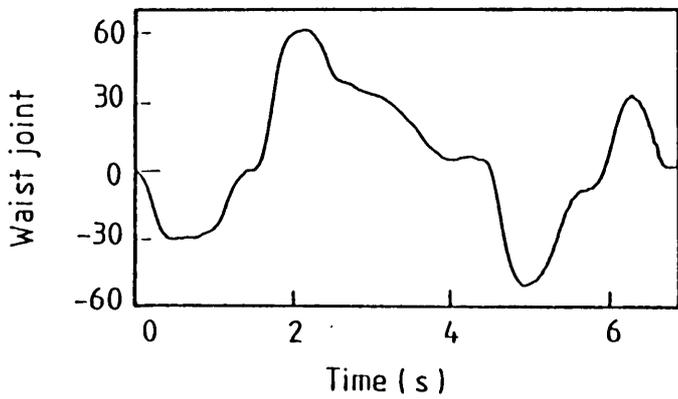
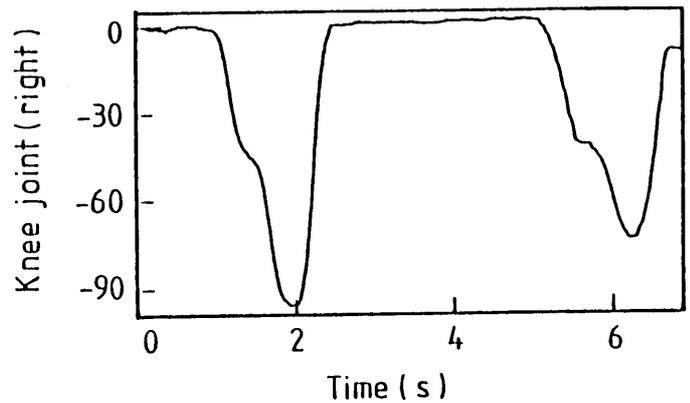
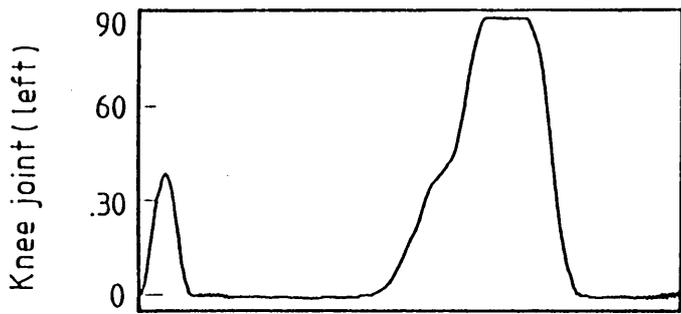
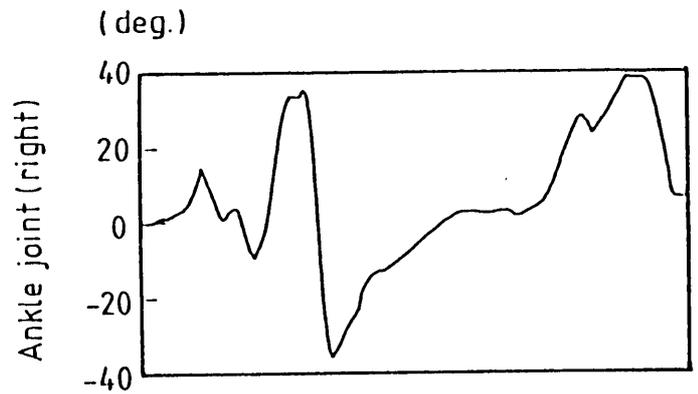
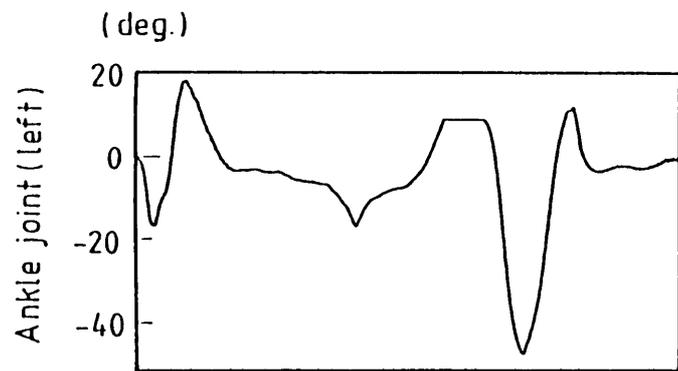
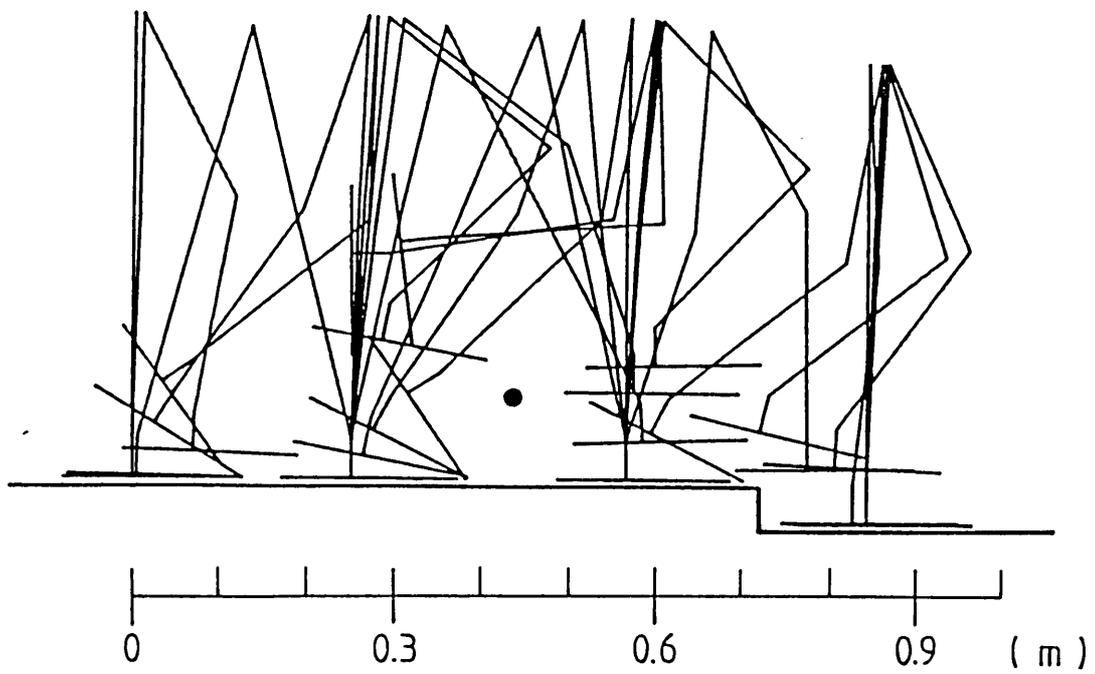


Fig.5-11(m) A flat plane($D=0.25\text{m}$), a pipe($D=0.3\text{m}$, $h_1=0.1\text{m}$), a down stair ($D'=0.25\text{m}$, $h_3=0.05\text{m}$), stick interval= 0.375s

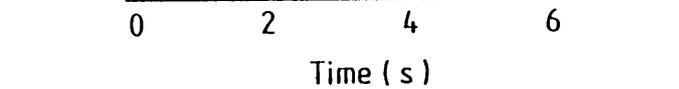
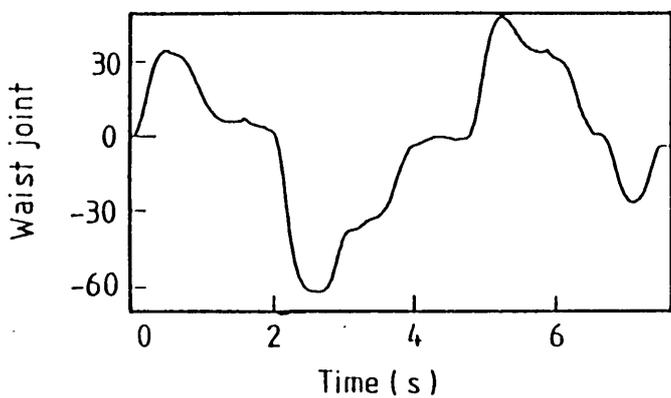
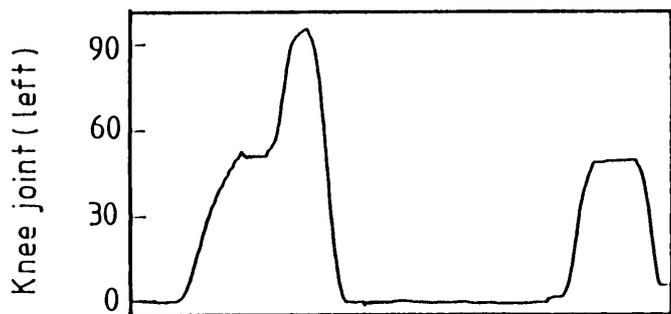
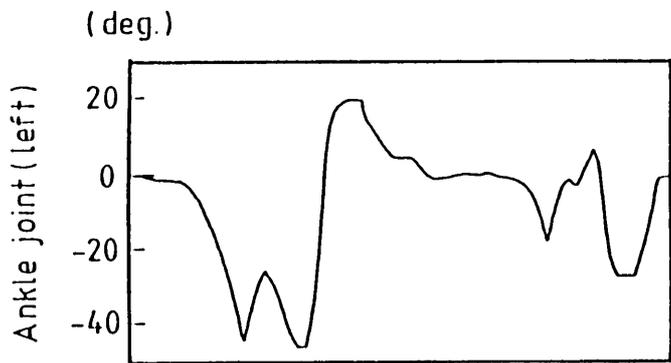
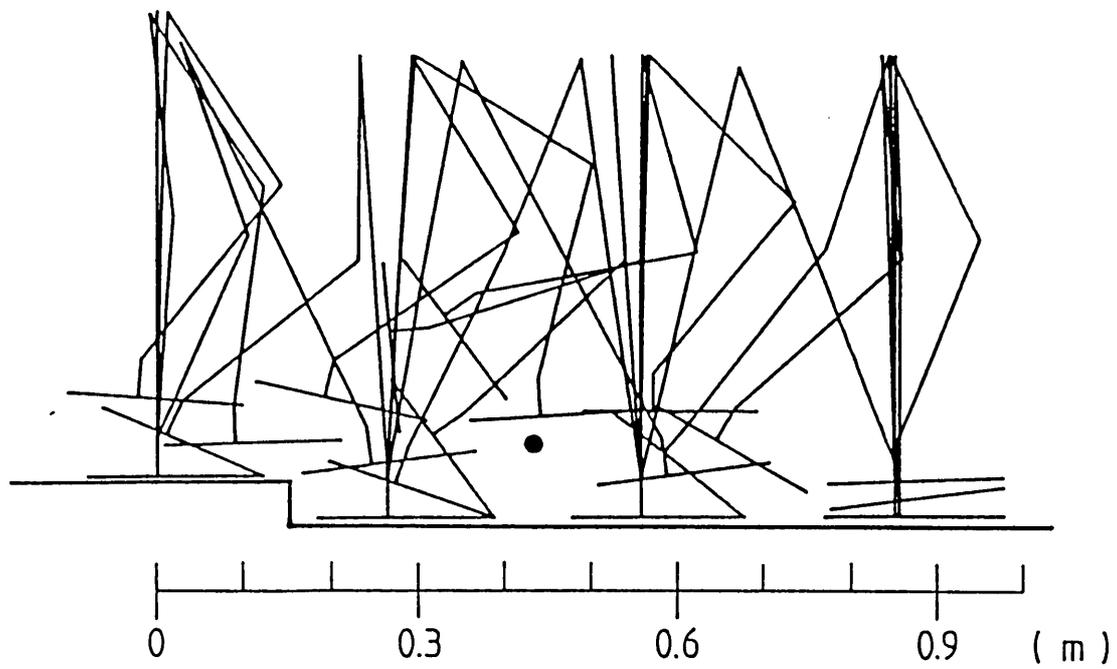
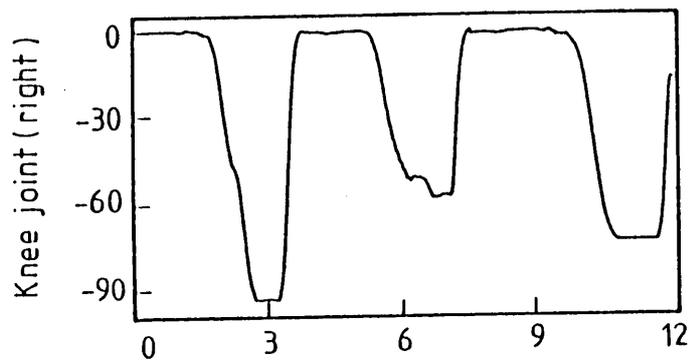
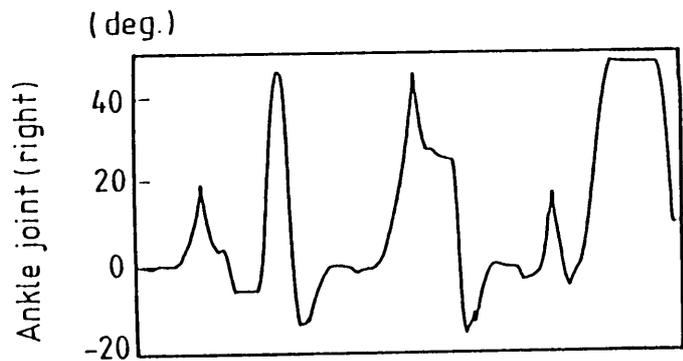
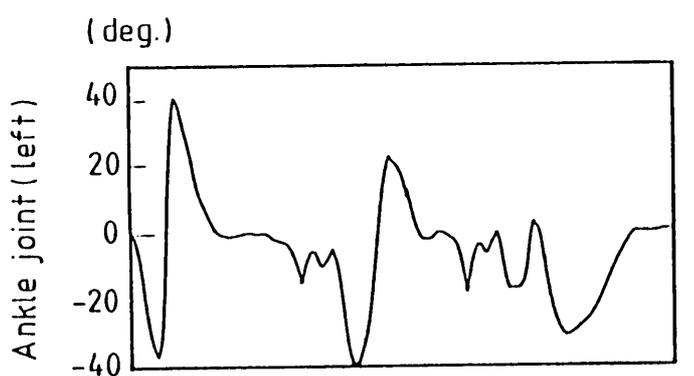
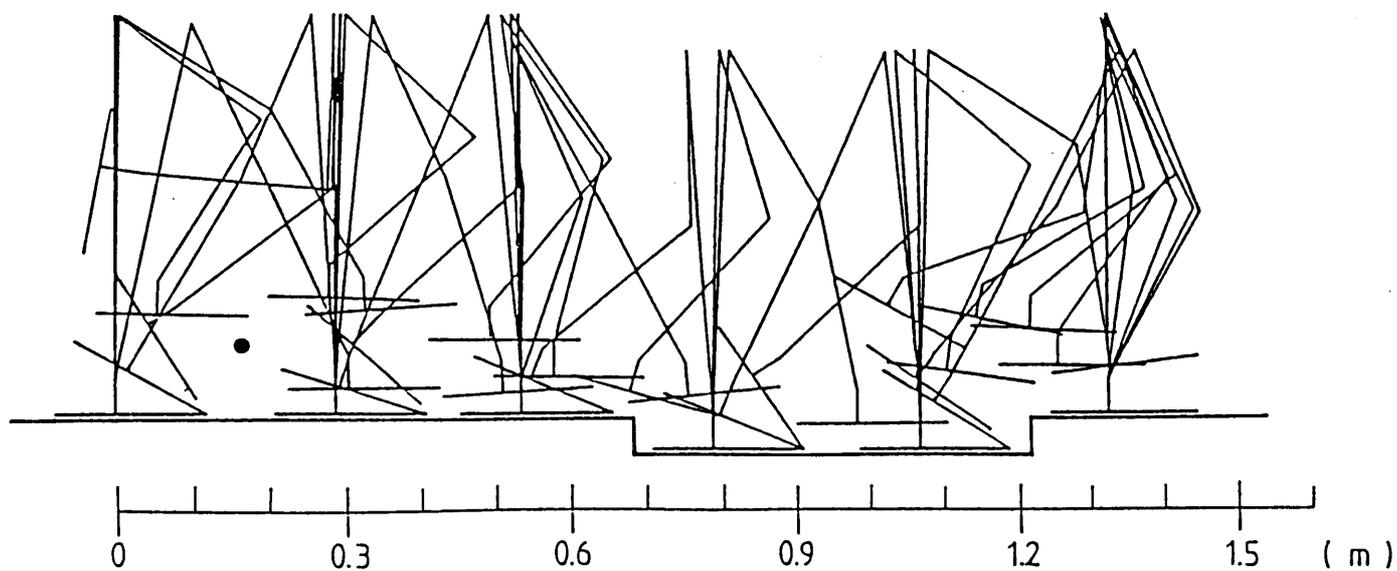


Fig.5-11(n) A down stair($D'=0.25\text{m}$, $h_3=0.05\text{m}$), a pipe($D=0.3\text{m}$, $h_1=0.1\text{m}$), a flat plane($D=0.3\text{m}$), stick interval= 0.45s



Time (s)

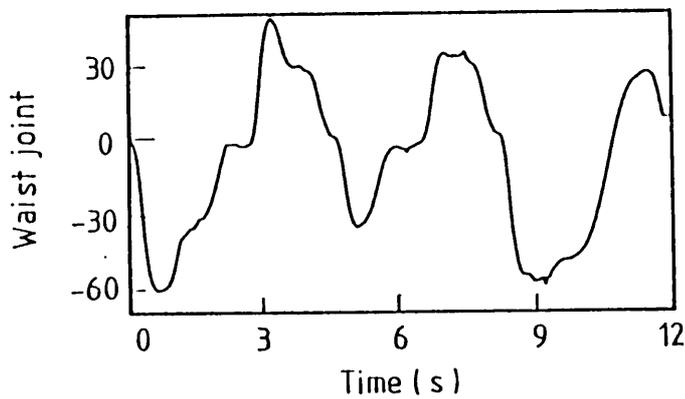


Fig.5-11(o) A pipe($D=0.3\text{m}$, $h_1=0.1\text{m}$), a flat plane($D=0.25\text{m}$), a down stair ($D'=0.25\text{m}$, $h_3=0.05\text{m}$), a flat plane($D=0.3\text{m}$), an up stair($D'=0.25\text{m}$, $h_2=0.05\text{m}$), stick interval= 0.45s

< 参 考 文 献 >

- 1) 高西, 加藤, 他, "環境適応力を持つ二足歩行ロボットの研究-斜面、階段における歩行の実現-", 第4回日本ロボット学会学術講演会予稿集, p.215~218, 1986.
- 2) 若原, 高西, 加藤, 他, "二足歩行パターン作成支援システム「WALK MASTER-4」の開発", 第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集, p.575~578, 1987.
- 3) 五十嵐, 野飼, "逆力学問題を用いた二足歩行ロボットにおける2次元動歩行の制御", 第4回知能移動ロボットシンポジウム講演論文集, p.9~14, 1988.
- 4) 吉川, "ロボットアームの多変数制御", コンピュートロール, No.9, p.47~55, コロナ社, 1985.

6章 結論

原子力発電施設や海底、宇宙等人間が作業を行うには危険な環境、いわゆる極限環境において、人間の代わりに作業を行うロボット（極限作業用ロボット）は様々な環境を移動しながら作業を行う必要があると考えられる。従って、このようなロボットでは作業機能だけではなく、移動機能に関しても十分な考慮がなされなければならない。本論文では、ロボットに付加する移動機能として脚式移動である二足歩行を取り上げ、二足歩行ロボットによる矢状面内での下位レベル適応歩行の実現を目的として研究を進めてきた。その結果、得られた結論を以下に要約する。

- (1) 二足歩行ロボットの単脚支持相における運動方程式及び力学的制約条件を導出し、この力学的制約条件が歩行運動において非常に重要な役割を果たしていることを示した。また、二足歩行ロボットの軌道制御法として動的制御を用いる利点を述べ、制御実験を行うことにより、その有効性を示した。
- (2) 二足歩行ロボットの両脚支持相のように系の力学状態に制約条件が付加された閉ループリンク系に対する力学解析法として、ダランベールの原理を用い、かつ静的力を各リンクに関する静的平衡の式より求めて解析を行う方法を提案した。また、シミュレーション及び制御実験より、両脚支持相の力学解析に対して、この方法が有効であることを示した。
- (3) 歩行パターン生成法として、代表的な環境に対し予め設定した基本歩行パターンを適当に調節しながら組み合わせることにより様々な環境に対する歩行パターンを生成し、生成した歩行パターンの実現性問題は、系に付加される力学的制約条件により判定する簡易化した歩行パターン生成法を提案した。また、歩行実験を行うことにより、この簡易化した歩行パターン生成法の実用性を示し、更に平坦面、配管環境、段差（上り、下り）及びこれらを組み合わせた環境における矢状面内での下位レベル適応歩行を実現した。

このように本研究においては、二足歩行ロボットによる適応歩行への第一段階として、矢状面内での下位レベル適応歩行を実現した。今後、前頭面（進行方向に垂直な平面）を含めた3次元空間への拡張を図るためには、上体を付加したり足首や腰部に自由度を付加することにより前頭面内における運動も考慮する必要があると考えられる。更に、完全な適応歩行を目指すためには、視覚による環境認識や歩行計画のレベルの研究も進めていく必要がある。

謝辞

本研究を進めるに当たり終始、御指導、御鞭撻を頂きました 静岡大学 野飼享教授に深く感謝の意を表します。

また本論文をまとめるに当たり、多大な御助言、御指導を頂きました 静岡大学 井原素三教授、多々良陽一教授、森田信義教授、松田孝教授、市川朗教授 に厚く御礼申し上げます。

更に、歩行ロボット及び実験装置の製作に当たり多大な協力を頂いた 静岡大学 松山友久技官、元卒研究生 萩野清君、丸岡清人君、また実験の際に協力を得た、同じく元卒研究生の 大橋信明君、宮垣一也君、卒研究生の 加茂光則君、研究を進めるにあたり公私に渡って協力を頂いた 静岡大学 末長修助手、元大学院生の 林吉隆君、梶浦裕章君、平林司光君、関口憲恒君、奥村正雄君、佐野英樹君、大学院生の 大津聡一郎君、木村初夫君、董敏翔君、井上和也君に感謝の意を表します。