

## 目次

第1章 序論.....	3
1.1 本研究の目的.....	3
1.2 本研究の概要.....	4
1.3 本論文の構成.....	5
第2章 従来の研究と本研究の課題.....	7
2.1 多脚移動ロボットの機構に関する研究.....	7
2.2 多脚移動ロボットの歩容に関する研究.....	12
2.3 多脚移動ロボットの制御システムに関する研究.....	15
2.4 本研究の課題.....	18
2.5 本章のまとめ.....	19
第3章 周期的歩容の解析.....	20
3.1 緒言.....	20
3.2 歩容の解析法.....	21
3.2.1 解析のための諸定義.....	21
3.2.2 現実的な歩容のための条件.....	24
3.3 静的歩行.....	27
3.4 動的歩行.....	33
3.4.1 歩容解析.....	33
3.4.2 2脚支持期のロボットの運動.....	38
3.5 実験.....	41
3.5.1 実験装置.....	41
3.5.2 実験結果.....	44
3.6 本章のまとめ.....	46
第4章 適応歩容.....	48
4.1 緒言.....	48
4.2 重心位置適応歩容.....	49
4.3 傾斜面適応歩容.....	54
4.3.1 傾斜面への対応.....	54
4.3.2 4脚支持時の脚荷重.....	55
4.3.3 脚荷重の測定法.....	58
4.4 実験.....	59
4.4.1 実験装置.....	59
4.4.2 重心位置適応歩容.....	61
4.4.3 傾斜面適応歩容.....	66
4.5 本章のまとめ.....	68

第5章 操縦型歩行制御 .....	70
5.1 緒言 .....	70
5.2 歩行制御法の基本概念 .....	72
5.3 歩行アルゴリズム .....	72
5.3.1 歩行の基本条件 .....	72
5.3.2 4脚支持推進型 .....	73
5.3.3 3脚支持推進型 .....	75
5.4 シミュレーションによる評価 .....	76
5.4.1 4脚支持推進型と3脚支持推進型の比較 .....	76
5.4.2 歩容の収束性 .....	78
5.5 実験 .....	82
5.5.1 実験装置 .....	82
5.5.2 脚駆動制御手法 .....	85
5.5.3 実験結果 .....	86
5.6 本章のまとめ .....	88
第6章 脚移動ロボットのための制御システム .....	90
6.1 緒言 .....	90
6.2 多脚移動ロボットの制御の特徴 .....	90
6.3 並列処理を用いた制御システム .....	91
6.4 本章のまとめ .....	95
第7章 結論 .....	97
7.1 本研究の成果 .....	97
7.1.1 周期的歩容解析に関する成果 .....	97
7.1.2 適応歩容に関する成果 .....	97
7.1.3 操縦型歩行制御に関する成果 .....	98
7.1.4 脚移動ロボットの制御システムに関する成果 .....	98
7.1.5 リアルロボティクスとしての成果 .....	99
7.2 残された課題 .....	100
7.3 本研究のまとめ .....	101
謝辞 .....	103
参考文献 .....	104
研究業績 .....	109

## 第 1 章 序論

### 1.1 本研究の目的

近年、産業用ロボットが工場に導入されて、生産性の向上に寄与していることは周知の事実である。当初、定位置に据え付けられるロボットが中心であったが、その後無人搬送車などの導入も進み、移動機能を持ったロボットもその重要性が認識されるようになってきた。今後さらに高度な機能を持ち、その作業内容や作業対象が広がってゆくと、その作業領域も工場内だけに留まらず、人間の居住空間や自然環境下まで広がっていくだろう。また、原子力プラント内や災害現場、惑星探査といった人間が行くことができない所で作業を行うロボットも期待されている。このようなロボットでは、移動機能は必須のものである。

ロボットの移動機構としては、車輪、クローラ、脚が主に考えられている。車輪は機構および制御が簡単であり、エネルギー効率が良く高速な移動が可能であるが、平坦な路面でなければ移動できない。クローラは円環状の無限軌道履帯と車輪を組み合わせたもので、車輪より高い踏破能力を持っている。これらの2種類の移動機構は、基本的にロボットと地面との接点が連続して確保されなければならないという性質を持つ。これに対して、脚ではロボットと地面との接点が離散的であり、着地点を選択できる、さらには着地点の変更なしにロボット本体の位置・姿勢を変更することができるといった特徴を有している。このような特徴は、複雑な環境での移動において、車輪やクローラに比較して有利となっている。脚移動ロボットでは、2脚、4脚、6脚といった脚数のロボットが研究されている。2脚では、狭い場所での移動に適しているが、本質的に動的な安定性を確保する必要があり、制御の難しさの問題点を持っている。4脚は、静的な安定性を保ちながら移動できる最低脚数であり、機構上は6脚より有利であるが、同時に2本以上の脚を上げられないため、移動速度や移動アルゴリズムの点で劣っている点も持ち併せている。6脚は状況に応じてさまざまな歩容を採用することができ、安定性や歩行速度においてメリットがあるが、ロボットが大型化するという問題点がある。このように、同じ脚移動ロボットでも脚数に応じて特徴があるため、環境に応じてロボットの形態を検討する必要がある。

本研究では、4脚ロボットの歩容についての考察を行った。歩容とは、歩行動作中の脚の動作を示すものである。いくら優れた脚機構ができたとしても、状況に応じた適当な歩容を適用しなければ、ロボットはバランスを失い、歩行を継続することが困難となる。その意味では、歩行ロボット研究において、脚機構の設計がハード面にお

ける研究の柱とするならば、歩容設計はソフト面における研究の柱と行うことができる。本研究では、単純な環境での周期的歩容から始めて、移動環境に適応したり、任意の方向への移動に対応できる歩容の生成手法を論じるとともに、そのために必要な制御システムについても検討を行った。

## 1.2 本研究の概要

脚移動ロボットの歩行方法は、静的歩行と動的歩行に大別される。ロボットの重心の水平面への垂直投影点が、脚の接地点を結ぶことでできる支持脚多角形の内部にある場合、静的安定性が保たれていると言い、静的安定性が常に保持されている歩行が静的歩行と呼ばれる。従って、歩行を継続するためには、常に3本以上の脚が接地していることが必要である。一方、静的安定性が確保することができない期間を持つ歩行が、動的歩行と呼ばれる。本研究では、原則的に4脚移動ロボットの静的歩行を取り扱った。動的歩行では、高速で効率的な歩行が可能と言われているが、環境適応や経路変更など、歩行の柔軟性に関しては静的歩行の方が有利である。一部、動的歩行の適用も行ったが、あくまで静的歩行の延長上として位置づけ、静的安定性を最大限確保する歩行制御手法を採用した。

本研究では4脚移動ロボットが機能的に移動するための歩容を取り扱った。そのため、まず単純な歩容を取り上げ、それから順次自由度を増やしてゆく方向で研究の展開を進めた。最初に取り上げた単純な歩容とは、平坦な水平面をロボットが直進する時の歩容である。ここではロボットの重心がその幾何学的中心にあると仮定し、各脚は一定の脚軌道を繰り返し動くものとした。脚軌道も各脚同一であり、その軌道の位置も各脚の基準位置に対して同一とした。異なるのは、互いの脚の運動の位相（タイミング）だけである。このように、単純化、理想化した条件の下で最適化された歩容をベースとして求めた。しかし、この歩容は限られた特殊な環境でしか有効に機能しない。そのため、まず環境に適応するために、脚の軌道の位置が同一という条件をはずした。脚の軌道の位置を可変にすることにより、ロボットの重心位置変動や歩行面の傾斜に対して静的な安定性を確保できる歩容生成手法を考案した。次に、一定の脚軌道を繰り返し出すという条件を取り除いた。歩容が一定のパターンを持つということは、暗黙のうちにロボットが一定の方向に移動し続けるということを前提としている。しかし、いつでも任意の方向に進路変更が可能な操縦型歩行制御を考えた場合、この前提は無意味のものとなる。そこで、操縦型歩行制御のために、歩容のパターンや周期性にとらわれない歩容生成手法を考案した。

本研究の目的は、有効な歩容生成手法の開発であるが、これを実効的なものにするために、すべての手法はできる限り実機での検証を行った。シミュレーションによる検証に留めるのであれば、環境情報などは既知として与えることができるが、実機による実験では、ロボット自身で取得することが必要である。またそのセンシング手法も、より信頼性の高い手法が要求される。環境情報を取得するためには様々なセンシング手法が考えられ、またその手法自体が研究課題ともなっているが、本研究ではより確実な情報として、脚に設置された力センサの情報を利用する歩容生成手法を採用した。

### 1.3 本論文の構成

本章に続く第2章では、今までに行われてきた脚移動ロボットの研究を紹介するとともに、本研究に課せられた課題を説明する。過去の研究を、機構に関するもの、歩容制御に関するもの、さらに制御システムに関するものに分けて紹介する。なお、本研究は4脚移動ロボットの歩容に関するものであるため、2脚移動ロボットに関する研究は取り上げない。

第3章では、4脚歩行ロボットの周期的歩容について述べる。単純な環境でのロボットが直進する場合の周期的歩容は系統的に解析することができる。周期的歩容とは、一定の脚の動きがサイクルタイムごとに繰り返される歩容である。4脚移動ロボットの周期的歩容は、15個のパラメータで定義されることが知られている。これらのパラメータで、全ての可能な周期的歩容が記述できるが、これらの中には現実的には不合理な歩容も多く含まれる。そのため本研究では、合理的な条件として、各脚で均等にロボット本体を支持すること、左右の両側で対称性を持たせること、という条件を課す。その結果、15個必要であったパラメータは、デューティファクタ（1歩行周期における支持脚期間の比率）と位相差という2つのパラメータに減らすことができる。この2つのパラメータにより、容易に周期的歩容を解析することが可能である。デューティファクタの値が0.75以上の時、静的な歩行が可能になり、その最適な歩容が導出される。また、その値が0.75より小さくなると、2脚でロボット本体を支持する必要のある動的歩行に移行する。この場合にも、最適な歩容を導出し、2脚支持期の運動の解析をする。そして、静的歩行歩容および動的歩行歩容を適用した時の実験結果を示す。

第4章では適応歩容について述べる。歩行ロボットは高い移動能力を持っているが、これは移動環境に応じて歩容を変えることができることに起因している。ここでは脚

に設置された力センサを利用して、ロボットの重心位置に適応する歩容と移動面の傾斜に適応する歩容を提案する。脚移動ロボットの実用を想定する場合、その積荷の状態や、搭載するマニピュレータの姿勢により重心位置が変動することが考えられる。そのような状況を想定し、力センサのデータから重心位置を推定し、脚の復帰のタイミングを変える歩行手法を示す。移動面の傾斜に対する適応は、傾斜を直接計測するのではなく、理想的な歩行時の脚荷重の変化パターンと、実際の斜面歩行時の脚荷重の変化パターンを比較することによって、脚復帰タイミングを決定するものである。

第5章では、4脚ロボットの操縦型歩行制御手法を提案する。歩行ロボットの現実的な移動制御法として、人間による操縦が考えられる。本研究で開発した手法は、歩行のための動作を重心推進動作と胴体移動は行わない移動継続対処動作に分離し、重心推進動作中の3自由度（並進2自由度と回転1自由度）の移動速度を直接指令するものである。ここでは、将来どのような指令が来るのか予想できないため、将来の脚軌道を想定することなく、現在の移動指令だけで脚の運動を決定し、いずれかの脚が可動限界に達した時に初めて対処動作を行う方式を採用している。また、単純な直進指令が続いた場合は、効率的な歩容に収束するようなアルゴリズムが取り入れられている。

第6章では、歩行ロボットのための制御構造について考察し、著者が開発した制御システムについて述べる。歩行ロボットでは、一般に3個以上のアクチュエータを持った脚が4本以上存在するという構成を持っている。そのため、結果として非常に多くの自由度を協調的に制御しなければならない。また、歩行ロボットに与えられる指令は、移動目的地や移動速度といった大局的なものであり、制御システムは指令をブレークダウンして個々のアクチュエータを制御しなければならない。そのため、歩行ロボットの制御システムは階層構造が適していると言われている。また一方、前述したように機構的にはまったく同じユニット（脚）が複数ある構成を持っているため、機構に依存する下位レベルの制御では、脚ごとに独立した制御構造が適している。このような要請をふまえて、15個の通信可能なマイクロプロセッサ(トランスピュータ)により構成される制御システムを構築した。

第7章で本研究の成果をまとめるとともに、将来への展望や課題を記述する。

## 第2章 従来の研究と本研究の課題

### 2.1 多脚移動ロボットの機構に関する研究

多脚移動に関する研究は、動物の歩容を解析することから始まった。1870年代、Muybridgeは連続写真を使って馬の歩く時の歩容の解析を行っている。その後も彼は、様々な動物の動きを連続写真に記録し、1899年にはこれらをまとめた写真集を発行した[1]。この本は、現在でも歩行研究の貴重な資料となっている。歩行機械の研究もMuybridgeと同年代には行われており、1893年には、Ryggによってmechanical horseという特許が出されている（Fig.2-1参照）。これは、人間が乗ってペダルを漕ぐことによって、リンク機構を介して前後の脚を動かし、手綱で前脚の方向を変え操舵するというものである。しかし、実際には製作されなかった。その後もいくつかの歩行機械が考案されたが、いずれもリンク機構を用いて1自由度で脚を駆動するもので、歩容が固定されており、実用的なものとはならなかった。

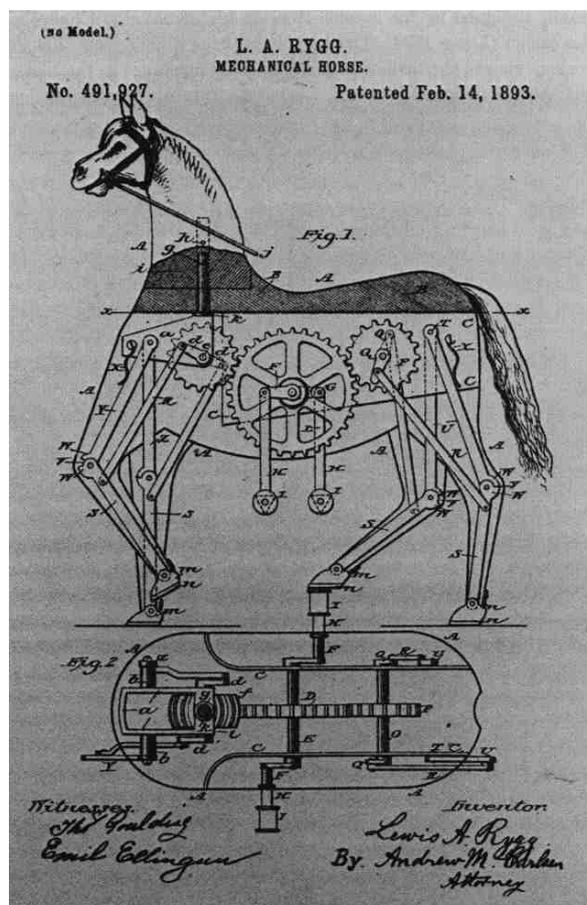


Fig.2-1 Mechanical horse patented by Lewis A. Rygg in 1893 (参考文献[2]より)

1960年代になると、多自由度機構により脚を構成し、複数の自由度の協調により脚を動かすことが行われるようになる。General ElectricのMosherは、Walking Truckと呼ばれる4脚ロボットを作った(Fig.2-2参照)[3]。このシステムは全長3[m]、重量1,400[kg]あり、ガソリンエンジンを搭載し、油圧ポンプを利用して脚を駆動する。搭乗したオペレータが両手・両足でハンドルやペダルを駆使して脚の動きを制御する。各脚は3自由度持っており、前脚は手、後脚は足で指令する。両手両足を使って、各関節をマスタ・スレーブ方式で制御するものであり、カフィードバックも備わっていた。オペレータには熟練が要求され、またその操作時間も数分しかもたなかったという。オペレータのマスタ・スレーブ制御ではなく自動制御による脚移動ロボットは、1966年に南カリフォルニア大学のMcGheeとFrankによって製作された(Fig.2-3参照)[4]。このロボットはPhony Ponyと呼ばれる4脚ロボットで、各脚は2関節を持っている。関節角は連続的に制御されるのではなく、ある有限な各関

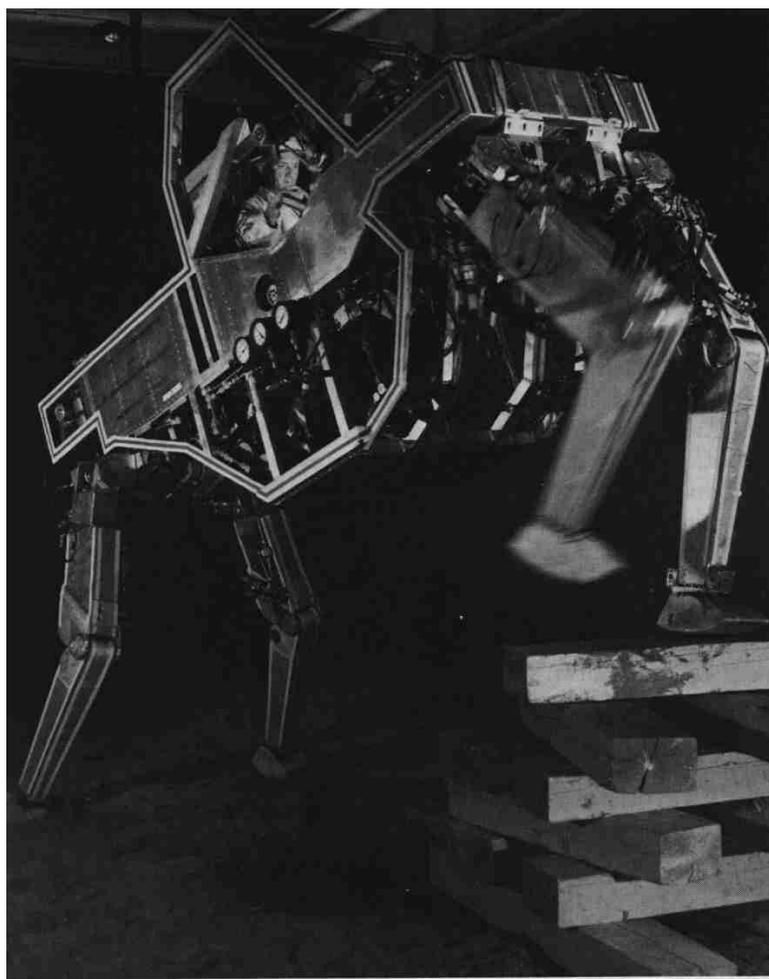


Fig.2-2 General Electric Walking Truck (参考文献[2]より)

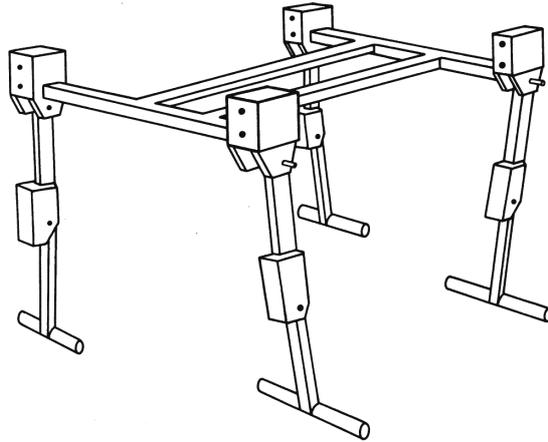


Fig.2-3 Phony Pony (参考文献[5]より)

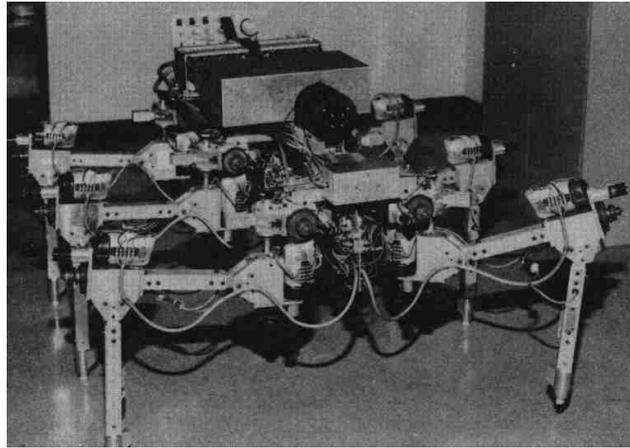


Fig.2-4 OSU Hexapod

節の状態を予め与えておき、その状態をシーケンサによって切り替えてゆく制御法 (finite state control) を採用した。これについては次節で詳しく説明する。

1970年代になると、ロボットの制御のコンピュータ化が本格的になった。オハイオ州立大学に移った McGhee は 1977 年、各脚 3 自由度を持った 6 脚移動ロボット OSU Hexapod ( Fig.2-4 ) を開発した[6]。このロボットは、直進の他に旋回や横行、障害物回避などいくつかの標準歩容をも持ち、脚移動ロボットの有用性を示した。1979 年、東京工業大学の広瀬らは、3 次元パンタグラフ機構 ( Fig.2-5 ) を利用した 4 脚移動ロボット PV II ( Fig.2-6 ) を開発した[7]。それまでは、脚の機構事体にはあまり新しいアイデアが見られなかった脚移動ロボット開発であったが、このロボットの脚機構は 3 自由度とも直交座標系で直接制御でき、エネルギー効率も良くできるといっ

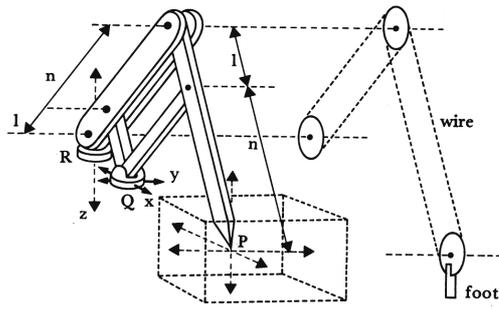


Fig.2-5 3D pantograph mechanism

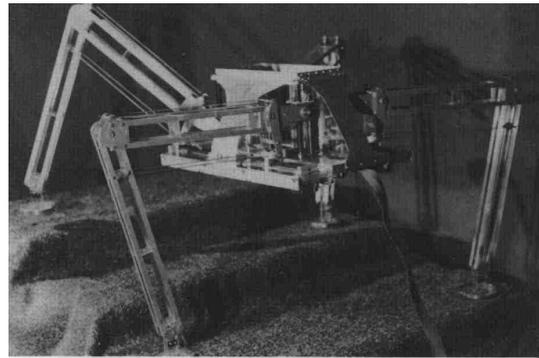


Fig.2-6 PV II

た特徴を持っている。

1980年代以後になると、自立型で大型の脚移動ロボットの開発が目につくようになった。いずれも3自由度の脚を6本持ったロボットで、実際にフィールドでテストされている。オハイオ州立大学のWaldronらが開発したASV (Fig.2-7) [8]、カーネギーメロン大学のWhittakerらのAmbler (Fig.2-8) [9]、ヘルシンキ工科大学のHalmeらのMECANT I (Fig.2-9) [10]などが挙げられる。ASVは全長5.2[m]、幅2.4[m]、高さ3[m]で重量は2,700[kg]である。エンジンを搭載し、油圧で脚を駆動する。Amblerは、長さ3.5[m]、幅3.5[m]、高さ4.5[m]で重量は約2,000[kg]である。こちらは電動で脚が駆動される。このロボットの機構上の特徴は、胴体が2つの部分に別れており、その間を脚がすり抜けることができる。そのため、最後部にあった脚が最前部まで復帰することが可能となっている。MECANT Iは前述の2つのロボットよりは小さく、長さ約3[m]、幅約2.5[m]、高さ約1.5[m]で、重量は1,050[kg]である。やはり、エンジンを搭載し、油圧で脚を駆動する。



Fig.2-7 ASV

Title:  
amb.eps  
Creator:  
EPSON Scan!!!  
Preview:  
この EPS 形式のファイルは、  
プレビュー付きで保存されていませ  
Comment:  
この EPS 形式の図は  
PostScript プリントでのみ  
印刷できます。

Fig.2-8 Ambler

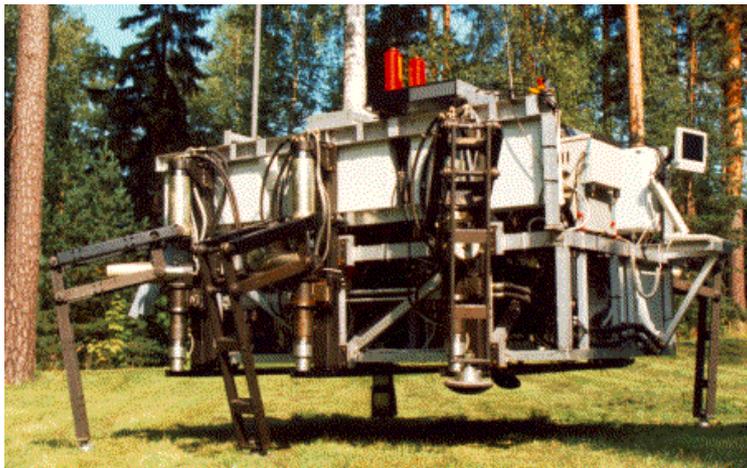


Fig.2-9 MECANT I

歩行はもともと生物の移動形態であるため、多くのロボットは生物と同様な脚機構を採用してきた。確かに、生物の脚機構は長い進化の結果得られた優れた機構であるが、機械であるロボットの脚機構として優れているわけではない。なぜなら生物と同じ素材やアクチュエータが利用できないからである。従って、ロボットにはロボットとして適した脚機構があるはずである。また、そのロボットの用途や移動環境によって適した脚機構は違ってくる。そのため、さまざまな条件を考慮した機構設計が必要である。また、最近では実験レベルではあるが、自立で屋外環境を移動できる脚移動口

ロボットが作られるようになった。しかし、これらは全て6脚移動ロボットである。実際の屋外環境は、理想化してモデル化できるような単純な環境ではないため、機構および制御は高い信頼性が要求される。6脚での歩行は4脚に比較して高い安定性が得られるため、これらのロボットで採用されている。4脚での歩行では、安定性の確保が難しいため、小さなモデル誤差や外乱が歩行の障害となりうる。4脚歩行の実用化のためには、より信頼性の高い機構や制御手法の開発が不可欠である。

## 2.2 多脚移動ロボットの歩容に関する研究

前節では、脚移動ロボットの開発例として、ハードウェアを中心に紹介したが、ロボットがうまく移動するためには、適当な脚の運動(歩容)を決めなければならない。歩容の決定に関しても、多くの研究がなされてきている。4脚歩行ロボットの静的歩行の周期的歩容については、McGheeらが静的安定余裕(static stability margin)という概念を導入して、数学モデルを構築して解析している[11]。その結果、6種類ある4脚歩行ロボットの脚の復帰順のうち、常に静的安定性を保てるものは3種類であることを示している。ここでの歩容の数学的定義は、15個のパラメータによって行っている。その内訳は、デューティファクタに関するものが4つ、脚の初期位置に関するものが8つ、脚どうしのタイミングに関するものが3つである。これにより、厳密に全ての場合を網羅する解析が可能となっているが、実際のロボットに適用することを考えた場合には明らかに不適当な歩容も含まれている。実用性を考えると、より単純で合理的な歩容解析法が必要である。また、ここでの手法は、静的安定性が保てるか否かが着目点であり、静的安定性が保てない場合の解析はなされない。そのため、デューティファクタが0.75より小さくなる動的歩行は考慮されていない。高速な歩行を目指す時、それが可能な動的歩行にも対応できる歩容解析法が必要である。高速で高効率な歩行のために、4脚移動ロボットに動的歩行を適用する研究も行われた[12]。動的歩行では、デューティファクタを0.75より小さくできるため、支持期にある脚の駆動速度を、脚の限界駆動速度に近づけることができ、高速移動が可能である(静的歩行の場合は、支持期脚駆動速度は限界駆動速度の1/3が上限)。また、重力を積極的に利用するため、エネルギー効率の向上も期待できる。歴史的に見て、動的歩行は最初2脚移動ロボットへの適用が研究され、それを4脚移動ロボットに拡張したという流れがある。したがって、4脚を2脚ずつの2組のペアとし、各組の2脚は同じ運動をすることにより、各組が交互に胴体を支持、推進するという、2脚の歩行と類似の制御手法を採用した。結果として利用される歩容は、Fig.2-10に示すよ

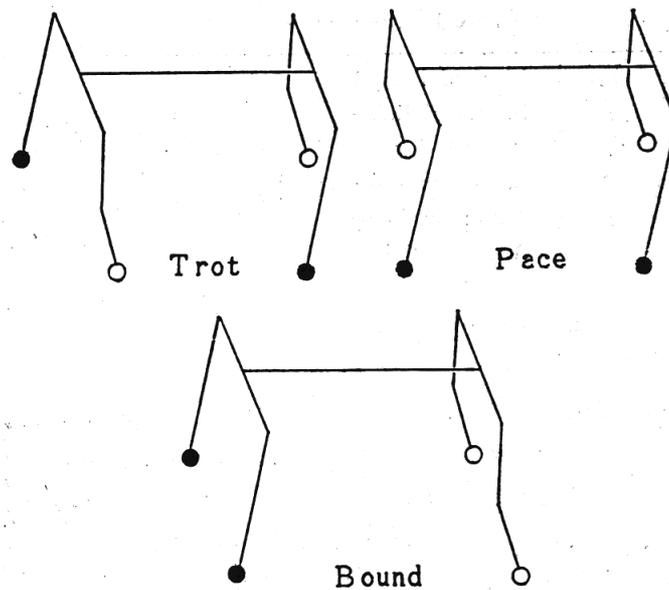


Fig.2-10 Dynamic Walking Gaits for a Quadruped ( 参考文献[12]より )

うな3つの基準対称歩容と呼ばれるものとなった。ペースは同側の2脚が組となって同じ運動をするものであり、トロットは対角の2脚が組となっている。バウンドは前の2脚、後ろの2脚がそれぞれ組となっているものである。このような歩行形態では、歩行中ロボットは基本的に2脚支持期と4脚支持期とを持つことになる(2脚歩行ロボットが1脚支持期と2脚支持期を持つことに対応)。一方、静的安定性を最大限確保することを考えた場合、2脚支持期間は短い方が有利となる。同じデューティファクタを持つ歩容の場合、4脚支持期がある歩容より、3脚支持期がある歩容の方が2脚支持期は短くなる。この観点からすると、3脚支持期を積極的に利用する動的歩行手法が有利であり、そのための歩容解析も不可欠である。

脚移動ロボットの特徴である不整地移動に関する研究も多くなされてきた。不整地の移動では、固定した歩容の周期的歩容では対応できないため、状況に応じて脚軌道を変える適応歩容が必要である。Kleinらは、地面の凹凸に対応するために、脚の制御にアクティブコンプライアンス制御を適用した[13]。脚の鉛直方向の可動範囲内の凹凸であれば、水平面内での脚軌道は一定にしたままで、鉛直方向のみ地面の高さに応じた脚軌道を与えることで、歩行することが可能である。そこで、鉛直方向の脚の運動に、アクティブコンプライアンス制御を適用したものであり、実際に OSU Hexapod に適用し実験を行っている。

脚が接地できない場所を含む環境での歩容についても McGhee[14](6脚歩行)や

広瀬[15] (4脚歩行) によって検討された。McGhee らの手法は、基準となる歩容を設定するのではなく、移動中のサンプリングタイムごとに各脚の状態や静的な安定性の状況に応じて、1)現在の支持状態を継続、2)脚の遊脚化、3)脚の接地、を判断するものである。これに対し広瀬らの方法は、4脚静的歩行では最適と言われているクロール歩容に準拠し、着地点に制限がある場合にはそれに適応し、障害が少なくなるとクロール歩容に収束するというものである。どちらの歩容生成アルゴリズムもその有効性の検証は、コンピュータシミュレーションによって行われている。

傾斜地での歩行に関する研究もいくつか報告されてきた。歩行ロボットが地面の傾斜に沿って胴体を傾けて歩行する場合、静的安定余裕が減少するため、安定に歩行するためにはそれに対応する適応動作が必要である。Lee[16]らは、6脚歩行の場合を取り上げ、1)胴体の高さを低くすること、2)実際に利用する脚の可動範囲を傾斜に応じて変えること、3)実際に利用する脚の可動範囲を歩行速度に応じて拡大すること、によって静的安定余裕の減少を防げることを示した。しかし、このためには地面に関する情報が既知であることが必要であり、その検証もシミュレーションで確認したのみである。広瀬らも、一般化基準脚軌道に関する論文[17]で傾斜地に対する適応について言及した。歩容生成は、1)水平面への歩容計画の投影、2)有効探索範囲の設定、3)歩行タイプの設定、4)ストローク等高線図の作成、5)最長ストロークの探索、6)脚軌道の決定、という手順をとった。クロール歩容に準拠した効率の良い歩容が生成できるが、探索手順が多いため、シミュレーションによる評価に留まった。そのため、実際のロボットヘリアルタイムで適用することが課題となった。また、この手法においても地面の傾斜情報が得られていることが前提とされた。

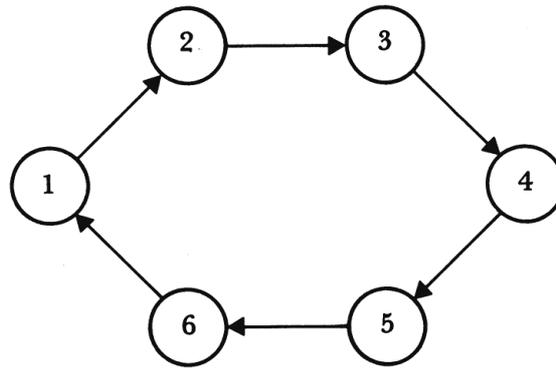
脚移動ロボットが機能的に移動するためには、任意の方向への移動および旋回動作が自由にできることが必要である。自動車のような車輪形の移動機械では、駆動力とステアリングを制御することにより、自由に移動を制御できる。脚移動ロボットの場合は、安定性を保ちながら支持脚を切り換えて移動する必要があるため、旋回等を含んだ移動となると、その歩容は単純に求めることはできない。また、ロボットの移動経路そのものも、前もって知ることができるとは限らず、上位の制御系や操縦するオペレータから、周囲の状況に応じて時々刻々と移動指令が与えられることも考えられる。このように、移動指令に対して即座に対応できるような歩行制御手法を開発することも重要である。Orin[18]は、ジョイスティックを用いて6脚移動ロボットのリアルタイムでの操縦型歩行制御を行った。ロボットは、巡航、側行、旋回の3つの移動モードを持ち、ジョイスティックにより、ロボットの前後方向の並進速度、左右方向

の並進速度、そして垂直軸周りの回転速度を指令として与えられた。6脚移動の場合は、4脚移動と比較して安定性を確保する条件が緩く、問題が容易になっている。4脚移動の場合は、3脚支持状態で移動中に安定性を失う可能性や、可動限界に達した脚があっても即座にその脚を遊脚化できるとは限らないため、問題を複雑化している。そのため、4脚歩行ロボットの歩行制御としては、あらかじめ移動軌跡が与えられており、これに対して安定な歩行が実現できるような歩容を決定していることが多い。広瀬らによって、4脚歩行のための操縦型の歩行制御が試みられているが、1ステップ先までの移動経路を仮定して歩容を決定しており、その1ステップの間の進路変更はできない[19]。

歩容は、脚というメカニズムに、移動という機能を実行させるためのソフトウェアと考えることができる。従って歩容の良し悪しによって移動機能の性能が左右される。特に、脚移動の特徴である環境適応能力を十分に引き出すためには、適切な歩容を生成しなければならない。そのためには、まず移動環境を認識し、それに対応した歩容戦略を構築しなければならない。歩容に関する研究の中には、環境情報が得られていることを前提として、歩容生成アルゴリズムを検討したものが多く見られるが、これでは不十分である。環境情報の取得も含めて歩容を考えなければ、環境適応能力に優れた脚移動ロボットを開発することはできない。環境情報の取得自体も、ロボットの重要な研究要素の1つであり、未だ発展途上の技術である。しかしながら、現在利用できる手法を利用して環境を知り、これに適応した歩容を生成することは、十分意義のあることであり、また必要なことである。

### 2.3 多脚移動ロボットの制御システムに関する研究

初期の脚移動ロボットは、1自由度でリンク機構により複数の脚を動かしていたため、基本的には制御の必要はなかった。しかし、歩容が固定されているため、実用的なものにならなかったのは前述した通りである。1960年代に12自由度を持った4脚ロボット Walking Truck が作られたが、これは、人間の両手両足を用いた、マスタ・スレーブ方式により制御された。熟練したオペレータならうまく歩行できたということだが、一般的に言って、12自由度を人間一人でマニュアル制御することは、非常に困難なことであり、このあたりからいわゆる自動制御システムの必要性が認識された。初めて自動制御された脚移動ロボットは、Phony Pony である。と言ってもまだコンピュータ制御ではなく、電気回路で構成されたシーケンサでの制御である。各脚は腰と膝にアクチュエータ（モータ）を持っているが、現在のように脚の軌道を直接



state number	hip state	knee state
1	locked	locked
2	rearward	locked
3	locked	locked
4	forward	rearward
5	forward	locked
6	locked	forward

Fig.2-11 Finite state control ( 参考文献[5]より )

制御することはしなかった。有限状態制御 ( finite state control ) と呼ばれる制御法で、各関節は、正転、逆転、ロックの3つのモードが定義される。各関節のモードを記述した6～7個の状態を定義しておき、シーケンサが各状態を遷移させていくものである ( Fig.2-11 )。この状態の定義を変えることにより、歩容も変えることができた。

1970年代以後、脚の運動はコンピュータのソフトウェアによるサーボコントロールが主流となった。そしてその制御システムの構造も、階層構造を持つものが多くなった。Fig.2-12にはPV IIで用いられた制御構造[7]を、Fig.2-13にはOSU Hexapodがオペレータに操縦される時の制御システム[18]を示す。いずれも階層構造を採用している。実際にPV IIで行われたのは、レベルCとレベルDだけであった。それより上位の部分は、視覚センサによる環境認識を利用した適応歩容制御と移動経路決定を想定していたが、まだそれらの技術が利用できるレベルに達していなかったため、組み込まれなかった。OSU Hexapodの制御システムの方は、操縦型歩行ということで、上位レベルの制御はオペレータの判断による指令であった。人間を介した視覚フィードバックということで、オペレータがロボットの状態を見て、移動方向や移動速度を指令していた。

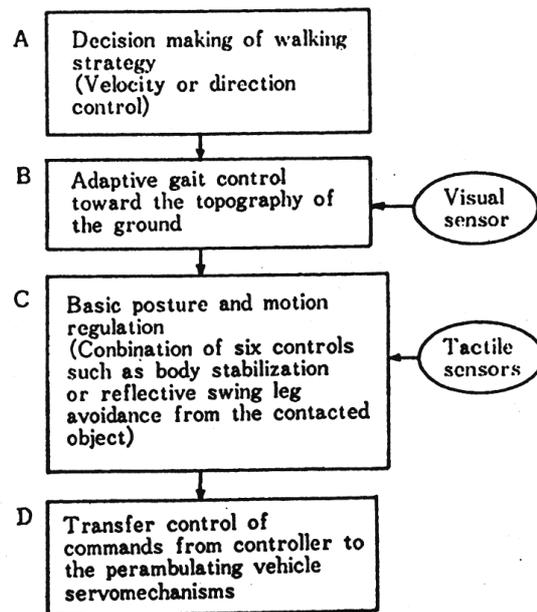


Fig.2-12 Control structure of PV II ( 参考文献[7]より )

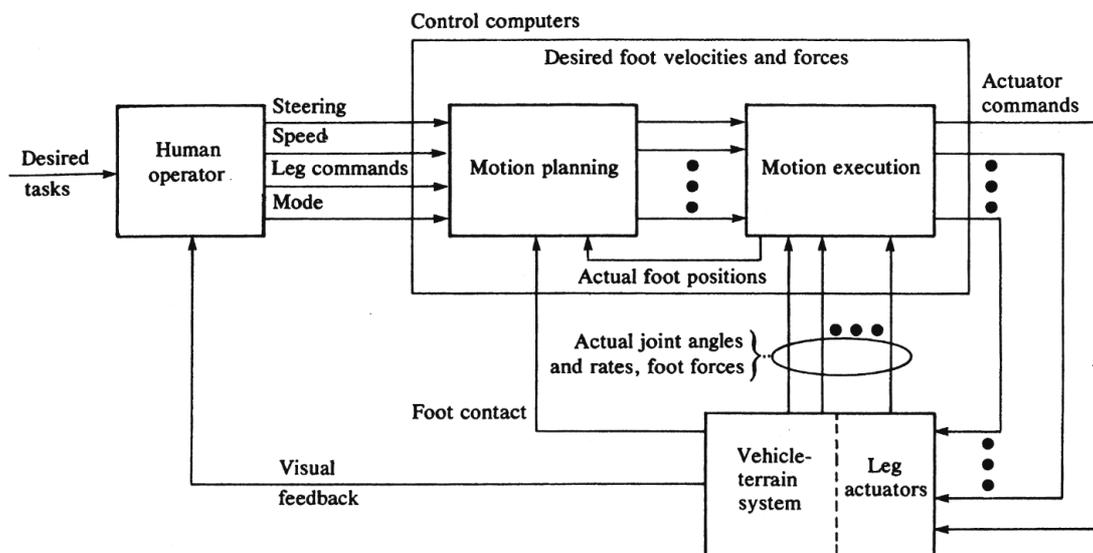


Fig.2-13 Control system of OSU Hexapod ( 参考文献[18]より )

過去の研究で明らかのように、多自由度を持つロボットの制御システムは、階層構造を持っているものが適している。しかし、それだけで脚移動ロボットの制御システムとして十分であろうか。階層構造は、移動という機能を考えた時に有利になる。つまり移動には、移動経路が決定され、次に歩容決定、そして各脚の運動制御、関節制御というレベルがあるからである。脚移動ロボットを機構面から見たらどうか。脚移

動ロボットは、他のロボットとは異なり、脚という同一のサブユニットが多数存在するという特徴を持っている。この特徴も制御システムに反映させることによって、優れた制御システムが構築できるはずである。また、センサシステム等、移動ロボットの周辺技術の進歩に伴って、ロボットの資産が増える状況に対しても対応できる柔軟性、拡張性も制御システムに求められる。

## 2.4 本研究の課題

以上、今までに行われてきた脚移動ロボットの研究を、機構に関する分野、歩容に関する分野、制御システムに関する分野と分けて振り返り、課題を明らかにしてきた。機構に関しては、メカニズム自身で解決できる問題は少なくなってきており、今後の大きな発展のためには、材料、アクチュエータ、エネルギーなど、ロボット工学以外の分野での技術革新の成果の導入が待たれるところである。歩容に関する研究については、ここで紹介したのはほんの一部でしかないが、大変多くの研究がなされてきた。この背景には、コンピュータの進歩により解析がしやすくなったこと、そしてまたシミュレーションによる評価が容易になったことが背景にあると考えられる。しかし、それが実際に役立つためには、外界からセンサでノイズを含んだデータを収集し、それを加工して有用な情報を取り出し、そしてアクチュエータでまた外界に働きかけるということが必要である。また、制御システムもコンピュータの進歩の恩恵を大きく受けた分野である。コンピュータの進歩により、処理能力は高くなったが、それだけでは優れた制御システムはできない。脚移動ロボットの機能面のみならず、機構面での特徴をも反映したシステムの構築が必要である。また、開発の経過とともに、扱う情報や資産も増大してゆく。こういった状況に対応できる柔軟性と拡張性を持った制御システムが必要である。

このような背景のもと、本研究では実際のロボットに適用できる歩容生成手法を課題とする。また、脚移動ロボットの特徴を生かし、柔軟性と拡張性のある制御システムの構築も試みる。本研究の拠り所とするのはリアルロボティクスである。実際に物として動くロボットである。理論やアルゴリズムは正確、厳密でなくてはならないが、それが実物のロボットで役立たなければ何の意味もなさない。そのため、すべての理論、アルゴリズムは実際にロボットにインプリメントでき、リアルタイムで実行できることを想定して研究を進める。周期的歩容の解析では、現実的な条件を考慮することにより、解析のためのパラメータを減らし、より単純な解析法を提案する。そして動的歩行では、同じデューティファクタでもより不安定期間の短い歩容を採用し、現

実的な動的歩行を目指す。また、適応歩容では、現実のロボットで実行できる手法を採用する。従来の手法が、まず環境情報が得られていることを前提としているのに対し、本研究では、環境情報を取得するところから出発する。この環境情報の取得には、脚にかかる力情報を利用する。ロボットの操縦型歩行制御では、移動中はいつでも進路変更ができることを課題とした。制御システムに関しては、階層構造を持つことは、もはやあたり前のこととなっているが、それに加えて分散・並列処理が可能なシステムを構築することを課題とする。さらにセンサ等の機能拡張に対して柔軟なシステムを開発する。

最後に繰り返すが、本研究の課題は実際に検証できる歩行ロボット制御手法の開発である。実際に検証できるためには、もちろん理論が正しくなければいけない、高いロバスト性を持たなければならない、信頼性が高くなければならない等、いろいろな要素があるだろう。しかし、最も重要であると考えているのは、わかりやすく、単純で、そして有用であるということである。

## 2.5 本章のまとめ

本章では、今までに行われてきた脚移動ロボットに研究成果をを、機構に関する分野、歩容に関する分野、そして制御システムに関する分野と分けて紹介するとともに、解決すべき課題を明らかにした。そして、本研究で取り上げる課題は、歩容生成問題とそれを実行するための制御システムであり、実際のロボットで検証できる手法の開発を目的とする。

## 第3章 周期的歩容の解析

### 3.1 緒言

本章では、4脚移動ロボットが継続的に安定性を保ちながら移動するための周期的歩容を解析する。脚移動ロボットの歩容としては、周期的歩容と非周期的歩容（自由歩容）の2種類が考えられる。周期的歩容とは、一定の脚の動きがサイクルタイムごとに繰り返される歩容であり、平坦で単純な環境での移動に用いられ、比較的単純な制御で歩行が実現できる。一方非周期的歩容は、不整地など複雑な移動環境で用いられ、地形等の条件に応じて脚の運動は変化してゆく。4脚歩行の歩容は、Muybridgeにより動物の歩行を連続写真で記録し解析することから始まった[1]が、定常状態においては周期的歩容を利用していることが明らかになる。そしてその歩容も歩行速度によって違ったものとなっていることがわかった。周期的歩容を数学的モデルを利用し、工学的に歩容を解析することがMcGheeによって行われた[11]。工学的に歩行ロボットを実現するにあたって、静的歩行を行うための歩容がまず着目された。ロボットの重心の水平面への垂直投影点が支持多角形の内部にある場合、静的安定性が保たれているといい、歩行中常に静的安定性が保持されている歩行を静的歩行という。自然界の4足動物は、ほとんどの場合、2脚以下で胴体を支持する期間がある動的歩行を行うこととは対照的な展開となっている。しかしながら、脚移動ロボットの開発目的の多くは不整地への適応ということから、より安定な歩行が実現しやすい静的歩行の選択は妥当な方向である。その後、高速で高効率な歩行が可能ということで、動的歩行の研究も行われてきている。

4脚静的歩行において、各脚が遊脚での運動と支持脚での運動で往復運動をするとした場合、一定速度で歩行するためには、遊脚での脚駆動速度は支持脚での駆動速度に比較して、3倍以上が要求される。従って、最大歩行速度は最大脚駆動速度の1/3以下ということである。一方、動的歩行を行った場合には、遊脚での駆動速度と支持脚での駆動速度は等しくすることが可能であり、最大脚駆動速度で歩行することも理論的には可能である。

本章では、4脚移動ロボットが水平面上を一定速度で直進する時の周期的歩容を対象に解析を進める[27]。数学的には多種多様な歩容が考えられるが、各脚は同一のデューティファクタ（1歩行周期における支持脚期間の比率）を持ち、各脚は重心に対して対称に配置されると仮定し、また歩容の対称性を加味すると、デューティファクタと前後の脚の位相差で歩容を特徴づけることができることを示す。このパラメータ

を、静的安定性を最大限確保するという観点から評価し、静的歩容、動的歩容それぞれについて最適な歩容を導出する。また、動的歩容では、歩行中に存在する静的不安定状態のロボットの運動を解析し、これを動的に安定化させるための制御手法の検討も行う。さらに、求められた最適な歩容を実際のロボットに適用した場合の実験結果も示す。

3.2節では、歩容の解析法について記述する。そのために、まず最初に解析に必要な用語やパラメータについて定義をする。これらを用いて、周期的歩容を数学的なパラメータで記述する方法を導出する。この記述法であらゆる周期的歩容を表現できるが、より現実的で合理的な条件を付加することにより、少ないパラメータで簡単に、かつ系統的に歩容を解析・評価することができることを示す。この解析法を用いて静的歩行のための周期的歩容を評価した結果を3.3節に、そして動的歩行に関する評価を3.4節で示す。3.5節では、評価結果から得られた最適な歩容を歩行ロボットに適用した実験結果を示す。あわせて実験に使用されたロボットも紹介する。そして3.6節でこの章をまとめる。

## 3.2 歩容の解析法

### 3.2.1 解析のための諸定義

歩容を解析するために必要な定義を行う。まず始めに歩容を数学的に表現するための用語およびパラメータについて定義する。

#### 定義1：周期的歩容

各脚の運動が、一定周期  $T$  ごとに繰り返すような歩容を周期的歩容という。各脚の周期は同一とする。またこの周期を歩行周期と呼ぶ。

#### 定義2：支持脚期と遊脚期

脚の動作は、地面に着地し進行方向に対して後方に移動させ胴体を推進する支持脚期と、宙に浮かせ前方に復帰する遊脚期から構成され、1回の支持脚期と1回の遊脚期をもって1周期とする。

#### 定義3：デューティファクタ $d_i$

1歩行周期中における脚  $i$  の支持脚期間の比率をデューティファクタ  $d_i$  とする。脚  $i$  の支持脚期にある時間を  $T_{si}$ 、遊脚期にある時間を  $T_{ri}$  とすると、デューティファ

クタ  $b_i$  は次のように定義される。

$$b_i = T_{si} / (T_{si} + T_{ri}) = T_{si} / T$$

#### 定義 4：位相 $f_i$

1 歩行周期における脚 1（右前脚）の支持脚期開始時から脚  $i$ （ $i=2,3,4$ ）の支持脚期開始時までの時間を、歩行周期を 1 とした時の比率で表したものを脚  $i$  の位相  $f_i$  とし、0 から 1 までの数値で表す。なお、脚 2 は左前脚、脚 3 は右後脚、脚 4 は左後脚とする。

#### 定義 5：ストライド $d$

1 歩行周期でロボット本体が移動する距離をストライド  $d$  とする。

#### 定義 6：ストローク $r_i$

脚  $i$  の支持脚期と遊脚期との往復運動軌跡の胴体に固定された座標から見た長さをストロークという。なお、ストローク  $r_i$  とストライド  $d$  の間には、 $r_i = b_i d$  の関係がある。

#### 定義 7：脚基準位置 ( $x_i, y_i$ )

ロボットの重心に原点を持ち、 $x$  方向は進行方向、 $y$  方向はロボットの左側に向かう方向に持つような座標系で、脚  $i$  の往復運動軌跡の midpoint の位置を脚基準位置という。

以上、歩容解析のための用語やパラメータの定義を行ってきたが、ここで周期的歩容を特徴付けるパラメータを選んでみる。まず、歩行周期  $T$  やストライド  $d$  は、これらの数値が変わっても、脚相互の運動の関係は変わらないため、歩容を変えるパラメータとはなり得ない。またストローク  $r_i$  であるが、これはデューティファクタ  $b_i$  に従属したパラメータである。これらのことから、4 脚移動ロボットの周期的歩容を規定するものとしては、デューティファクタ、位相、基準位置であり、15 個のパラメータが必要なことがわかる。これらのパラメータの物理的な意味をわかりやすく言い変えると、各脚の往復運動を行う位置とその往復運動の距離、そして各脚の運動の相対的な時間的關係（タイミング）である。これを Fig. 3-1 に示す。

次は、歩容を評価するのに必要となる安定性に関する項目の定義をする。

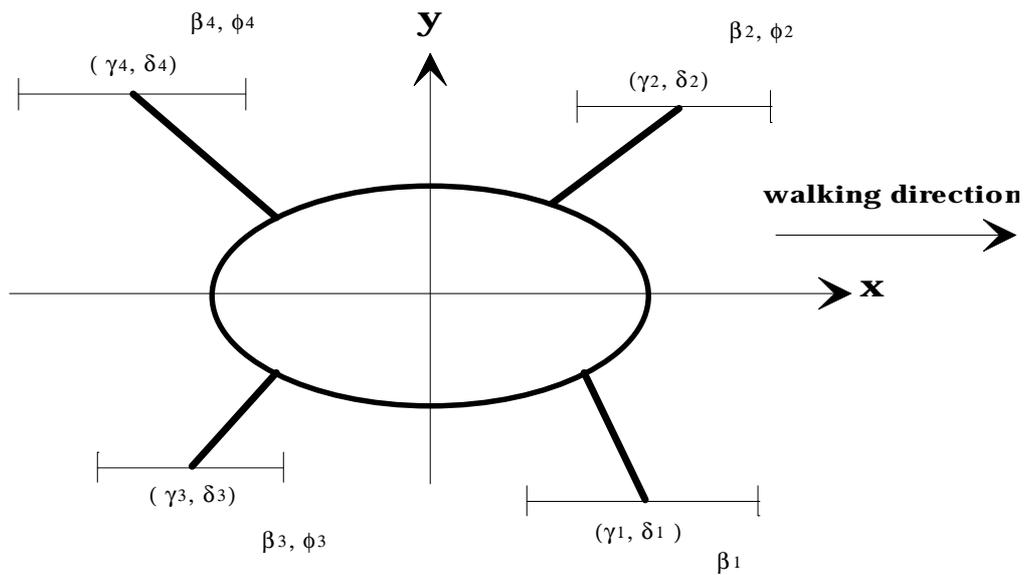


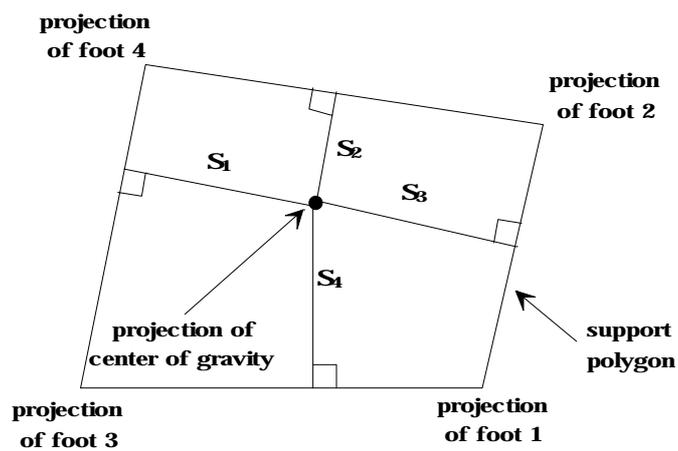
Fig.3-1 Parameters for periodic gait

**定義 8 : 支持多角形**

ロボットを支持している脚の接地点を水平面に射影し、これらの点を結んでできる凸多角形を支持多角形という。

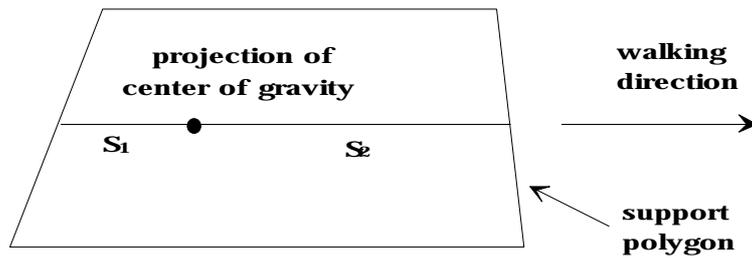
**定義 9 : 安定余裕  $S_M$**

ロボットの重心の水平面への射影点から、支持多角形の境界までの最短距離 ( Fig.



$$S_M = \text{Min.} ( S_1, S_2, S_3, S_4 )$$

Fig. 3-2 Stability margin



$$S_L = \text{Min.} ( S_1, S_2 )$$

Fig. 3-3 Longitudinal stability margin

3-2 参照) を安定余裕という。この重心の射影点が支持多角形の内部にあれば、静的安定が保たれているという。

#### 定義 1 0 : 進行方向安定余裕 $S_L$

ロボットの重心の水平面への射影点から、進行方向（負方向も含む）での支持多角形の境界までの最短距離（Fig. 3-3 参照）を進行方向安定余裕という。前方の境界までの距離と後方の境界までの、短い方である。

#### 定義 1 1 : 歩容安定余裕 $S$

周期的歩容に対して、1 周期を通して進行方向安定余裕の最小値を歩容安定余裕  $S$  と呼ぶ。この値が 0 以上であれば、その歩容を静的安定という。そうでなければ、その歩容は静的不安定である。

### 3 . 2 . 2 現実的な歩容のための条件

前節では、4 脚移動ロボットの直進のための周期的歩容は、15 個のパラメータで定義されることを示した。このパラメータにより、すべての周期的歩容を表現できる。しかし、これらの中には、現実的にはあまり意味がなかったり、ロボットの機構と照らし合わせてみた時には不合理なものまで含まれる。そこで、ここでは対象とする歩容に更に条件を加え、現実的な歩容を絞り込むことにする。

まず始めに課す条件は、デューティファクタについてである。先の歩容の定義では、各脚が違ったデューティファクタを持つことが可能である。しかしながら、デューティファクタが各脚で異なるということは、脚によってロボット本体を支持する時間が異なるということであり、全体としてはバランスの崩れた歩容が予想される。そこで

ここでは、すべての脚は等しいデューティファクタを持つことを条件とする。

#### 定義 1 2 : レギュラーな歩容

すべての脚のデューティファクタが等しい時、その歩容はレギュラーであるという。

今後、レギュラーな歩容に対しては、その共通のデューティファクタの値を  $r$  で表すことにする。当然のことながら、レギュラーな歩容においては、各脚は同じストロークを持つ。この共通なストロークを今後  $r$  と表現することにする。

レギュラーな歩容という条件を課したことにより、各脚は同じデューティファクタとストロークを持つことになった。これは、各脚の運動は、位相と運動の絶対的な位置は異なるが、全く同一の軌跡で脚を動かしていることになる。このような状況においては、各脚の脚基準位置は、ロボットの重心位置に対して対称に分布させることが合理的である。脚にかかる荷重の均等配分という面からも合理的である。さらにはロボットの機構設計でも対称性を取り入れることは多い。このような条件を加えると、各脚の基準位置は長方形の各頂点に配置されることになる。この場合は、安定性の解析において、各基準位置はどこにあってもその定量的な意味は持っても、定性的には無意味になる。言い換えれば、脚の基準位置が変わっても、4つの基準位置が重心位置に対して対称で長方形の頂点にあれさえすれば、静的な安定が保たれていたならば引き続き安定であり、不安定であったならば不安定であり続ける。もちろん安定余裕の大きさは変化するが、安定・不安定は不変である。したがって、脚基準位置は歩容の安定性の解析においては無関係になる。

#### 定義 1 3 : 対称配置な歩容

各脚の基準位置が、進行方向に対して左右対称に、かつ重心位置についても対称に配置された歩容を対称配置な歩容という。

各脚の基準位置の対称配置は主に幾何学的要因での合理性の結果であるが、歩容の対称性も考慮されるべき物である。採用する歩容によってロボットの移動特性は異なる。前後に関しては、その移動特性が異なることは十分考え得ることであるが、左右に関しては、同等の特性を持つことが合理的である。例えば、右側の脚を上げた時は、左側の脚を上げた時に比べてバランスを崩しやすい、といった状況は好ましいものではなく、左右どちらでも同等の安定性が確保されるべきである。そのため、周期的歩

容に課す3つめの条件として、左右での対称性を挙げる。

定義 1 4 : 両側対称な歩容

前脚および後脚において、左右の脚の位相差が 0.5 であるような歩容を両側対称な歩容という。

Fig.3-1 のように、進行方向に対して右前脚を脚 1、左前脚を脚 2、右後脚を脚 3、左後脚を脚 4 とすると、 $\phi_2=0.5$ 、 $\phi_3 - \phi_4 = \pm 0.5$  であるような歩容が対称な歩容である。脚 3 と脚 4 の位相は従属関係にあるため、どちらか 1 つの位相で歩容を規定できる。今後は、脚 4 の位相  $\phi_4$  を独立なパラメータとして扱い、これを改めて位相差と定義する。

以上のように、現実的で合理的な歩容のために 3 つの条件 (レギュラーな歩容、対称配置な歩容、両側対称な歩容) を加えることにより、15 個のパラメータで規定されていた 4 脚移動ロボットの歩容が、デューティファクタ と位相差 の 2 つのパラメータで規定できるようになった。この周期的歩容の解析の方法であるが、Fig.3-4 の図を用いて説明する。この図において、x 軸は各脚先位置をそれぞれの脚基準位置を原点にした座標で示してあり、ストロークを 1 としている。横軸は時間であるが、歩行周期で正規化してある。前述したように前の 2 脚 (脚 1 と脚 2) の位相の差は

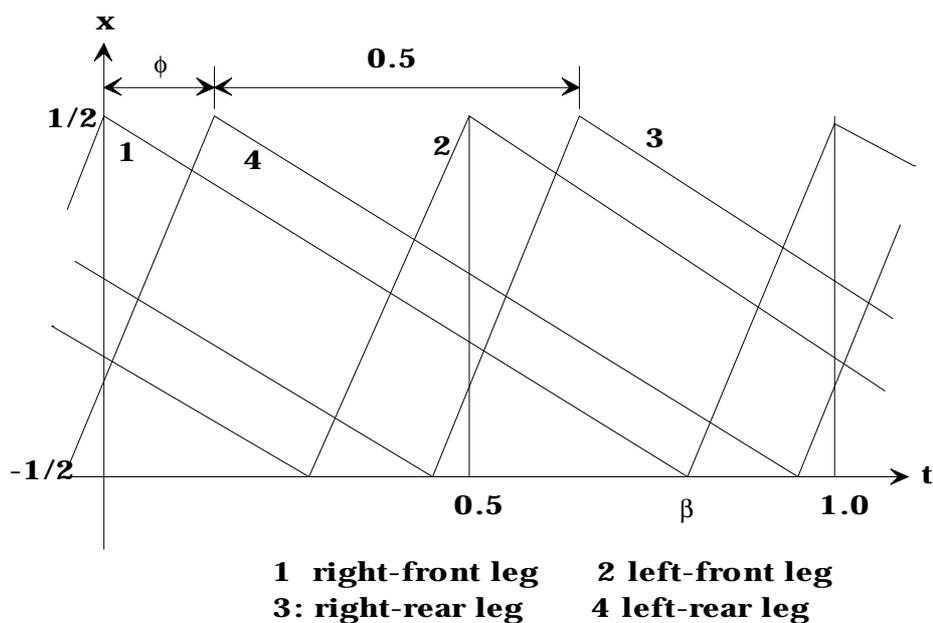


Fig. 3-4 Foot motion

0.5 であり、同様に後ろの 2 脚（脚 3 と脚 4）の位相差も 0.5 である。右下がりの直線は、支持脚期の脚の運動を示し、右上りの直線は遊脚期の運動を表している。右前脚と左後脚の位相差を  $\beta$  としている。デューティファクタ  $\beta$  を固定して、位相差  $\phi$  を 0 から 1 まで変化させることにより、さまざまな歩容が出現する。

### 3.3 静的歩行

静的歩行の場合は、3 または 4 脚が常に接地していなければならず、1 脚づつしか遊脚化できない。そして重心の垂直投影点が常に支持多角形の内部に存在しなければならない。常に 3 脚以上の接地点を確保するためには、デューティファクタの値が 0.75 以上であることが必要条件である。このような条件下で、右前脚と左後脚との位相差  $\phi$  を 0 から 1 まで変化させた時に現れる歩容の内容を検討し、その支持状態の推移を示す。なお、以下の歩容の説明の時、時間  $t$  は歩行周期で正規化しており、 $0 \leq t < 1$  である。

#### (1) $\beta = 0$ の時

4 脚支持期と 2 脚支持期が存在し、4 つの支持状態

$0 \leq t < \beta - 0.5$	4 脚支持期
$\beta - 0.5 \leq t < 0.5$	右前脚と左後脚の 2 脚支持期
$0.5 \leq t < \beta$	4 脚支持期
$\beta \leq t < 1$	左前脚と右後脚の 2 脚支持期

#### (2) $0 < \beta < 1 - \phi$ の時

2 脚支持期、3 脚支持期、4 脚支持期が存在し、8 つの支持状態

$0 \leq t < \phi$	右前脚、左前脚、右後脚の 3 脚支持期
$\phi \leq t < \beta - 0.5$	4 脚支持期
$\beta - 0.5 \leq t < \beta + \phi - 0.5$	右前脚、右後脚、左後脚の 3 脚支持期
$\beta + \phi - 0.5 \leq t < 0.5$	右前脚、左後脚の 2 脚支持期
$0.5 \leq t < \phi + 0.5$	右前脚、左前脚、左後脚の 3 脚支持期
$\phi + 0.5 \leq t < \beta$	4 脚支持期
$\beta \leq t < \beta + \phi$	左前脚、右後脚、左後脚の 3 脚支持期
$\beta + \phi \leq t < 1$	右前脚、左後脚の 2 脚支持期

#### (3) $\beta = 1 - \phi$ の時

3 脚支持期、4 脚支持期が存在し、6 つの支持状態

0	$t < 1-\beta$	右前脚、左前脚、右後脚の3脚支持期
$1-\beta$	$t < \beta-0.5$	4脚支持期
$\beta-0.5$	$t < 0.5$	右前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期
0.5	$t < 1.5-\beta$	右前脚、左前脚、左後脚の3脚支持期
$1.5-\beta$	$t < \beta$	4脚支持期
$\beta$	$t < 1$	左前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期

(4)  $1-\beta < t < -0.5$ の時

3脚支持期、4脚支持期が存在し、8つの支持状態

0	$t < \beta+\phi-1$	4脚支持期
$\beta+\phi-1$	$t < \phi$	右前脚、左前脚、右後脚の3脚支持期
$\phi$	$t < \beta-0.5$	4脚支持期
$\beta-0.5$	$t < 0.5$	右前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期
0.5	$t < \beta+\phi-0.5$	4脚支持期
$\beta+\phi-0.5$	$t < \phi+0.5$	右前脚、左前脚、左後脚の3脚支持期
$\phi+0.5$	$t < \beta$	4脚支持期
$\beta$	$t < 1$	左前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期

(5)  $t = -0.5$ の時

3脚支持期、4脚支持期が存在し、6つの支持状態

0	$t < 2\beta-1.5$	4脚支持期
$2\beta-1.5$	$t < \beta-0.5$	右前脚、左前脚、右後脚の3脚支持期
$\beta-0.5$	$t < 0.5$	右前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期
0.5	$t < 2\beta-1$	4脚支持期
$2\beta-1$	$t < \beta$	右前脚、左前脚、左後脚の3脚支持期
$\beta$	$t < 1$	左前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期

(6)  $-0.5 < t < 0.5$ の時

2脚支持期、3脚支持期、4脚支持期が存在し、8つの支持状態

0	$t < \beta+\phi-1$	4脚支持期
$\beta+\phi-1$	$t < \beta-0.5$	右前脚、左前脚、右後脚の3脚支持期
$\beta-0.5$	$t < \phi$	右前脚、右後脚の2脚支持期
$\phi$	$t < 0.5$	右前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期
0.5	$t < \beta+\phi-0.5$	4脚支持期
$\beta+\phi-0.5$	$t < \beta$	右前脚、左前脚、左後脚の3脚支持期

$\beta \quad t < \phi+0.5$                       左前脚、左後脚の 2 脚支持期  
 $\phi+0.5 \quad t < 1$                       左前脚、右後脚、左後脚の 3 脚支持期

(7)  $= 0.5$  の時

4 脚支持期と 2 脚支持期が存在し、4 つの支持状態

$0 \quad t < \beta-0.5$                       4 脚支持期  
 $\beta-0.5 \quad t < 0.5$                       右前脚と右後脚の 2 脚支持期  
 $0.5 \quad t < \beta$                           4 脚支持期  
 $\beta \quad t < 1$                               左前脚と左後脚の 2 脚支持期

(8)  $0.5 < < 1.5-$  の時

2 脚支持期、3 脚支持期、4 脚支持期が存在し、8 つの支持状態

$0 \quad t < \phi-0.5$                       右前脚、左前脚、左後脚の 3 脚支持期 (不安定)  
 $\phi-0.5 \quad t < \beta-0.5$                       4 脚支持期  
 $\beta-0.5 \quad t < \beta+\phi-1$                       右前脚、右後脚、左後脚の 3 脚支持期 (不安定)  
 $\beta+\phi-1 \quad t < 0.5$                       右前脚、右後脚の 2 脚支持期  
 $0.5 \quad t < \phi$                           右前脚、左前脚、右後脚の 3 脚支持期 (不安定)  
 $\phi \quad t < \beta$                               4 脚支持期  
 $\beta \quad t < \beta+\phi-0.5$                       左前脚、右後脚、左後脚の 3 脚支持期 (不安定)  
 $\beta+\phi-0.5 \quad t < 1$                       左前脚、左後脚の 2 脚支持期

(9)  $= 1.5-$  の時

3 脚支持期、4 脚支持期が存在し、6 つの支持状態

$0 \quad t < 1-\beta$                           右前脚、左前脚、左後脚の 3 脚支持期 (不安定)  
 $1-\beta \quad t < \beta-0.5$                       4 脚支持期  
 $\beta-0.5 \quad t < 0.5$                       右前脚、右後脚、左後脚の 3 脚支持期 (不安定)  
 $0.5 \quad t < 1.5-\beta$                       右前脚、左前脚、右後脚の 3 脚支持期 (不安定)  
 $1.5-\beta \quad t < \beta$                           4 脚支持期  
 $\beta \quad t < 1$                               左前脚、右後脚、左後脚の 3 脚支持期 (不安定)

(10)  $1.5- < <$  の時

3 脚支持期、4 脚支持期が存在し、8 つの支持状態

$0 \quad t < \beta+\phi-1.5$                       4 脚支持期  
 $\beta+\phi-1.5 \quad t < \phi-0.5$                       右前脚、左前脚、左後脚の 3 脚支持期 (不安定)  
 $\phi-0.5 \quad t < \beta-0.5$                       4 脚支持期  
 $\beta-0.5 \quad t < 0.5$                       右前脚、右後脚、左後脚の 3 脚支持期 (不安定)

$0.5 < t < \beta + \phi - 1$	4脚支持期
$\beta + \phi - 1 < t < \phi$	右前脚、左前脚、右後脚の3脚支持期（不安定）
$\phi < t < \beta$	4脚支持期
$\beta < t < 1$	左前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期（不安定）

(11)  $=$  の時

3脚支持期、4脚支持期が存在し、6つの支持状態

$0 < t < 2\beta - 1.5$	4脚支持期
$2\beta - 1.5 < t < \beta - 0.5$	右前脚、左前脚、左後脚の3脚支持期（不安定）
$\beta - 0.5 < t < 0.5$	右前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期（不安定）
$0.5 < t < 2\beta - 1$	4脚支持期
$2\beta - 1 < t < \beta$	右前脚、左前脚、右後脚の3脚支持期（不安定）
$\beta < t < 1$	左前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期（不安定）

(12)  $< < 0.5$  の時

2脚支持期、3脚支持期、4脚支持期が存在し、8つの支持状態

$0 < t < \beta + \phi - 1.5$	4脚支持期
$\beta + \phi - 1.5 < t < \beta - 0.5$	右前脚、左前脚、左後脚の3脚支持期（不安定）
$\beta - 0.5 < t < \phi - 0.5$	右前脚、左後脚の2脚支持期
$\phi - 0.5 < t < 0.5$	右前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期（不安定）
$0.5 < t < \beta + \phi - 1$	4脚支持期
$\beta + \phi - 1 < t < \beta$	右前脚、左前脚、右後脚の3脚支持期（不安定）
$\beta < t < \phi$	左前脚、右後脚の2脚支持期
$\phi < t < 1$	左前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期（不安定）

以上、位相差  $\phi$  を0から1まで変化させた時に得られる12種類の歩容の支持状態の遷移を示してきたが、これらの歩容全てが利用できるわけではない。そこで、これらの歩容を次のような観点から評価する。

4脚支持期の存在

静的に安定な3脚支持期の存在

静的に不安定な3脚支持期の存在

2脚支持期の存在

その結果をまとめて Table 3-1 に示す。なお、これらの評価において、重心はロボットの幾何学的中心にあると仮定する。静的歩行においては、2脚支持期や静的に不安

Table 3-1 Classification of gait ( 0.75 )

type		two-legged supporting	Three-legged supporting		four-legged supporting
			Stable	unstable	
(1)	0	E*	DNE**	DNE	E
(2)	0 ~ 1-β	E	E	DNE	E
(3)	1-β	DNE	E	DNE	E
(4)	1-β ~ β-0.5	DNE	E	DNE	E
(5)	β-0.5	DNE	E	DNE	E
(6)	β-0.5 ~ 0.5	E	E	DNE	E
(7)	0.5	E	DNE	E	E
(8)	0.5 ~ 1.5-β	E	DNE	E	E
(9)	1.5-β	DNE	DNE	E	E
(10)	1.5-β ~ β	DNE	DNE	E	E
(11)	β	DNE	DNE	E	E
(12)	β ~ 1	E	DNE	E	E

E\* = Exists.

DNE\*\* = Does not exist

定な3脚支持期の存在は好ましくない。したがって、Table 3-2 に示された歩容のうち、(3)から(5)の歩容が候補として残る。つまり、位相差  $\phi$  の値が  $1-\beta$  から  $\beta-0.5$  のとき静的歩行が可能である。さらに、これらの歩容の安定余裕  $S$  は、

$$S = (\mathbf{b} + \mathbf{f} - 1) / (2\mathbf{b}) \quad (3-1)$$

と求められる。この式からわかるように、位相差  $\phi$  の値が  $\beta-0.5$  のとき最大の安定余裕  $(2\beta-1.5) / (2\beta)$  を持つ。したがって、(5)の歩容が静的歩行にとって最も望ましい歩容である。この歩容では、1周期中4回の3脚支持期と2回の4脚支持期が存在する。この歩容はウェーブ歩容として知られているものである。この時の脚の運動を、Fig.3-5 に示す。静的歩行と動的歩行の境界の条件となるデューティファクタ  $\beta=0.75$  の場合には、位相差  $\phi=0.25$  の時にのみ静的な歩行が可能となるが、この時の安定余裕は0となる。この歩容はクロール歩容として知られており、その時の脚の動きを Fig.3-6 に示す。

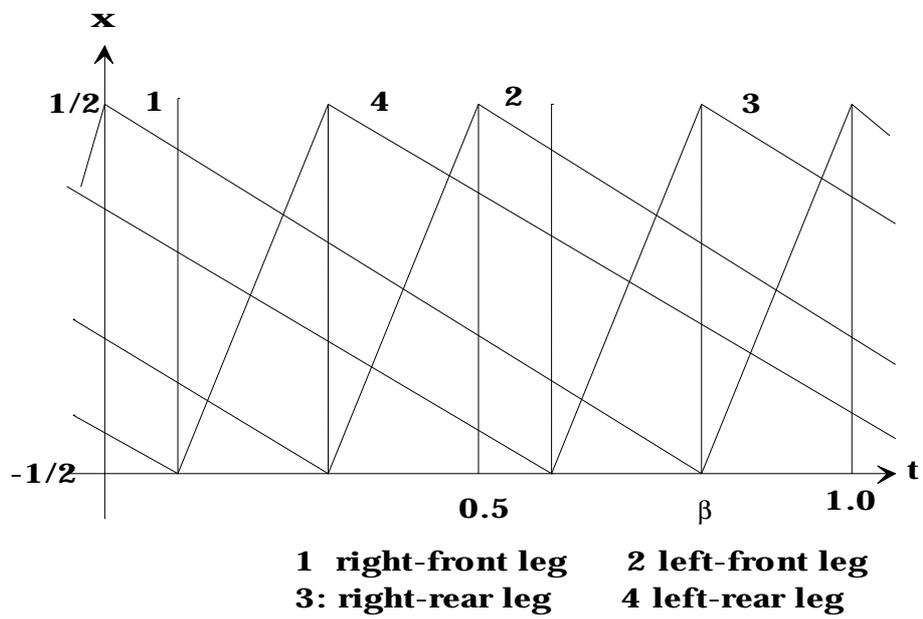


Fig. 3-5 Wave gait ( $\beta=0.8$ )

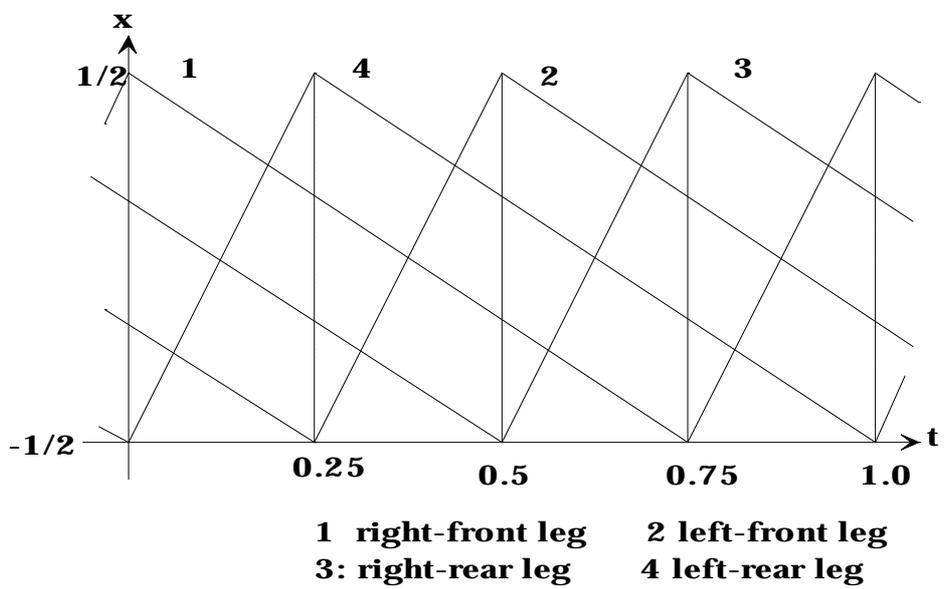


Fig. 3-6 Crawl gait

### 3.4 動的歩行

#### 3.4.1 歩容解析

静的歩行の場合には、遊脚期の脚駆動速度が支持期のそれに比べて3倍以上になることが要求される。そのため、歩行速度は最大脚駆動速度の1/3以下に制限される。歩行速度の向上のためにはデューティファクタの値を0.75より小さくする必要があるが、必然的にロボット本体を2脚で支持する必要性が生じる。2脚支持では、静的には不安定なため、動的な安定を保つことが必要である。ここでは2脚支持期のある動的歩行のための歩容を考える。静的歩行の時と同様な方法で歩容を検討する。つまり、レギュラーな歩容で、対称配置、両側対称という条件を課す。異なる点は、デューティファクタの値が0.5より大きく0.75より小さいという条件である。前節と同じように、右前脚と左後脚の位相差を  $\phi$  として、その値を0から1まで変化させた時に現れる歩容の支持パターンを調べる。

#### (1) $\phi = 0$ の時

4脚支持期と2脚支持期が存在し、4つの支持状態

$0 < t < \beta - 0.5$	4脚支持期
$\beta - 0.5 < t < 0.5$	右前脚と左後脚の2脚支持期
$0.5 < t < \beta$	4脚支持期
$\beta < t < 1$	左前脚と右後脚の2脚支持期

#### (2) $0 < \phi < -0.5$ の時

2脚支持期、3脚支持期、4脚支持期が存在し、8つの支持状態

$0 < t < \phi$	右前脚、左前脚、右後脚の3脚支持期
$\phi < t < \beta - 0.5$	4脚支持期
$\beta - 0.5 < t < \beta + \phi - 0.5$	右前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期
$\beta + \phi - 0.5 < t < 0.5$	右前脚、左後脚の2脚支持期
$0.5 < t < \phi + 0.5$	右前脚、左前脚、左後脚の3脚支持期
$\phi + 0.5 < t < \beta$	4脚支持期
$\beta < t < \beta + \phi$	左前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期
$\beta + \phi < t < 1$	右前脚、左後脚の2脚支持期

#### (3) $\phi = -0.5$ の時

2脚支持期、3脚支持期が存在し、6つの支持状態

$0 < t < \beta - 0.5$	右前脚、左前脚、右後脚の3脚支持期
-----------------------	-------------------

$\beta-0.5$	$t < 2\beta-1$	右前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期
$2\beta-1$	$t < 0.5$	右前脚、右後脚の2脚支持期
$0.5$	$t < \beta$	右前脚、左前脚、左後脚の3脚支持期
$\beta$	$t < 2\beta-0.5$	左前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期
$2\beta-0.5$	$t < 1$	左前脚、右後脚の2脚支持期

(4)  $-0.5 < < 1-$  の時

3脚支持期、4脚支持期が存在し、8つの支持状態

$0$	$t < \beta-0.5$	右前脚、左前脚、右後脚の3脚支持期
$\beta-0.5$	$t < \phi$	右前脚、右後脚の2脚支持期
$\phi$	$t < \beta+\phi-0.5$	右前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期
$\beta+\phi-0.5$	$t < 0.5$	右前脚、左後脚の2脚支持期
$0.5$	$t < \beta$	右前脚、左前脚、左後脚の3脚支持期
$\beta$	$t < \phi+0.5$	左前脚、左後脚の2脚支持期
$\phi+0.5$	$t < \beta+\phi$	左前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期
$\beta+\phi$	$t < 1$	左前脚、右後脚の2脚支持期

(5)  $= 1-$  の時

2脚支持期、3脚支持期が存在し、6つの支持状態

$0$	$t < \beta-0.5$	右前脚、左前脚、右後脚の3脚支持期
$\beta-0.5$	$t < 1-\beta$	右前脚、右後脚の2脚支持期
$1-\beta$	$t < 0.5$	右前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期
$0.5$	$t < \beta$	右前脚、左前脚、左後脚の3脚支持期
$\beta$	$t < 1.5-\beta$	左前脚、左後脚の2脚支持期
$1.5-\beta$	$t < 1$	左前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期

(6)  $1- < < 0.5$  の時

2脚支持期、3脚支持期、4脚支持期が存在し、8つの支持状態

$0$	$t < \beta+\phi-1$	4脚支持期
$\beta+\phi-1$	$t < \beta-0.5$	右前脚、左前脚、右後脚の3脚支持期
$\beta-0.5$	$t < \phi$	右前脚、右後脚の2脚支持期
$\phi$	$t < 0.5$	右前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期
$0.5$	$t < \beta+\phi-0.5$	4脚支持期
$\beta+\phi-0.5$	$t < \beta$	右前脚、左前脚、左後脚の3脚支持期
$\beta$	$t < \phi+0.5$	左前脚、左後脚の2脚支持期

$\phi+0.5 \quad t < 1$  左前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期

(7)  $\phi = 0.5$  の時

4脚支持期と2脚支持期が存在し、4つの支持状態

$0 \quad t < \beta-0.5$  4脚支持期

$\beta-0.5 \quad t < 0.5$  右前脚と右後脚の2脚支持期

$0.5 \quad t < \beta$  4脚支持期

$\beta \quad t < 1$  左前脚と左後脚の2脚支持期

(8)  $0.5 < \phi < 1$  の時

2脚支持期、3脚支持期、4脚支持期が存在し、8つの支持状態

$0 \quad t < \phi-0.5$  右前脚、左前脚、左後脚の3脚支持期 (不安定)

$\phi-0.5 \quad t < \beta-0.5$  4脚支持期

$\beta-0.5 \quad t < \beta+\phi-1$  右前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期 (不安定)

$\beta+\phi-1 \quad t < 0.5$  右前脚、右後脚の2脚支持期

$0.5 \quad t < \phi$  右前脚、左前脚、右後脚の3脚支持期 (不安定)

$\phi \quad t < \beta$  4脚支持期

$\beta \quad t < \beta+\phi-0.5$  左前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期 (不安定)

$\beta+\phi-0.5 \quad t < 1$  左前脚、左後脚の2脚支持期

(9)  $\phi = 1$  の時

2脚支持期、3脚支持期が存在し、6つの支持状態

$0 \quad t < \beta-0.5$  右前脚、左前脚、左後脚の3脚支持期 (不安定)

$\beta-0.5 \quad t < 2\beta-1$  右前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期 (不安定)

$2\beta-1 \quad t < 0.5$  右前脚、右後脚の2脚支持期

$0.5 \quad t < \beta$  右前脚、左前脚、右後脚の3脚支持期 (不安定)

$\beta \quad t < 2\beta-0.5$  左前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期 (不安定)

$2\beta-0.5 \quad t < 1$  左前脚、左後脚の2脚支持期

(10)  $1 < \phi < 1.5$  の時

2脚支持期、3脚支持期が存在し、8つの支持状態

$0 \quad t < \beta-0.5$  右前脚、左前脚、左後脚の3脚支持期 (不安定)

$\beta-0.5 \quad t < \phi-0.5$  右前脚、左後脚の2脚支持期

$\phi-0.5 \quad t < \beta+\phi-1$  右前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期 (不安定)

$\beta+\phi-1 \quad t < 0.5$  右前脚、右後脚の2脚支持期

$0.5 \quad t < \beta$  右前脚、左前脚、右後脚の3脚支持期 (不安定)

$\beta$	$t < \phi$	左前脚、右後脚の2脚支持期
$\phi$	$t < \beta + \phi - 0.5$	左前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期（不安定）
$\beta + \phi - 0.5$	$t < 1$	左前脚、左後脚の2脚支持期

(11)  $\beta = 1.5 - \phi$  の時

2脚支持期、3脚支持期が存在し、6つの支持状態

0	$t < \beta - 0.5$	右前脚、左前脚、左後脚の3脚支持期（不安定）
$\beta - 0.5$	$t < 1 - \beta$	右前脚、左後脚の2脚支持期
$1 - \beta$	$t < 0.5$	右前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期（不安定）
0.5	$t < \beta$	右前脚、左前脚、右後脚の3脚支持期（不安定）
$\beta$	$t < 1.5 - \beta$	左前脚、右後脚の2脚支持期
$1.5 - \beta$	$t < 1$	左前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期（不安定）

(12)  $1.5 - \phi < \beta < 0.5$  の時

2脚支持期、3脚支持期、4脚支持期が存在し、8つの支持状態

0	$t < \beta + \phi - 1.5$	4脚支持期
$\beta + \phi - 1.5$	$t < \beta - 0.5$	右前脚、左前脚、左後脚の3脚支持期（不安定）
$\beta - 0.5$	$t < \phi - 0.5$	右前脚、左後脚の2脚支持期
$\phi - 0.5$	$t < 0.5$	右前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期（不安定）
0.5	$t < \beta + \phi - 1$	4脚支持期
$\beta + \phi - 1$	$t < \beta$	右前脚、左前脚、右後脚の3脚支持期（不安定）
$\beta$	$t < \phi$	左前脚、右後脚の2脚支持期
$\phi$	$t < 1$	左前脚、右後脚、左後脚の3脚支持期（不安定）

位相差  $\phi$  を0から1まで変化させた時に得られる12種類の歩容の支持状態の遷移を示したが、これらの中から動的歩行に適した歩容を検討する。そこで、これらの歩容を次のような観点から評価してみる。

4脚支持期の存在

静的に安定な3脚支持期の存在

静的に不安定な3脚支持期の存在

2脚支持期のパターン

その結果をまとめて Table 3-2 に示す。ここで適用する動的歩行の歩容であるが、静的な安定性が最も長い時間確保できるような歩容を採用することにする。その観点から、まず不安定な3脚支持期間のある歩容を除外する。動的歩行であれば、2脚支持

期の存在は不可避であるが、その時でもできるだけバランスのとりにやすい状態が好ましい。解析した歩容では、対角の2脚で本体を支える2脚支持期と、同側の2脚で本体を支える2脚支持期が出現している。ここで、安定余裕の概念に準じて考えると、重心の垂直射影点と支持脚の接地点とを結ぶ直線との距離は、同側の2脚の場合よりも、対角の2脚の場合の方が小さいため、安定性を確保しやすい。そのため、同側2脚での2脚支持期のある歩容も除外する。その結果、(1)から(3)の歩容が候補として残る。さらに、安定性を考えると2脚支持期間は短い方が望ましい。デューティファクタの値が同じなら、4脚支持期がない歩容の方が2脚支持期間が短くなると考えられる。実際に2脚支持時間を求めてみると、歩行周期を1として、(1)の歩容で  $2-2\beta$ 、(3)の歩容で  $3-4\beta$ 、(2)ではその中間の値となり、(3)の歩容の2脚支持期間が最も短く、動的歩行の歩容に適していることがわかる。この歩容の脚の動きを Fig.3-7 に示す。この歩容では、1歩行周期中4回の安定な3脚支持期と2回の2脚支持期が存在する。

Table 3-2 Classification of gait ( $0.5 < \beta < 0.75$ )

type		Four-legged supporting	three-legged supporting		two-legged supporting pair
			stable	unstable	
(1)	0	E*	DNE**	DNE	diagonal
(2)	$0 \sim \beta-0.5$	E	E	DNE	diagonal
(3)	$\beta-0.5$	DNE	E	DNE	diagonal
(4)	$\beta-0.5 \sim 1-\beta$	DNE	E	DNE	diagonal lateral
(5)	$1-\beta$	DNE	E	DNE	lateral
(6)	$1-\beta \sim 0.5$	E	E	DNE	lateral
(7)	0.5	E	DNE	E	lateral
(8)	$0.5 \sim \beta$	E	DNE	E	lateral
(9)	$\beta$	DNE	DNE	E	lateral
(10)	$\beta \sim 1.5-\beta$	DNE	DNE	E	diagonal lateral
(11)	$1.5-\beta$	DNE	DNE	E	diagonal
(12)	$1.5-\beta \sim 1$	E	DNE	E	diagonal

E\* = Exists.

DNE\*\* = Does not exist

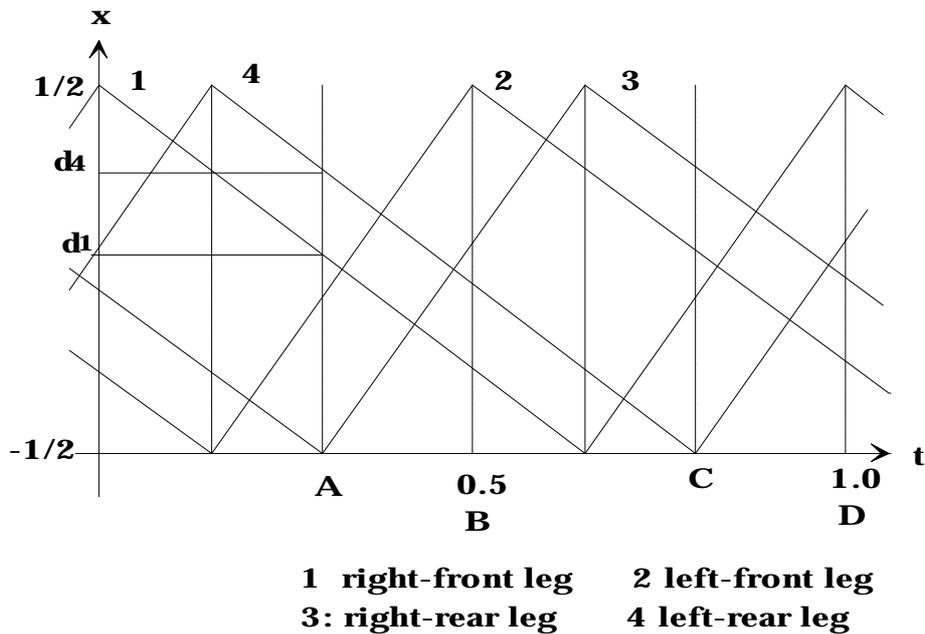


Fig. 3-7 Gait for dynamic walking ( $\beta = 0.65$ )

### 3.4.2 2脚支持期のロボットの運動

動的歩行させるために適用する歩容は選ばれたが、前述したように、2脚支持期においては、ロボットは動的に安定を保たなければならない。ここでは、2脚支持期のロボットの運動を考える。Fig.3-7 で動的歩行で適用する歩容を示したが、この図で区間 A-B と区間 C-D で2脚支持期が存在する。この時のロボットの運動を考察する。時点 A でのロボットを上から見た図と、側面から見た図を Fig.3-8 に示す。この図において、X Y Z 座標系は地上に固定された座標系であり、X 軸は移動方向を、Z 軸は鉛直上向きを示す。またこの原点は、進行方向と、2つの接地点を結ぶ直線との交点とする。この側面図で見たとき、2脚支持期のロボットを、重心を G 点に持つ倒立振り子と考える。そしてこの倒立振り子は脚の長さが変わり、脚の長さ方向に力 F を発生し、胴体は高さ h を保ったまま X 軸に沿って運動するとする。また、ロボットは Y 方向の力は受けないとする。これはロボットの移動方向が X 軸方向であるためである。この時、力 F の垂直成分は重力とつりあわなければならないので、

$$F \cos q = mg \tag{3-2}$$

である。ここで m はロボットの質量であり、g は重力加速度である。また は振り子

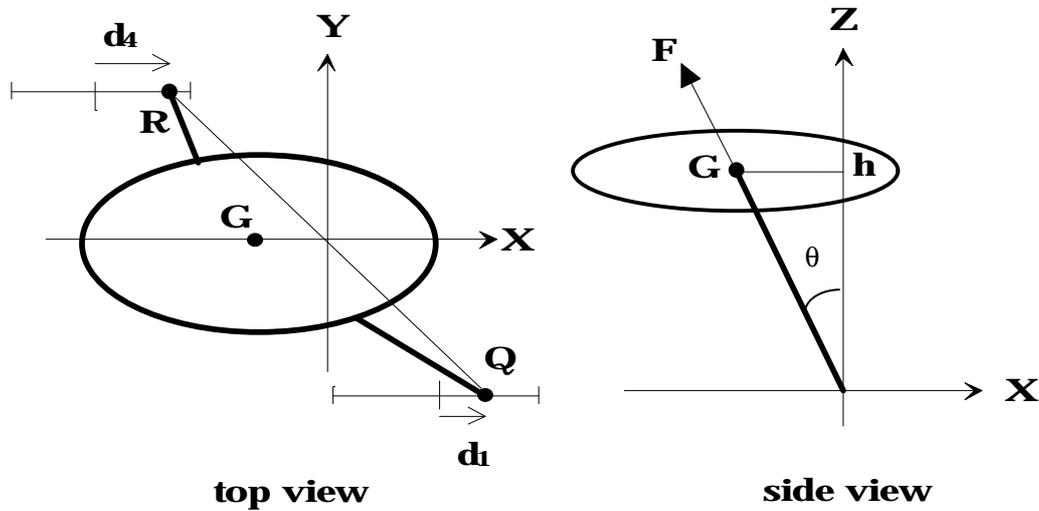


Fig. 3-8 Motion during two legged supporting period

の鉛直方向からの変位角度である。X軸方向の運動方程式は、

$$m\ddot{X} = F \sin q \quad (3-3)$$

である。(3-2)、(3-3)式より

$$\ddot{X} = g \tan q = \frac{g}{h} X \quad (3-4)$$

である。(3-4)式は、原点から水平方向Xの位置にある質量 m に  $(mg/h)X$  の力が働く斥力場が存在する、と解釈することができる[24]。このような斥力場における質点のポテンシャルエネルギーと運動エネルギーの和は保存されることが知られている。このエネルギー E は、

$$E = \frac{m}{2} \dot{X}^2 - \frac{mg}{2h} X^2 \quad (3-5)$$

と表現できる。これより、時点Aにおける運動エネルギーがポテンシャルエネルギーより大きければ、この倒立振子はポテンシャルの山を越えて、反対側に移動して、ロボッ

トは歩行を続けることができる。このための条件は、

$$\dot{X}_0 > \sqrt{\frac{g}{h}} |X_0| \quad (3-6)$$

である。ここで  $X_0$  および  $\dot{X}_0$  はそれぞれ、時点 A における位置と速度である。また  $X_0$  は、時点 A における脚の脚座標系での接地位置  $d_1$  および  $d_4$  を用いて次のように表される。

$$X_0 = -(d_1 + d_4)/2 \quad (3-7)$$

さらに  $d_1$  と  $d_4$  はデューティファクタ を用いて、それぞれ次のように表現される。

$$d_1 = \frac{2-3b}{2b} \quad (3-8)$$

$$d_4 = \frac{1-b}{2b} \quad (3-9)$$

これらの条件を用いると、(3-6)式は次のようになる。

$$\dot{X}_0 > \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} \frac{3-4b}{4b} \quad (3-10)$$

つまり、ロボットが3脚支持期において、(3-10)式を満足するような速度で移動していれば、歩行は続けられる。時点 A を  $t=0$ 、その時の初期条件を  $X = X_0$ 、 $\dot{X} = \dot{X}_0$  として X 軸に関する解を求めると、

$$X = \frac{1}{2} \{ (X_0 + \dot{X}_0/p) e^{pt} + (X_0 - \dot{X}_0/p) e^{-pt} \} \quad (3-11)$$

ただし

$$p = \sqrt{g/h} \quad (3-12)$$

である。2脚支持期間中、ロボット本体が(3-12)式で表される運動をするように、脚はこれと反対の動きをする必要がある。Fig.3-7 においては、2脚支持期間中も支持脚は3脚支持期間と同じ一定速度で運動しているように表現されているが、実際にはロボット本体が(3-12)式のように運動するように、この期間で減速、そして加速をすることになる。以上、区間 A-B について議論してきたが、歩容の対称性があるので、区間 C-D についても、まったく同様なことが言える。

### 3.5 実験

上に述べてきた静的歩行および動的歩行のための周期的歩容で、歩行ができることを確認するために、実機を用いた歩行実験を行った。

#### 3.5.1 実験装置

歩行実験を行うために、4脚歩行ロボットを開発した。そのロボットは、「かめ1号」と呼ばれ、その外観を Fig.3-9 に示す。各脚は2自由度を持っており、DCサーボモータによって駆動される。全長 500[mm]、全幅 330[mm]、全高 380[mm]であり、重量は約 16[kg]である。制御コンピュータ、電源、モータドライバ、センサインタフェース等はロボット外部に設置され、ロボットとはケーブルで結ばれている。センサ関係では、各自由度にポテンシオメータとタコメータジェネレータ、接地を確認するための足底のマイクロスイッチ、脚にかかる荷重を測定する力センサ、胴体の姿勢を検出するセンサが備わっている。

脚はもともと動物の移動手段であるため、動物の脚と同じように腰と膝に関節を持つ、いわゆるシリアルリンク形の脚を持った歩行ロボットが多く開発されてきた。確かに生物の脚は優れた機能を持っているが、生物と同じような素材やアクチュエータが利用できないという制約条件下では、ロボットにはロボットに適した機構も存在するはずである。そこでかめ1号では、Fig.3-10 に示すような ASTBALLEM 機構と名付けた疑似直線運動が得られる新機構を脚に採用した。この機構は2自由度を持っている。第1の自由度はリンク OA の O 点回りの回転であり、第2の自由度はリンク OA の長さ  $s$  である。また B 点は  $z$  軸に沿って受動的に動くスライドメカニズムである。そして C 点が脚先の運動として用いられる。この機構では、 $s$  を適当な長さにすることにより、の駆動のみで脚先の疑似直線運動が得られるという特徴がある。Fig.3-11 にかめ1号の脚先の移動軌跡を示す。かめ1号では、Fig.3-10 に示すリンク機構において、 $a=300[\text{mm}]$ 、 $k=0.25$  とし、 $s$  は  $25\sim 62.5[\text{mm}]$  の可動範囲を持つ。Fig.3-11 の各曲線は、 $s$  の値を一定にし、を  $-180^\circ$  から  $+180^\circ$  まで変化させた時の

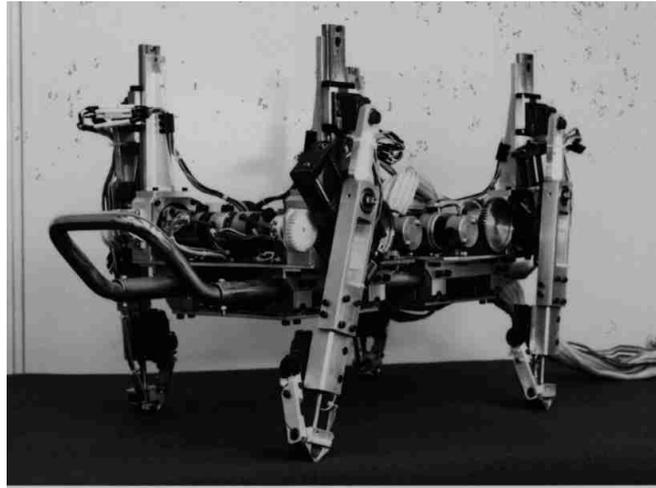


Fig. 3-9 Photograph of “TURTLE-1”

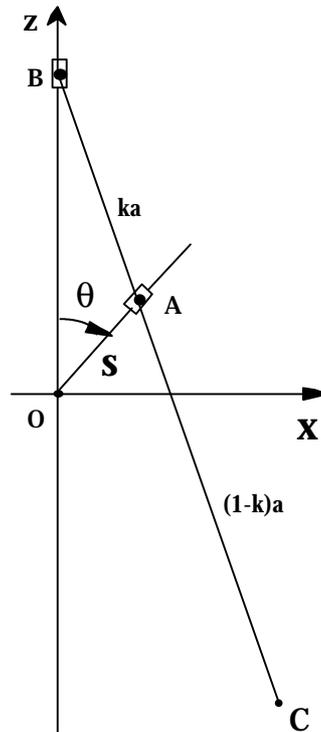


Fig. 3-10 ASTBALLEM mechanism

脚先の軌跡を示している。この図からわかるように、ある条件下において脚先軌跡は水平で直線に近くなっている。直線運動を脚移動ロボットの支持期の脚の運動に使うと、ロボット本体の上下運動を抑制することができ、さらにこれを1つの自由度で実現できれば、自重支持力分離型の脚駆動機構となり、エネルギー効率の良い歩行が可能となる。これらのことから、この直線部分を支持期の脚の運動に利用し、遊脚期に

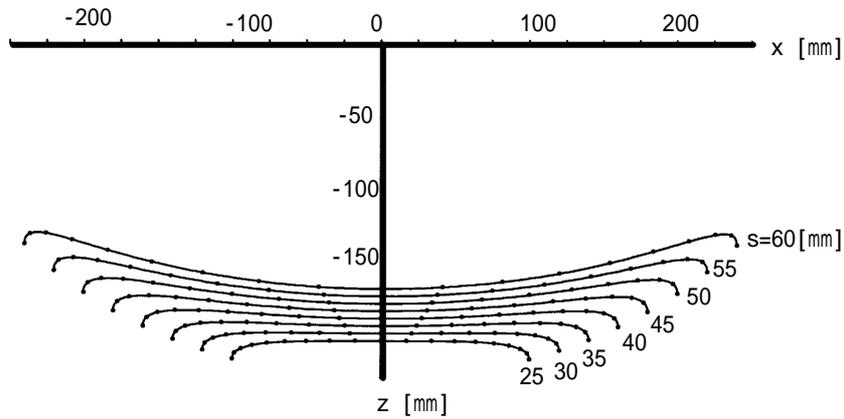


Fig. 3-11 Trajectory of foot

は  $s$  の値を大きくして脚先を引き上げ、復帰動作を行うことが有利である。この機構を用いた脚の特徴をまとめると、構造が簡単である、脚剛性が高い、疑似直線運動が1自由度で実現できる、といったことが挙げられる。

この機構の運動学と逆運動学を示す。順変換は、

$$x = \frac{s}{k} \sin \mathbf{q} \quad (3-13)$$

$$z = s \cos \mathbf{q} - \left(\frac{1}{k} - 1\right) \sqrt{k^2 a^2 - s^2 \sin^2 \mathbf{q}} \quad (3-14)$$

となり、その逆変換は

$$\mathbf{q} = \tan^{-1} \frac{p}{q} \quad (3-15)$$

$$s = \sqrt{p^2 + q^2} \quad (3-16)$$

ただし

$$p = kx \quad (3-17)$$

$$q = y + (1-k) \sqrt{a^2 - x^2} \quad (3-18)$$

である。

### 3.5.2 実験結果

3.4節で求めた周期的歩容での安定な歩行が可能であることを実証するために、かめ1号を用いて歩行実験を行った。Fig.3-12 から Fig.3-14 に示すのは、歩行実験を行った時の、脚に設置された力センサの出力である。縦軸は脚にかかっている荷重を示しており、グラフが高いレベルになっている部分は荷重がかかっている状態、つまり接地している状態を示している。なお、各脚のグラフを対比しやすくするために、グラフの縦軸方向の位置をずらしてあるため、グラフの縦軸の目盛りの絶対的な意味はない。

Fig.3-12 は、デューティファクタ  $=0.8$  の静的歩行のものである。この時のストロークは  $80[\text{mm}]$ 、歩行速度は  $25[\text{mm}/\text{sec}]$  である。これを見ると、支持パターンの変化がはっきり現れ、安定に歩行していることがわかる。この歩行では6つの支持パターンがあり、それらは、4脚支持、左後脚を除いた3脚支持、左前脚を除いた3脚支持、4脚支持、右後脚を除いた3脚支持、右前脚を除いた3脚支持、であり、これを繰り返しているのが確認できる。

Fig.3-13 は、デューティファクタ  $=0.75$  のクロール歩容で歩行している時のものである。この歩容は、歩行中に安定余裕が0になることがあり、静的歩行と動的歩行の間のクリティカルな歩容である。ストロークは  $80[\text{mm}]$ 、歩行速度は  $30[\text{mm}/\text{sec}]$  である。この場合も支持パターンの変化がはっきり現れており、安定な歩行をしていることがわかる。この歩行での支持パターンは4つで、左後脚を除いた3脚支持、左前脚を除いた3脚支持、右後脚を除いた3脚支持、右前脚を除いた3脚支持、を繰り返していることがわかる。

Fig.3-14 は、デューティファクタ  $=0.7$  の動的歩行時のものである。ストロークは  $80[\text{mm}]$  と静的歩行の時と同じであるが、歩行速度は  $50[\text{mm}/\text{sec}]$  と、より高速になっている。このグラフからは、2脚支持期が存在しているのは確認できるが、前の2例のようなはっきりした支持パターンの変化は読み取れない。本来なら、左前脚を除いた3脚支持、右前脚および左後脚による2脚支持、右後脚を除いた3脚支持、右前脚を除いた3脚支持、左前脚および右後脚による2脚支持、左後脚を除いた3脚支持、のパターンを繰り返すはずである。実験では歩行を継続することができたが、多少のバランスの崩れがあった。この原因としては、2脚支持期のロボットを単純な倒立振り子としたために、モデルがロボットとは完全には一致していないことが挙げられる。解析したモデルではロボット本体を質点であると仮定したが、実際には大きさのある剛体である。そのため、2脚支持期における姿勢の乱れが発生し、

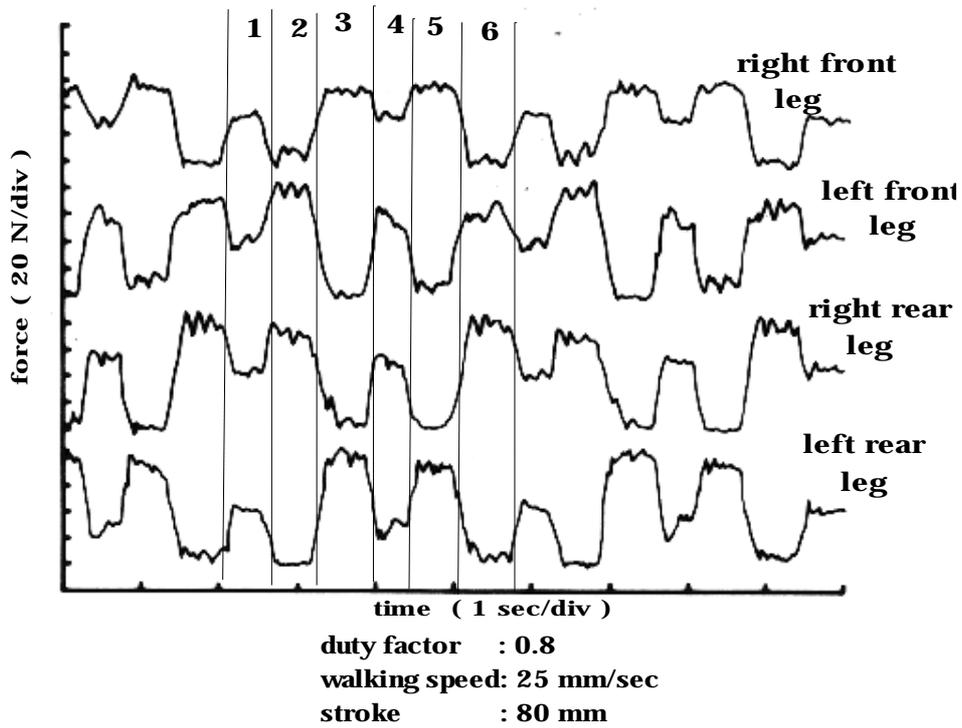


Fig. 3-12 Output of force sensor in walking Experiment

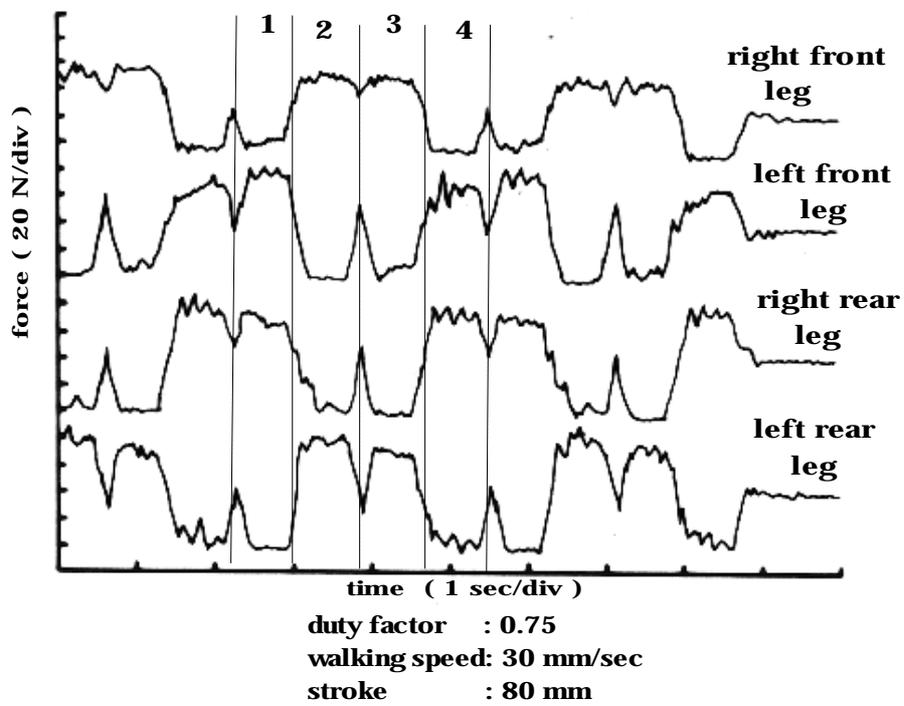


Fig. 3-13 Output of force sensor in walking experiment

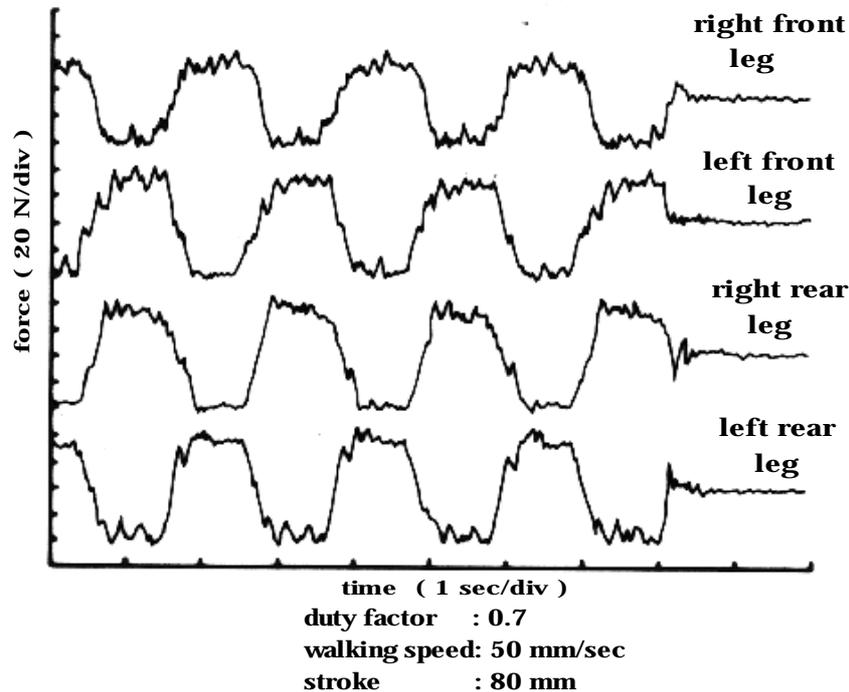


Fig.3-14 Output of force sensor in walking experiment

それによって本来遊脚である脚が接地してしまうような状況があったことが考えられる。これを防ぐためには、より厳密なモデル化や、脚先に能動関節を設けて足首トルクで姿勢を制御することなどが必要である。また、脚の上下方向の運動が遅いことによる、復帰する脚の遊脚化の遅れなども影響している。本実験では解析したモデルと完全に一致した運動は実現できていないが、2脚支持期にあるポテンシャルの山を越え、継続した歩行を実現することには成功した。これらの実験を通じて、提案した解析手法で求められた歩容が、実際のロボットを歩行させることに対して、有効であることが確認された。本解析手法は、考えられるすべての歩容を網羅するものではなく、いくつかの条件を付加して解析の簡略化を図ったが、そのことで実験に用いた4脚移動ロボットの機構設計に制約を及ぼすことはなかった。また、この解析法で得られた動的歩行のための歩容は、従来の研究での4脚動的歩容と異なったものであったが、歩行が継続できることが確認された。

### 3.6 本章のまとめ

本章では、4脚歩行ロボットのための周期的歩容の検討を行った。複雑な環境では複雑な歩容計画が必要となる脚移動ロボットではあるが、単純な環境においては、同

じ脚の運動を繰り返す周期的歩容で移動することが可能である。直進するための周期的歩容を、厳密に解析するためには 15 もの独立なパラメータが必要であるが、本研究では、実際に歩行ロボットに適用することを前提に、合理的で現実的な条件を課すことにより、単純な解析法を考案した。ここで課した条件とは、各脚で均等にロボット本体を支持すること（レギュラーな歩容、対称配置の歩容）、そして左右の両側で条件を同じにすること（両側対称な歩容）である。このことにより、15 個必要であった歩容を規定するパラメータは、デューティファクタと位相差という 2 つのパラメータに減らされた。この 2 つのパラメータを用いて、静的歩行および動的歩行のための最適な歩容を導出した。

4 脚歩行の静的歩行のための歩容は、古くから詳しく研究されており、本研究で考案した解析法で得られた最適歩容は、過去の研究の結果と比較して特に異なるものではない。しかし、動的歩行のための歩容は、従来の研究とは異なった歩容を生み出した。従来の 4 脚動的歩行の歩容は、2 脚の動的歩行の延長上にあり、2 脚を一組として扱うものが主流であった。そのため、2 脚づつ位相は等しくなり、2 脚支持と 4 脚支持を繰り返す歩容であった。それに対し本研究では、同じデューティファクタの値を持って、なるべく静的な安定性を確保できる期間を長くし、2 脚支持期を短くしようとする観点で歩容が最適化された。その結果、4 脚支持期はなく、3 脚支持と 2 脚支持を繰り返す歩容が得られた。

導出された最適歩容は、実際のロボットにより実験的に検証された。静的歩行では、理論通りの歩行パターンが検出された。動的歩行では、姿勢の乱れは見られたものの、歩行の継続に成功した。前述したように、動的歩行の歩容は短い 2 脚支持期という観点で最適化して得られた。この短い 2 脚支持期のため、単純な倒立振子モデルでロボットの運動をモデル化しても、歩行が継続できないような大きなエラーを生むことはなかった。また、エラーが生じて、静的な安定が保てる時間が長いため、その修正ができる。ここに、より現実的な動的歩行の歩容が示された。

## 第4章 適応歩容

### 4.1 緒言

本章では、移動環境に応じて歩容を変える適応歩容についての考察を行う。脚移動ロボットの特徴の一つは、他の移動機構を用いたロボットに比較して、優れた環境適応能力を持つことである。しかしながら、この環境適応能力を発揮するためには、環境やロボットの状態に応じて、歩容も臨機応変に変化していかなければならない。例として人間の歩行を考えてみよう。平坦な所を歩く時は固定した脚の運びを単純に繰り返しているに過ぎないが、険しい山道などを歩く時は、一步一步着地点を選びながら、脚の運びを変えている。このように、歩容を自由に換えられなければ、脚移動ロボットとしての機能が果たせない。歴史的にみても、初期の歩行機械が1自由度しか持たず、リンク機構で固定した脚の動きしか生成できなかったため、その後の発展が得られなかった。したがって、脚移動ロボットを実効のあるものとするためには、移動環境に対応できる適応歩容の採用が必要である。

一口に移動環境と言っても、その構成要素もたくさんあり、適応する対象もいろいろ考えられる。最初に適応対象とされたのは、地面の凹凸である。脚の鉛直方向の可動範囲内の凹凸であれば、平地歩行の時と同じ歩容を用い、遊脚の地面への接地動作の時に、接触センサや力センサを利用して地面の凹凸に対応することができる。その他に接触センサを用いた適応歩容の例としては、遊脚が前方に復帰している時に、脚と障害物との接触を検知し、これを回避することが行われた[7]。遊脚と障害物との接触を検出すると、遊脚は上方へ回避動作を行うとともに、ロボット本体の高さの調整を行った。これによって階段の登行を実現している。接地点に制限があるような環境での歩容に関する研究も多く報告されている[14][15][20]。斜面に適用する歩容については、Lee and Shih[21]や Lee and Orin[22]が検討している。4つのタイプの障害物（斜面、溝、段差、壁）に対応するための6脚歩行の歩容については、Choiらが報告している[23]。さらに、移動面の任意の凹凸に対して姿勢を制御しながら歩行する方法も広瀬らが提案している[17]。

このように多くの歩容に関する研究がなされているが、接触センサを用いたもの以外の適応歩容については、ほとんどの場合、適応する環境（歩行面）に関する情報が全て既知であるという仮定が必要である。歩行面の情報を得るために、視覚システムやレンジファインダーの利用が考えられているが、これらの手法も研究途上のものであり、実用レベルの信頼性は得られていない。そのため、これらの適応歩容の生成手

法の妥当性はコンピュータシミュレーションによって検証されている場合が多く、実際の歩行ロボットに適用されている例は少ない。本章では、歩行ロボットの各脚に設置された1軸の力センサという比較的簡単なセンサを用いて、ロボットの内部状態や環境に適応することができる静的歩行歩容の生成方法を提案し、これを実際の歩行ロボットに適用し、実験的にその妥当性を示す[28]。具体的には、4.2節でロボットの重心位置に適応する歩容生成法を、そして4.3節で歩行面の傾斜に応じて脚の動きを変える静的適応歩容をとりあげる。そして4.4節で、それぞれの適応歩容を実際のロボットに適用して、その有効性を実験的に検証した結果を示す。

#### 4.2 重心位置適応歩容

静的歩行を行うロボットの場合、歩行中の支持脚パターンとロボットの重心位置との関係が非常に重要となる。通常、歩容を設計する場合、ロボットの重心はその幾何学的中心にあると仮定するか、または、ある一定の位置に存在すると仮定される。しかしながら、実際に想定される歩行ロボットのアプリケーションにおいては、積荷の分布や搭載されたマニピュレータの姿勢により重心位置が変動することが考えられる。このような場合、重心位置が一定として設計した歩容では、ロボットの支持脚の切り替え時に、バランスを失い転倒する危険がある。ここでは、脚の力センサを用い、重心位置に応じて支持脚の切り替えタイミングを自律的に変える歩容生成手法を考える。条件としては、ロボットは平坦な水平面上を直進歩行するものとし、ロボットの重量や重心位置は未知とする。またロボットの脚は、幾何学的中心に対して前後、左右対称に配置されるものとする。基本的な概念は、Fig.4-1に示す通りである。通常の場合、各脚の往復運動は胴体中心に対して対称的な位置で行われる。この状態から、重心が前よりに偏っていれば各脚の運動も前側に、重心が後方であれば脚の運動も後

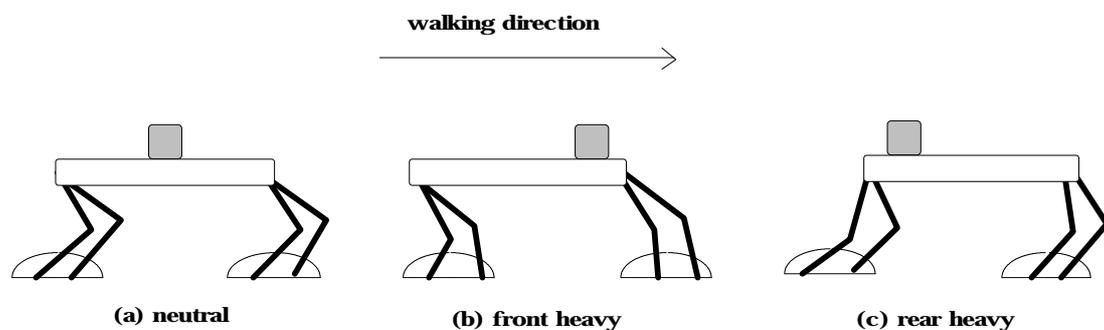


Fig. 4-1 Adaptation to the position of the center of the gravity

る側に、脚に設置された力センサ情報を用いて自動的にシフトさせて、安定性を確保しようというものである。

始めに、以後使う 2 種類の直交座標系について説明する。一つは胴体座標系であり、その原点はロボットの幾何学的中心である。もう一種類は 4 つの脚ごとに設定される脚座標系であり、その原点は各脚の取り付け位置である。両方の座標系ともその x 軸は進行方向を示し、z 軸は歩行面に垂直で上向きを示す。以後、混乱を避けるために、胴体座標系での位置を示す場合は大文字で、脚座標系での場合は小文字で示すことにする。

ここでは周期的歩容である間欠クローラ歩容をベースとして適応歩容を考えることにする。間欠クローラ歩容とは、Fig.4-2 に示すような歩容であり、前章で取り上げたクローラ歩容とは異なり、重心移動が連続的ではない。このほか間欠クローラの特徴を挙げると、以下の通りである。

- (1) 各脚のストロークは等しい
- (2) 同側の 2 脚について、後脚の復帰動作の直後に前脚の復帰動作を行う
- (3) 胴体推進動作は、右側の 2 脚の復帰動作と左側の 2 脚の復帰動作の間の 4 脚支持期のみ行う
- (4) 4 脚支持状態の時、同側の 2 脚の位置は、それぞれの脚座標において等しい
- (5) 4 脚支持状態の時、左右の脚の位置は、それぞれの脚座標において半ストロークだけずれている

そして、間欠クローラ歩容の最大の特徴は、周期的歩容の中で、最も大きな安定余裕を確保できることである。クローラ歩容の安定余裕は 0 であるのに対し、間欠クロー

Title:  
fig6.eps  
Creator:  
CLARIS EPSF Export Filter V1.0  
Preview:  
この EPS 形式のファイルは、  
プレビュー付きで保存されていません。  
Comment:  
この EPS 形式の図は  
PostScript プリンタでのみ  
印刷できます。

Fig. 4-2 Intermittent crawl gait

ル歩容ではストロークを  $r$  とした時  $r/4$  の安定余裕を持つ。前章で周期的歩容の解析を行ったが、間欠クロール歩容はウェーブ歩容においてデューティファクタを 1 にした極限の歩容と考えることができる。その時には、脚の復帰する際の速度は無限大になる必要があるが、現実には無理なので重心移動を中断して脚の復帰動作を行うのが間欠クロール歩容である。重心変動のような不安定要素を持つ歩行において、安定余裕が大きな歩容をベースに考えることは、合理的なことである。

次に、間欠クロール歩容にどのように適応動作を加えていくかが問題になる。前述したように、ここでは脚の往復運動の位置を変えることによって、重心位置変動に対応することを考えている。脚の運動の位置を変えることは、脚の復帰動作の直前の 4 脚支持での重心推進動作の長さを調整すれば可能である。脚の復帰のタイミングを変えて、脚の復帰する距離は一定にしておけば、脚の往復運動の位置は変化する。以上の議論をまとめると、歩行のためのシーケンスは次のようになる。

4 脚支持による胴体推進動作（可変長）

左後脚の復帰動作（固定長）

左前脚の復帰動作（固定長）

4 脚支持による胴体推進動作（可変長）

右後脚の復帰動作（固定長）

右前脚の復帰動作（固定長）

この歩行シーケンスでロボットがバランスを崩して歩行続行が不可能となるのは、復帰を始めるために支持脚を空中に引き上げる時である。そのため、バランスを崩すのを防ぐためには、支持脚が復帰を始める前に支持脚と重心との位置関係を調べればよい。一般に、後脚がバランスを崩すことなく復帰できるための条件は、重心の歩行面への射影が、他の後脚とその対角脚とを結ぶ直線より前にあることである。前脚復帰の場合は、重心の射影が、他の前脚とその対角脚とを結ぶ直線の後方にあることである。次に、この条件を前述した歩行シーケンスに即して考えてみる。ここで、問題を簡単にするために、重心位置の幾何学的中心からのずれを進行方向のみに限定する。つまり、重心は胴体座標系の X 軸上にあると仮定する。Fig.4-3 に、ロボットの 4 脚支持期の状態を上から見た図を示す。ここで、O 点はロボットの幾何学的中心であり、G 点は重心位置を示す。X 軸正方向は進行方向である。重心位置の X 座標（胴体座標系）を  $X_g$  とする。また、各支持脚位置の x 座標（各脚座標系）を Fig.4-3 に示すように  $x_1, x_2, x_3, x_4$  とする。先に示した間欠クロールの 4 番目の仮定（同側の 2 脚の位置は、各脚座標系で表した時等しい）により、 $x_1 = x_3, x_2 = x_4$  という関係がある。

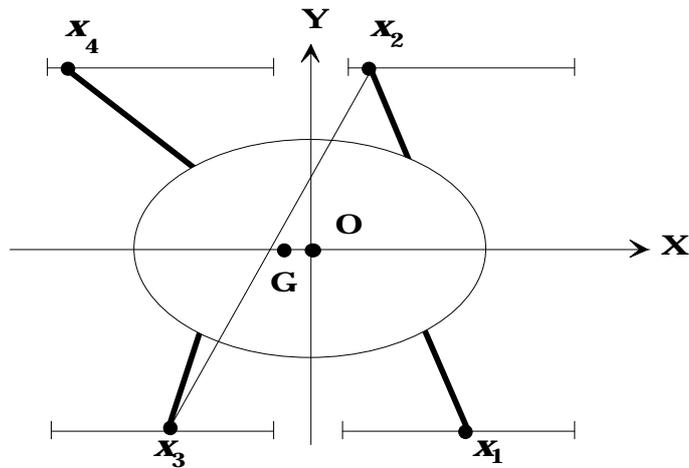


Fig. 4-3 Condition for keeping stability

左後脚が復帰を行う時の静的安定を保つ条件は、重心 G が左前脚と右後脚を結ぶ直線より前にあることである。この条件を式で表わすと、

$$(x_2 + x_3)/2 < X_g \quad (4-1)$$

である。この条件を満たして左後脚が復帰した後、左前脚が復帰するが、この時重心は左後脚と右前脚とを結ぶ直線より前になければならない。この条件は、

$$(x_1 + x_4 + r)/2 > X_g \quad (4-2)$$

である。ここで r は脚復帰距離である。(4-1)式と(4-2)式より次式を得る。

$$d/2 > X_g - (x_2 + x_3)/2 > 0 \quad (4-3)$$

つまり、4脚支持期において(4-3)式が満足されれば、左側の2脚は静的安定を保ちながら復帰することができる。この安定復帰のための条件は不等式で表されるため、(4-3)式の不等号ではさまれた部分  $\{X_g - (x_2 + x_3)/2\}$  の値は  $r/2$  だけの許容範囲がある。この部分の値が0の時は左後脚が復帰するときの安定マージンが0で左前脚の復帰時の安定マージンは  $r/2$  となる。また逆にこの部分の値が  $r/2$  の時は左後脚の復帰時の安定マージンが0となり、左前脚の復帰時は  $r/2$  となる。このことから、この部分の値が  $r/4$  の時、つまり

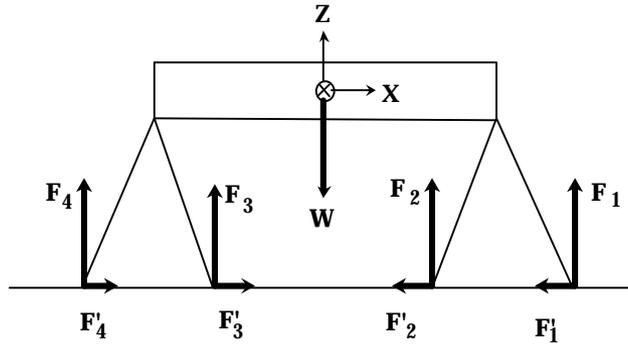


Fig. 4-4 Force balance

$$X_g - (x_2 + x_3)/2 = r/4 \quad (4-4)$$

の時、前脚の復帰時および後脚の復帰時は、ともに  $r/4$  の安定マージンを持ち、最も好ましい状態となる。以上は左側2脚の復帰するための条件であるが、右側2脚の復帰時の条件も全く同様に求められ、その結果は(4-4)式と同じになる。以上、歩行シーケンスをまとめると以下のようなになる。

(4-4)式が満足されるまで4脚支持による胴体推進動作を続ける

左後脚を距離  $r$  だけ復帰する

左前脚を距離  $r$  だけ復帰する

(4-4)式が満足されるまで4脚支持による胴体推進動作を続ける

右後脚を距離  $r$  だけ復帰する

右前脚を距離  $r$  だけ復帰する

にもどる

この歩行シーケンスを実行するためには重心位置が既知でなければならない。そこで脚に設置された力センサのデータから重心位置を求める方法を検討する。いま、Fig.4-4 に示すように、4脚支持状態にあるロボットを考える。 $i$  番目の脚にかかる力としては、重力による力  $F_i$  と脚間に働く内力  $F'_i$  が考えられる。ここでは  $F'_i$  は  $F_i$  に比較して小さいと考え無視することにする。この時、脚  $i$  の脚先の X 座標と Y 座標(胴体座標系)を  $X_i, Y_i$  とすれば、重心の位置  $X_g, Y_g$  (胴体座標系)は次のように求めることができる。

$$X_g = \frac{\sum_{i=1}^4 (X_i F_i)}{\sum_{i=1}^4 F_i} \quad (4-5)$$

$$Y_g = \frac{\sum_{i=1}^4 (Y_i F_i)}{\sum_{i=1}^4 F_i} \quad (4-6)$$

実際の実験で用いた歩行ロボットでは、脚に取り付けられた力センサは脚の長さ方向の力しか検出できないが、ロボットが水平面上を歩行するという仮定から、脚と重力方向とのなす角を求めて、これを用いて重力方向の力を計算することができる。

### 4.3 傾斜面適応歩容

#### 4.3.1 傾斜面への対応

次に、傾斜面を歩行する場合の歩容を考える。Fig.4-5 に単純化した斜面上の歩行ロボットを示す。いまこの歩行ロボットが斜面を登ることを想定する。もしロボットが胴体を水平に保ったまま傾斜面を歩行すれば、水平面を歩行するときと同等の安定余裕を確保することができるが、脚の鉛直方向の大きな可動範囲が要求される。これを避けるためには、Fig.4-5 に示すように胴体を歩行面と平行になるように傾けて歩行する必要がある。この時、水平面上を歩行するための歩容をそのまま用いると、低い位置にある脚に過大な荷重がかかるとともに、下側の安定余裕が減少し、最悪の場合にはバランスを崩し歩行の続行が不可能となる。ここでは、このような事態を避け

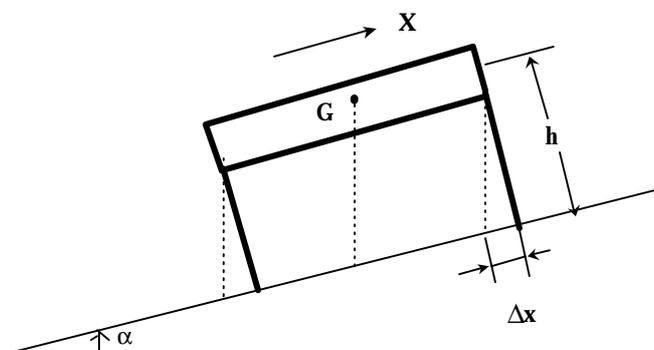


Fig.4-5 Robot standing on a slope

るために、脚に設置された力センサを用いて歩行面の傾斜に対応できる歩容の生成法を考える。条件としては、ロボットは未知の傾斜をもつ平面上をその最大斜度の方向に歩行するものとし、ロボットの重量は既知で重心は胴体の幾何学的中心にあるとする。またロボットの脚は、幾何学的中心に対して前後および左右に対称に配置されるものとする。

Fig.4-5 に示したように、ロボットが斜面を歩行することにより、その安定余裕は水平面上と比較して上側（前方）では増加し、下側（後方）では減少する。これを避けるためには、脚の往復運動の位置を下側（後方）にシフトさせてやればよい。シフトさせる量  $\Delta x$  は、胴体（重心）の高さ（重心から斜面に下ろした垂線の足の長さ）を  $h$ 、斜面の傾斜を  $\alpha$  とすると

$$\Delta x = -h \tan \alpha \quad (4-7)$$

と表すことができる。ここで右辺に負号が付いているのは傾斜角  $\alpha$  の正方向に対して後方（-x 方向）へのシフト量を表すためである。このような方策を実行するためには斜面の傾斜が既知であることが必要である。傾斜を知るためには傾斜計等を用いることが考えられるが、ここでは脚に設置された力センサにより斜面に対応することを考える。

#### 4.3.2 4脚支持時の脚荷重

ここで考える歩容は、前節の重心位置適応歩容と同様なものとする。つまり、間欠クロール歩容をベースとし、4脚支持期の長さを調整することによって脚の往復運動の位置をシフトさせる。したがって、歩行のための動作シーケンスも以下のように同等とする。

4脚支持による胴体推進動作（可変長）

左後脚の復帰動作（固定長）

左前脚の復帰動作（固定長）

4脚支持による胴体推進動作（可変長）

右後脚の復帰動作（固定長）

右前脚の復帰動作（固定長）

まず Fig.4-6 に示すように、斜面を登っているロボットの4脚支持期の脚にかかる力について考えてみる。ここでも脚間に働く内力は無視することにする。ここではX

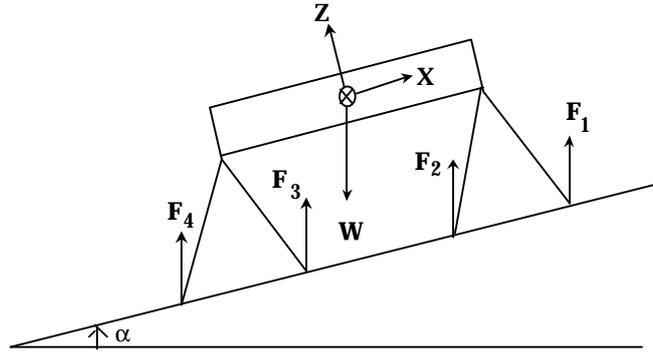


Fig. 4-6 Force balance on a slope

軸方向（胴体座標系）を進行方向とし、ロボットを側面からみた平面上で考える。また、脚の番号を、1：右前脚、2：左前脚、3：右後脚、4：左後脚と定義する。この時、重力との釣り合い、およびロボットの重心回りのモーメントの釣り合いより、次の2つの式が成り立つ。

$$\sum_{i=1}^4 \mathbf{F}_i + \mathbf{W} = \mathbf{0} \quad (4-8)$$

$$\sum_{i=1}^4 (\mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i) = \mathbf{0} \quad (4-9)$$

ここで、 $\mathbf{F}_i$ は脚*i*にかかる力のベクトル、 $\mathbf{W}$ は重心にかかる重力を表すベクトル、 $\mathbf{r}_i$ は重心から脚*i*の接地点に向かうベクトル、そして $\mathbf{0}$ はゼロベクトルである。これらのベクトルを胴体座標系で具体的に示すと、

$$\mathbf{F}_i = [F_i \sin \alpha, 0, F_i \cos \alpha] \quad (4-10)$$

$$\mathbf{W} = [-Wg \sin \alpha, 0, -Wg \cos \alpha] \quad (4-11)$$

$$\mathbf{r}_1 = [a/2 + x_1, -b/2, -h] \quad (4-12)$$

$$\mathbf{r}_2 = [a/2 + x_2, b/2, -h] \quad (4-13)$$

$$\mathbf{r}_3 = [-a/2 + x_3, -b/2, -h] \quad (4-14)$$

$$\mathbf{r}_4 = [-a/2 + x_4, b/2, -h] \quad (4-15)$$

である。ここで、 $W$ はロボットの質量、 $g$ は重力加速度、 $x_i$ は脚*i*の各脚座標系での脚先位置、 $h$ は重心の水平面上での高さ、 $a$ は前後脚間隔、そして $b$ は左右脚間隔で

ある。(4-8),(4-9)式を  $F_i$  について解けば各脚にかかる力が求められるわけであるが、一般にはこれらの方程式はユニークな解を持たない。そこで、ここでは前2脚にかかる力の合計と、後ろ2脚にかかる力の合計という形で解を求める。間欠クローリング歩容をベースにしていることから、 $x_1 = x_3$  ,  $x_2 = x_4$  , そして  $x_2 = x_1 - r/2$  ,  $x_4 = x_3 - r/2$  (  $r$  は脚復帰距離 ) という関係が得られ、これらを利用すると、

$$F_1 + F_2 = \frac{Wg}{4a}(2a + r - 4x_1 - 4h \tan \alpha) \quad (4-16)$$

$$F_3 + F_4 = \frac{Wg}{4a}(2a - r + 4x_1 + 4h \tan \alpha) \quad (4-17)$$

である。傾斜面上で安定余裕を確保するために脚の往復運動を(4-7)式で表される量だけシフトした場合、右前脚復帰後の4脚支持期の始まりの時の  $x_1$  の値は  $r/2 \cdot h \cdot \tan \alpha$  であり、終わりの時の値は  $-h \cdot \tan \alpha$  である。この4脚支持期間中、前2脚が受ける力の和は  $(2a-r)Wg/(4a)$  から  $(2a+r)Wg/(4a)$  に増加し、後2脚の力の和は反対に  $(2a+r)Wg/(4a)$  から  $(2a-r)Wg/(4a)$  に減少する。つまり、前2脚と後2脚が受ける力は4脚支持期間中に  $rWg/(2a)$  だけ変動することになる。今、右前脚復帰後の4脚支持について述べたが、左前脚復帰後の4脚支持期についても全く同じことがいえる。このことを利用して、未知の傾斜の斜面上での脚復帰のタイミングを決定できる。つまり4脚支持状態で胴体推進動作を行い、前2脚にかかる荷重が  $(2a+r)Wg/(4a)$  に、後2脚にかかる荷重が  $(2a-r)Wg/(4a)$  になった時点で後脚の復帰を開始する。この脚切り替え点は、水平面上での歩行時のものより後方に移動しており、水平面上での歩行時に近い安定余裕を確保している。斜面を下る場合も全く同様な手法で脚切り替え点を移動することができ、安定性が確保される。以上まとめると、斜面上に適応可能な歩行シーケンスは次のようになる。

前2脚の荷重が後2脚の荷重より  $rWg/(2a)$  だけ大きくなるまで4脚支持による胴体推進動作を続ける

左後脚を距離  $r$  だけ復帰する

左前脚を距離  $r$  だけ復帰する

前2脚の荷重が後2脚の荷重より  $rWg/(2a)$  だけ大きくなるまで4脚支持による胴体推進動作を続ける

右後脚を距離  $r$  だけ復帰する

右前脚を距離  $r$  だけ復帰する

にもどる

この歩容生成法の特徴の一つは、直接斜面の傾斜を計測せずに、未知の傾斜の斜面に対応できることである。

#### 4.3.3 脚荷重の測定法

今までの議論では、重力方向の脚荷重を測定できることを前提にしてきた。脚の場合、脚先位置によりその姿勢が変わったり、接地面の形状によって脚先（フット）の向きが変わったりする。そのため重力方向の荷重を測定しようとする場合には、一般に多軸の力センサを用いるか、ロボットの本体に姿勢センサを設けて、これをもとに脚の絶対的な角度を求めることが必要である。しかし、ここで求めてきた歩容の場合には、1軸の力センサのみで適応歩容生成のアルゴリズムを実行可能である。ロボットが4脚支持状態で、 $i$ 番目の脚にかかる重力方向の力を  $F_i$ 、脚  $i$  で検出できる  $F_i$  の分力を  $f_i$ 、そして  $F_i$  と  $f_i$  のなす角を  $y_i$  とすると、

$$f_i = F_i \cos y_i \quad (4-18)$$

である。各脚の機構が同一なロボットに対して、いま考えている歩容を適用した場合には、4脚支持状態にある時の同側の2脚の位置は各々の脚座標系において等しいので、 $y_1 = y_3$ 、 $y_2 = y_4$  となる。またロボットの全体重量を右2脚と左2脚とで均等に負担するので

$$F_1 + F_3 = F_2 + F_4 \quad (4-19)$$

である。これらから  $F_i$  は次のように求めることができる。

$$F_1 = \frac{Wg}{2} \frac{f_1}{f_1 + f_3} \quad (4-20)$$

$$F_2 = \frac{Wg}{2} \frac{f_2}{f_2 + f_4} \quad (4-21)$$

$$F_3 = \frac{Wg}{2} \frac{f_3}{f_1 + f_3} \quad (4-22)$$

$$F_4 = \frac{Wg}{2} \frac{f_4}{f_2 + f_4} \quad (4-23)$$

#### 4.4 実験

上に述べた重心位置および傾斜面に適応する歩容のためのアルゴリズムの有効性を確認するために、実際のロボットを用いた実験を行った。

##### 4.4.1 実験装置

適応歩容のための実験装置として、新たに4脚移動ロボットを開発した。このロボットは、「かめ2号」と呼ばれ、その写真を Fig.4-7 に示す。このロボットは、前章の実験で用いたロボット「かめ1号」の改良機であり、全長 568[mm]、全幅 410[mm]、全高 601[mm]で、重量は約 20[kg]である。脚機構は、かめ1号の ASTBALLEM 機構を3自由度化した拡張 ASTBALLEM 機構を採用している。これを Fig.4-8 に示す。3自由度のうち2自由度はサジタルプレーン内にあり、1つはリンク OA の O 点回りの回転であり、もう1つはリンク OA の長さ  $s$  である。ここで B 点は  $z$  軸に沿って受動的に動くスライドメカニズムである。3番目はフロントルプレーン内でのリンク機構全体の D 点回りの回転の自由度である。そして C 点が脚先の運動として用いられる。この機構では  $s$  を適当な長さにすると、の駆動のみで脚先の疑似直線運動が得られるという特徴がある。この機構の運動学と逆運動学を以下に示す。

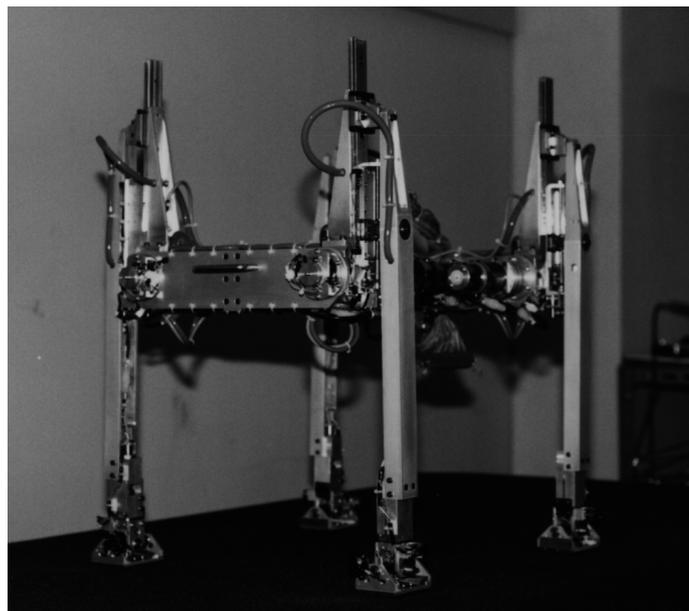


Fig. 4-7 Photograph of “TURTLE-2”

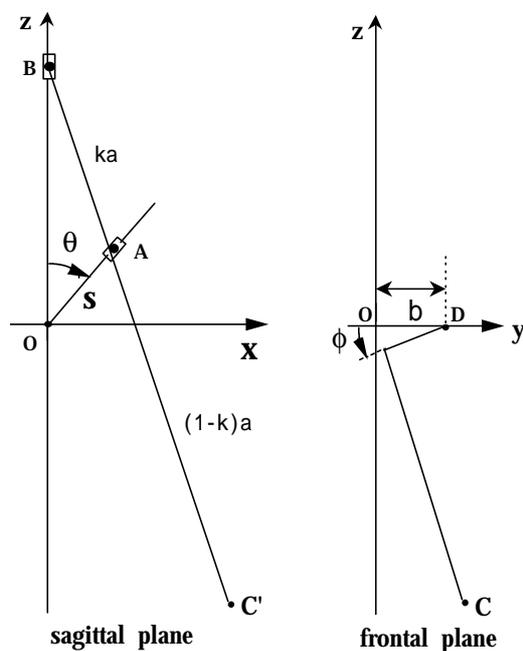


Fig. 4-8 Extended ASTBALLEM mechanism

・運動学

$$x = \frac{s}{k} \sin \mathbf{q} \quad (4-24)$$

$$y = b(1 - \cos \mathbf{f}) - z_0 \sin \mathbf{f} \quad (4-25)$$

$$z = -b \sin \mathbf{f} + z_0 \cos \mathbf{f} \quad (4-26)$$

ただし、

$$z_0 = s \cos \mathbf{q} - \frac{1}{k-1} \sqrt{k^2 s^2 - s^2 \sin^2 \mathbf{q}} \quad (4-27)$$

・逆運動学

$$\mathbf{q} = \tan^{-1} \frac{p}{q} \quad (4-28)$$

$$s = \sqrt{p^2 + q^2} \quad (4-29)$$

$$\mathbf{f} = \tan^{-1} \frac{-b}{z_0} + \tan^{-1} \frac{b-y}{z} \quad (4-30)$$

ただし

$$z_0 = -\sqrt{y^2 + z^2 - 2by} \quad (4-31)$$

$$p = kx \quad (4-32)$$

$$q = z_0 + (1-k)\sqrt{a^2 - x^2} \quad (4-33)$$

このロボットの全ての能動自由度はDCサーボモータにより駆動するものとした。電源や駆動回路、そして制御コンピュータなどはロボット外部にあり、ケーブルにより接続している。また、このロボットの各脚には力センサを設置している。脚先部(フット)は脚部(レッグ)とは分離されており、それらの間は剛性の大きなバネによって接続しており、脚先部の微小な位置変位を計測することにより脚にかかる荷重を求めることができる。この力センサは脚の長さ方向(Fig.4-8においてBC'方向)の力しか計測できないが、前述したように重力方向の力を求めることができる。

#### 4.4.2 重心位置適応歩容

第2節で示した重心位置適応歩容の有効性を、実際の歩行ロボットで確認するための歩行実験を行った。実験内容は、重心位置を変化させるために、歩行ロボットが通常の状態、2.5[kg]の重りをロボット前部に吊り下げた状態、そして同じ重りをロボット後部に吊り下げた状態で、重心位置適応歩容を適用した歩行を行わせ、脚の動きがどのように変化するかを調べた。歩行条件としては、脚復帰距離 150[mm]、そして4脚支持期の脚送り速度は 50[mm/sec]とした。その時の実験結果を Fig.4-9 から Fig.4-15 のグラフに示す。Fig.4-9 のグラフは、ロボットが重りを持たない時の各脚の力センサの出力を、一例として示したものである。支持脚の切換え時や重心移動の開始、終了時に出力波形が乱れているが、これは脚の着地時の衝撃や、運動の開始・停止に伴う加速度の影響と考えられる。

Fig.4-10 から Fig.4-12 のグラフは、歩行中、力センサのデータから計算された重心位置を示したものである。これらのグラフでは、本来一定の場所にあると考えられる重心の位置が変動している。この原因としては、解析の時に無視した脚間に働く内力の影響や、遊脚の位置により実際に重心の位置が変化していることなどが考えられる。また、全般的に進行方向であるx軸方向の変動が大きく、y軸方向の変動が小さいことから、歩行動作に伴う加減速の影響や、制御誤差による内力の影響が支配的であると考えられる。しかしながら、計算された重心位置に変動はあるものの、各実験

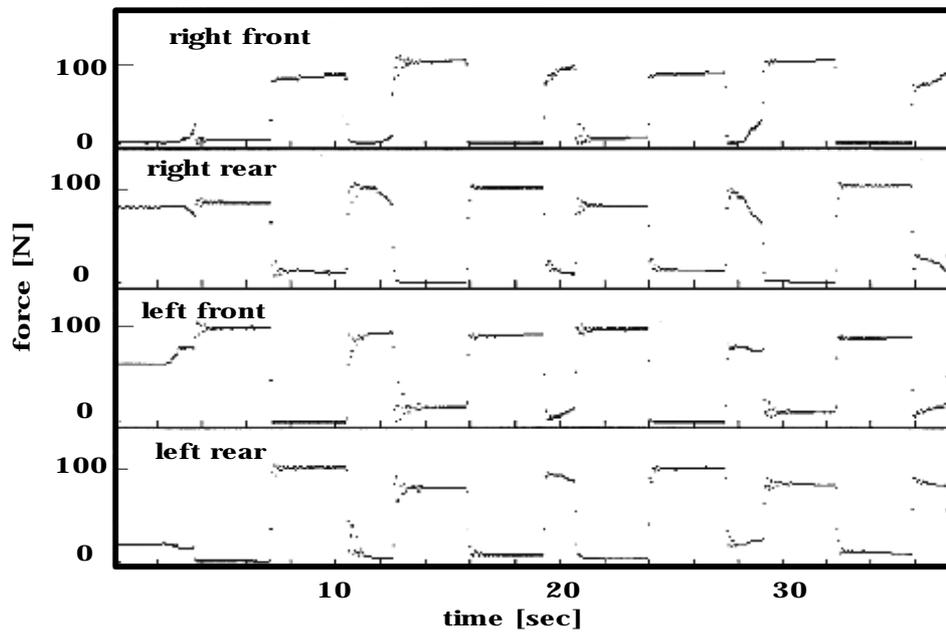


Fig.4-9 Output of foot force sensor (no load)

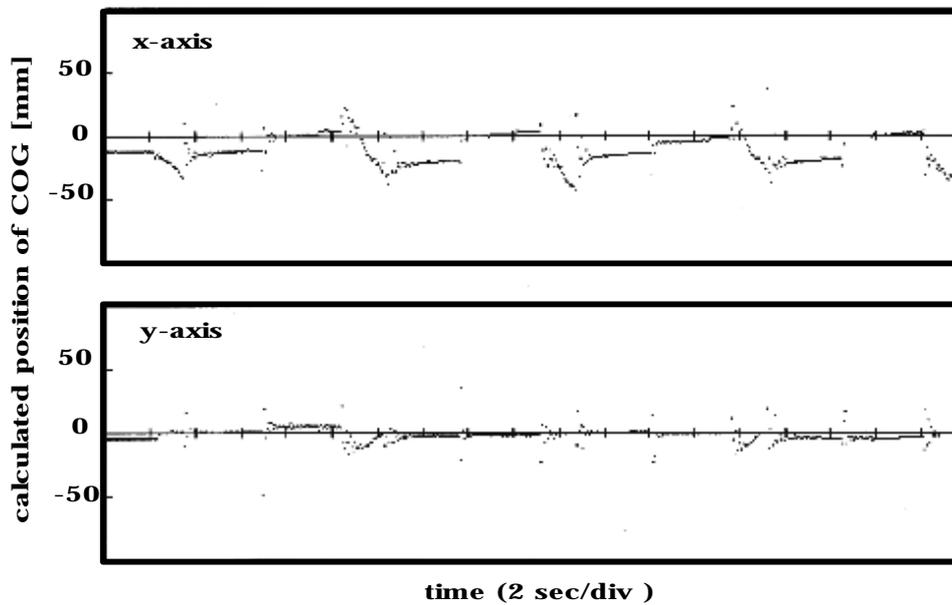


Fig.4-10 Time history of calculated position of COG (no load)

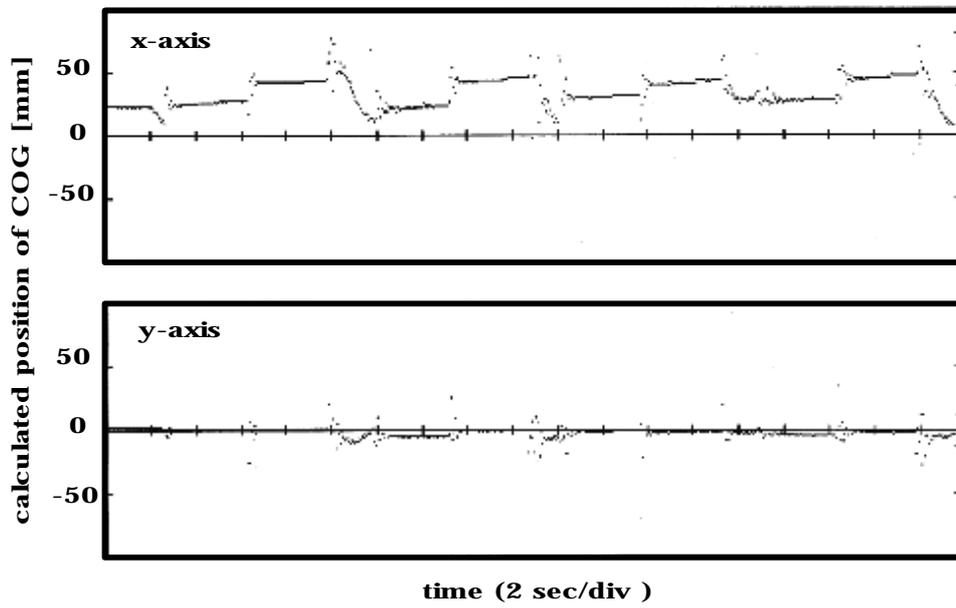


Fig.4-11 Time history of calculated position of COG (front load)

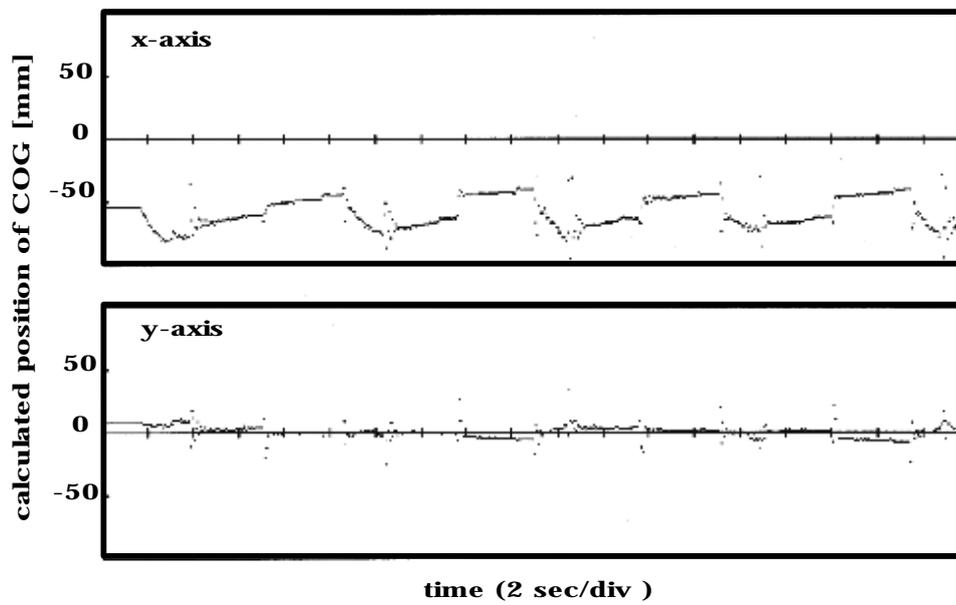


Fig.4-12 Time history of calculated position of COG (rear load)

ごとでその絶対的なレベルでの差は明らかに現れており、重心位置の検出には有効であることがわかる。実際の脚復帰のタイミングの決定にあたっては、計算された重心位置データをソフトウェアでフィルタリングして利用した。

Fig.4-13 から Fig.4-15 のグラフは、各脚の脚先位置の変化を各脚の座標系によって表したものである。これらのグラフでは、脚の復帰を始める位置が多少バラついているが、これは計算された重心位置が変動していることが主な原因と考えられる。Fig.4-13 のグラフの場合、ロボットの重心がその幾何学的中心の近くに存在するため、各脚は、その脚座標の原点を中心に往復運動をしていることがわかる。Fig.4-14 および Fig.4-15 の場合には、それぞれ重心位置が前方または後方に移動しているため、各脚の往復運動の中心も対応して前方および後方にシフトしていることがわかる。ちなみに、ロボットが重りを吊り下げられた状態で、通常の間欠クロール歩容（適応歩容と歩行シーケンスは共通だが、支持脚の切換えタイミングは固定）を適用した場合は、ロボットがバランスを失い、歩行の続行が不可能であった。このような結果から、提案する重心位置適応歩容は、重心位置の変動に対して有効であることが確認された。

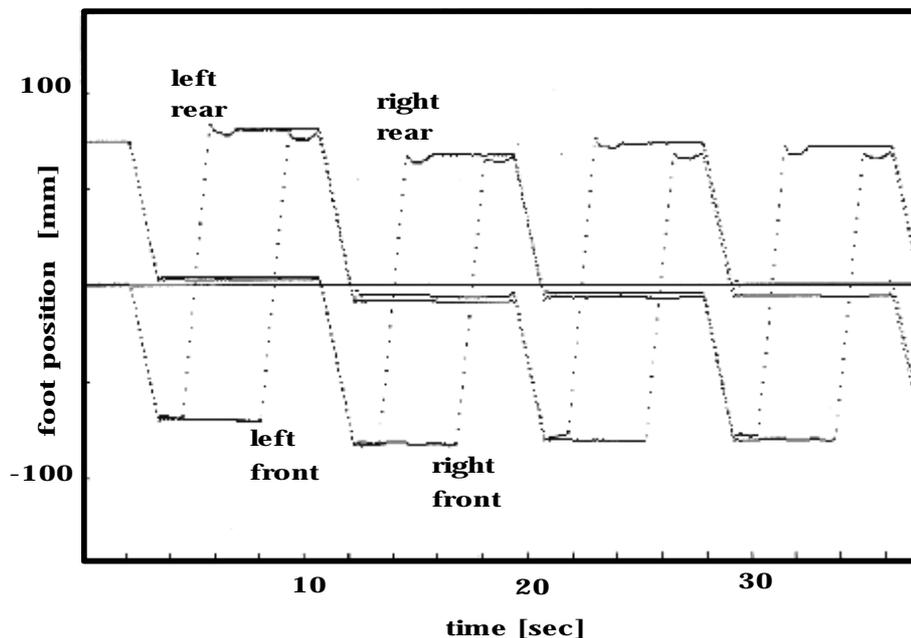


Fig. 4-13 Feet position-time trajectory (no load)

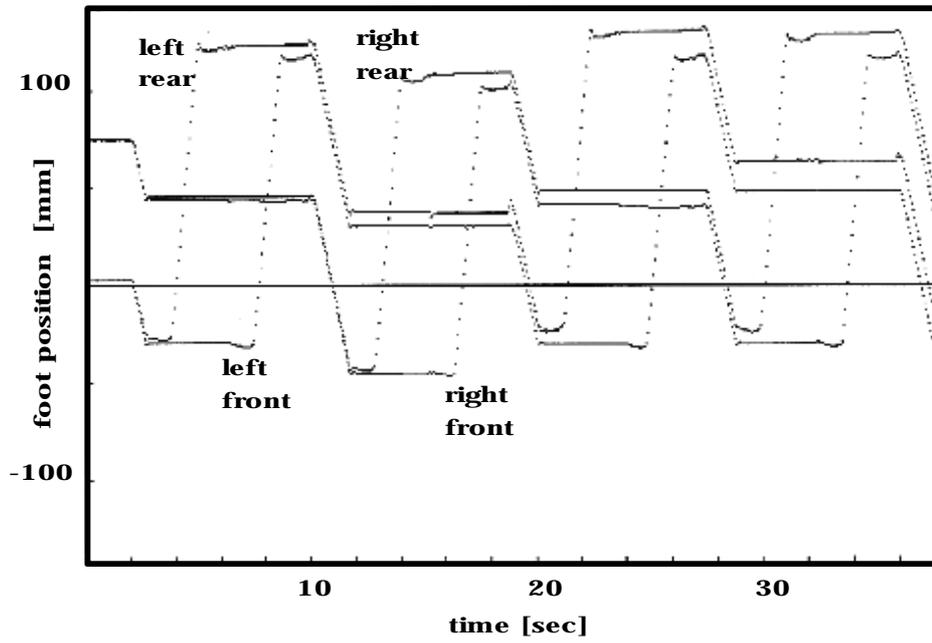


Fig. 4-14 Feet position-time trajectory (front load)

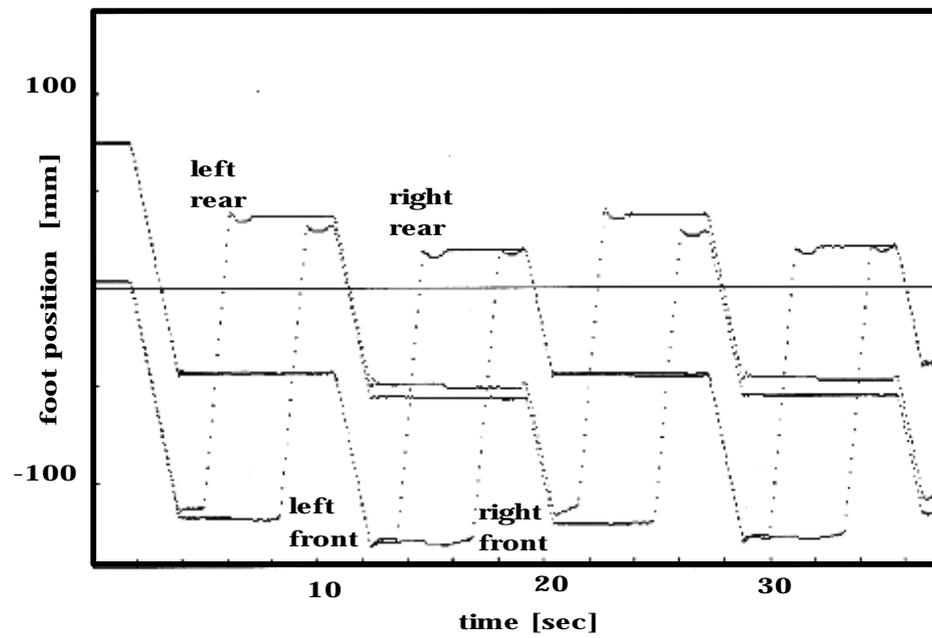


Fig. 4-15 Feet position-time trajectory (rear load)

#### 4.4.3 傾斜面適応歩容

4.3節で示した傾斜面適応歩容についても実際の歩行ロボットを用いた有効性確認のための実験を行った。歩行条件は、脚復帰距離が150[mm]、4脚支持期の脚送り速度が50[mm/sec]である。もちろん、歩行面の傾斜は未知であるが、ロボットの重量は既知で重心はその幾何学的中心にあると仮定している。実験結果を Fig.4-16 から Fig.4-19 までのグラフに示す。Fig.4-16 と Fig.4-17 は、歩行中、前2脚で計測された荷重の合計と後2脚で計測された荷重の合計が示されており、それぞれ角度が6度の斜面を上っている時と、同じ角度の斜面を下っている時のデータを示してある。これらのグラフから、4脚支持・推進動作中に前脚の荷重が増加し、後脚の荷重が減少していることが読み取れる。適応歩容を用いなければ、上りの時は後脚、下りの時は前脚により大きな荷重がかかるはずであるが、実験結果では適応動作のため、どちらの場合もほぼ同じ傾向の荷重配分になっている。どちらのグラフとも、後脚により大きな荷重がかかる傾向を示しているが、支持脚の切換え条件（歩行シーケンスの および ）に多少の許容範囲を設けているために、理想の状態より早めに4脚支持・推進動作を打ち切っているためであると考えられる。

Fig.4-18 と Fig.4-19 は、斜面歩行時の脚先の動きを各脚座標系で表している。Fig.4-18 は上り斜面、Fig.4-19 は下り斜面でのデータである。これらのグラフから、

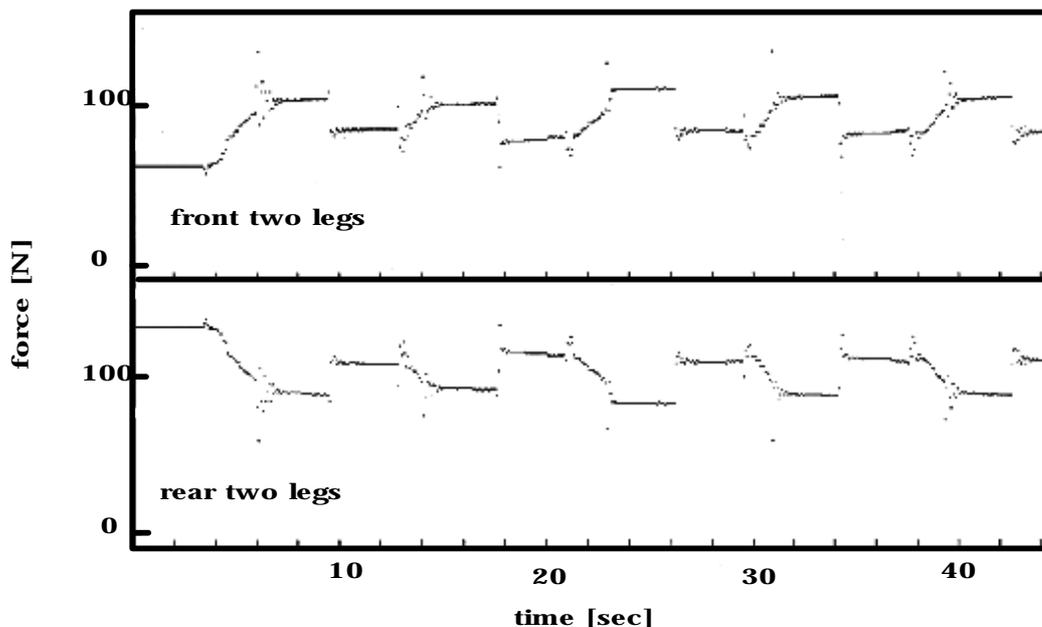


Fig.4-16 Front legs' load and rear legs' load (  $\theta = 6^\circ$  )

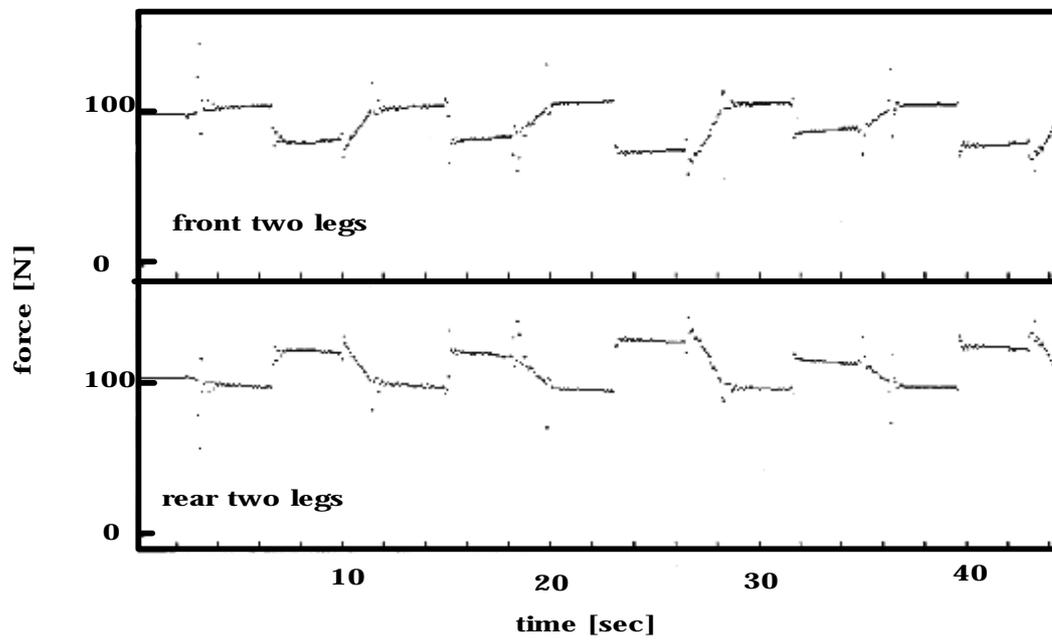


Fig.4-17 Front legs' load and rear legs' load (  $\theta = 6^\circ$  )

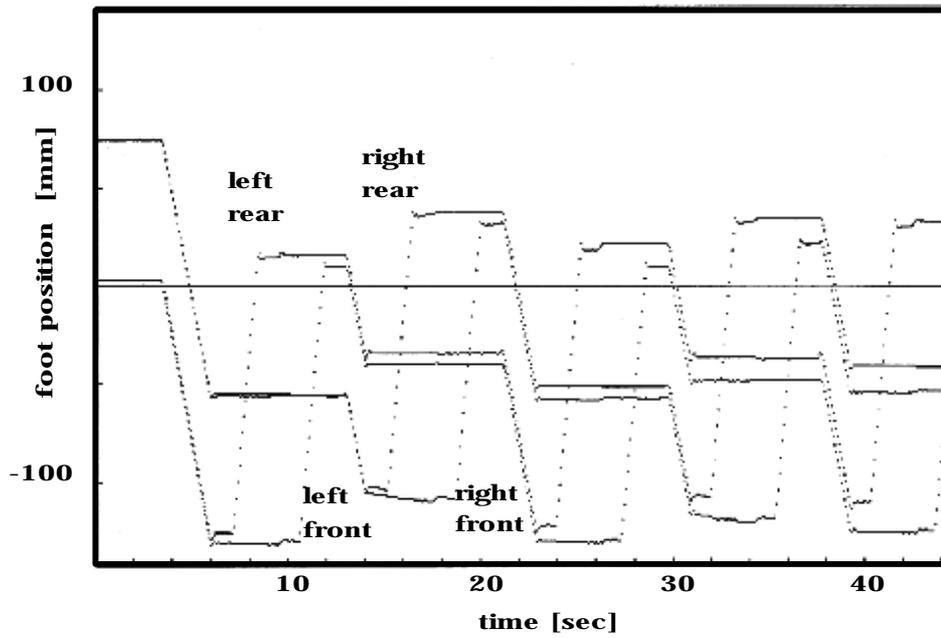


Fig. 4-18 Feet position-time trajectory (  $\theta = 6^\circ$  )

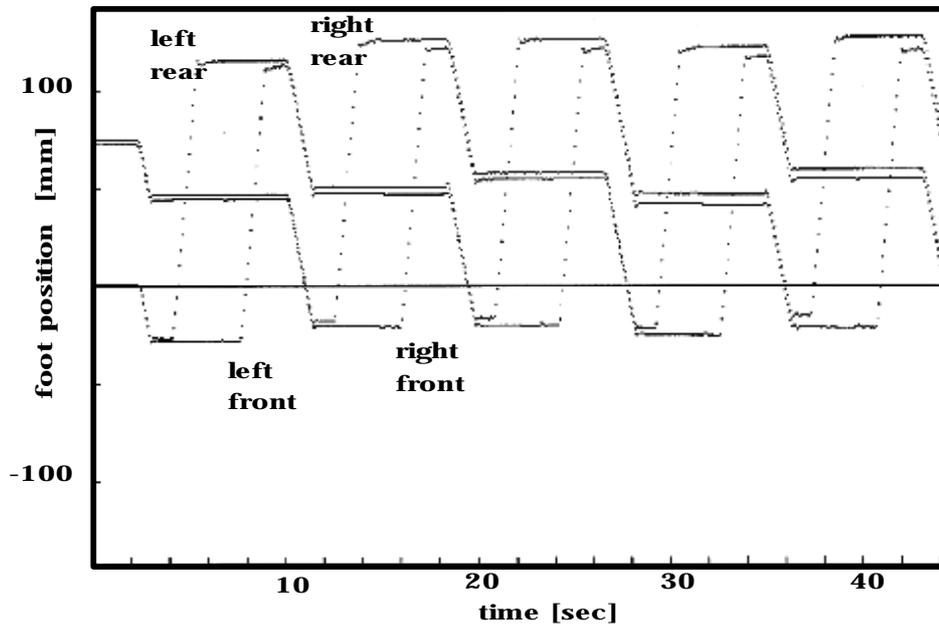


Fig. 4-19 Feet position-time trajectory (  $\theta = 6^\circ$  )

ロボットが斜面を登っている時は後方の安定余裕が小さくなるため、これを避けるために脚の動きを後方にシフトし、また逆に斜面を下る時は、前方の安定余裕を確保するために脚の動きを前にずらしていることがわかる。シフト量は上りの場合で約-42 [mm]から-62 [mm]、下りの場合で約 37 [mm]から 58 [mm]である。(4-7)式から求めたシフト量は、 $\pm 45$  [mm]であり、妥当な値であると考えられる。ちなみに、適応動作がなく脚ストローク位置の固定された間欠クロール歩容では、これらの斜面を歩行することができなかった。このようなことから、提案する適応歩容が安定に斜面を登降するために有効であることがわかる。

#### 4.5 本章のまとめ

歩行ロボットは、様々な環境に適応できる能力を持っているが、その歩行環境をどのように検出し、それをどのように脚の動きに活用していくかが問題になっている。本章では、歩行ロボットの脚に設置された力センサを用いて、支持脚の復帰するタイミングを変え、ロボットの重心位置や歩行面の傾斜に対応できる適応歩容を導出した。

4脚ロボットが静的な歩行を行う場合、間欠クロール歩容を用いることにより、最も安定性の高い歩行が実現できる。この歩容では、重心推進は4脚支持期のみに行い、脚の復帰動作時は停止している。この歩行においては、各脚の復帰距離を一定に保つ

たまま、4脚支持推進動作の長さを変えることにより、各脚の支持推進動作と復帰動作からなる往復運動の位置を変えることができる。この脚の運動位置を変えることによって、ロボットの重心位置の変動や、斜面上での歩行に対応することができる。重心が前方に位置した場合は、前側に倒れやすくなるため、脚はより前方で胴体を支えることが必要である。後方に位置した場合は、この逆のことが言える。また斜面の場合も、上り坂の場合は、前側が高くなるため後方に倒れやすくなる。これを未然に防ぐには、脚はより後方で胴体を支えることが必要となる。下り坂の場合はより前方での胴体支持が有利である。このような対応動作をどのようにして実行させるかが問題であるが、本章の手法では、脚にかかる荷重データを利用した。ロボットが静的に安定を保って立っている場合は、各脚の荷重がわかれば、重心位置は静力学的に2次元平面内で求めることができる。重心位置がわかれば、支持脚との位置関係を考慮して安定な歩容を生成できる。傾斜面に対しては、傾斜計を用いて地面の傾斜を測定するのが直接的な方法であるが、ここではそれをせずに、脚にかかる荷重データを利用した。傾斜を測定する場合は、その測定値とロボットの物理的なパラメータから安定な歩容を導出することになる。この導出過程においては、モデリング誤差や外乱が入り込む可能性がある。それに対して脚の荷重データは、地面の傾斜に起因する情報だけでなく、外乱等の影響を受けた結果での情報であるため、よりロボットの実態に近い情報を持っていると考えられ、信頼性の高い制御に役立つものである。これを用いて支持脚期を終了し、復帰動作を開始するタイミングを決定した。

本章で考案した適応歩容は、実際に4脚步行ロボットに適用され、実験を通してその有効性が確認された。将来的には、視覚等のより高度なセンサシステムにより環境認識をすることも必要ではあるが、本手法のような比較的簡単な方法で安定性を確保することも併用することによって、より信頼性の高い歩行ロボットシステムが構築される。

## 第5章 操縦型歩行制御

### 5.1 緒言

本章では、人間の操縦による4脚移動ロボットの制御手法を考える。脚機構は、車輪やクローラに比較して非常に高い環境適応能力を持っている移動手段であるため、今まで脚機構をロボットの移動手段とするための多くの研究がなされてきた。その結果、最近では実際に屋外環境で自立的に移動できる脚移動ロボットも開発されている[8][9][10]。このように、機構面では実用に近づきつつある歩行ロボットではあるが、どのようにロボットの移動を制御するかという問題については、あまり議論されていない。

一番単純な方法としてプログラム制御が考えられる。これは、予め移動がプログラミングされており、ロボットはそれに忠実に従って動くものである。ある決まった経路での輸送や監視といった用途には使えそうであるが、臨機応変に進路を変えろといったことはできないので、広く一般に受け入れられる制御方法とはならないであろう。車輪型の移動ロボットなどでは、自律移動が広く研究されている。ロボット自身が環境や障害物を認識し、また地図などを利用して人間の助けを借りることなく移動するものである。技術的には非常に興味深く、また将来的に魅力的な方法であるが、まだ多くの課題を持った制御手法である。それに加え、脚移動ロボットが導入されるような環境は、非常に複雑なものと考えられ、そのような環境で機能するセンサシステムの開発にも課題は多い。

このような状況を考えた時、人間が脚移動ロボットを操縦するという形は、現実的な方法と言えよう。戦略的な高度な判断は、操縦者に委ねようというものである。人間がロボットに搭乗して操縦したり、ロボットから送られてくる情報をもとに遠隔操作することも考えられる。現在、人間が操縦する移動機械の代表である自動車の場合、操縦者がエンジン、ステアリング、ブレーキといった個々の構成要素を直接制御して移動を実現している。一方、脚移動ロボットの場合は、アクチュエータの数が非常に多くなる（一般に歩行ロボットでは1脚あたり3自由度を有していることが多い）ため、操縦者がこれらを直接制御することは不可能である。そのため、歩行ロボットを人間が操縦するためには、より上位レベルでのコマンドでロボットの移動を制御できる手法の開発が必要である。

本章では、方向も含めた速度指令でロボットの移動を制御する、操縦型歩行制御の4脚步行ロボットへの適用を考察する[29]。このような歩行制御手法は、6脚步行口

ロボットでは一般的に行われている[18]。6脚移動ロボットの場合は、4脚の場合と比較して大きな安定余裕が確保でき、またある脚が可動限界に達したとしても、歩行を継続するための動作のバリエーションが多いため、問題が容易になっている。さらに、6脚移動ロボットでは、3脚交互支持歩容という、非常に単純なアルゴリズムで歩行できる歩容がある。これは、6脚を3脚ずつの2組のペアに分け、この各組が交互に支持脚と遊脚を繰り返すものである。片方の組で支持・推進ができなくなった場合、もう一方の組が即座に支持脚となり、もとの組の脚は遊脚となり、移動を継続するものである。この歩容を用いていけば、操縦者の指令通りに移動を継続してゆくことは、それほど困難なことではない。これに対し、4脚步行ロボットの場合は、3脚支持状態での重心位置の移動動作中に静的な安定性を失う可能性や、4脚支持状態で可動限界に達した脚があっても、他の脚の着地位置によっては、即座にその脚を遊脚化して復帰させることはできないため、問題が複雑になっている。

従来の4脚步行ロボットの歩行制御は、予め重心の移動軌跡が与えられており、これに対して安定な歩行が実現できるような脚の動き（歩容）を決定していることが多い。過去に4脚移動ロボットの操縦型の歩行制御も報告されているが[19]、この手法では2自由度の移動速度指令に対して、1ステップ先までの脚軌道を計画しており、この間の進路変更はできない。これに対し、本章で提案する手法では、歩行のための動作を、重心推進動作と胴体移動は行わない移動継続対処動作に分離し、重心推進動作中の3自由度の移動速度を直接指令するものであり、重心移動中の突発的な進路や姿勢の変更に対応できる。さらに、操縦型ということで、将来どのような指令が来るか予想することができないため、重心推進動作中は将来の脚軌道を想定することなく、現在の移動指令だけで脚の運動を決定し、いずれかの脚が可動限界に達した時に初めて対処動作を行う方式を採用する。

5.2節では、提案する操縦型歩行制御手法の基本概念を示す。5.3節で歩行アルゴリズムを説明する。歩行アルゴリズムは、4脚支持でのみ重心推進動作を行うものと、可能であれば3脚で重心推進動作を行うものとの2種類を考える。5.4節では、この2種類のアルゴリズムをシミュレーションで評価する。また、直進指令が続いた場合の歩容の収束性を調べる。さらに、収束する歩容が効率の良いものになるような脚復帰のルールを検討する。5.5節では実験について報告する。実験に用いた4脚移動ロボットおよび、脚駆動制御手法を紹介するとともに、歩行実験時のデータを示して、提案する操縦型歩行制御手法の有効性を検証する。

## 5.2 歩行制御法の基本概念

これまでの歩行制御は、階層構造を持ち、上位レベルの制御系から歩行経路が与えられ、下位レベルの制御系において経路から歩容を決定する構造のものが提案されている[7]。下位レベルの制御においても、与えられた経路データから脚の復帰順を決定し、基準となる歩容を生成して、効率的な歩行を実現している[15]。このような制御方式においては、歩容計画を立てるために、ロボットの重心移動経路が予め与えられていることが必要であり、それに伴い、リアルタイムで歩行を制御するのは困難である。一方、操縦型歩行制御では、上位レベルの制御を人間が行うものであり、下位のレベルの制御系に与えるものは、ある程度継続した経路データでなく、瞬時の方向をも含めた速度コマンドである(人間が自動車を運転している状況に対応)。この制御方式においては、将来のコマンドを予測することは難しく、また、コマンドが突如として変化することも考えられる。このような条件下においては、将来の脚の軌道を考慮する歩容を適用することは適当ではないと考えられる。

本研究で考える操縦型歩行制御手法は、脚の動作シーケンスが決まった歩容を生成するものではなく、現在の状態で指令速度での重心移動が可能であればそのまま推進し(重心推進動作)、それが何らかの障害で実現できなくなった場合は、重心移動を可能にするための移動継続対処行動を行う(この間は重心移動を行わない)。つまり、障害の発生を移動継続対処動作を起動するイベントと考える。具体的に障害とは脚の可動限界到達であるが、歩行アルゴリズムによっては安定性が保てなくなることも障害となりうる。対処行動とは脚の遊脚化や復帰、踏み換えである。この手法の利点としては、アルゴリズムが単純であること、将来の移動経路に関係なくその時点での速度指令のみで脚の動きを決定できるため、移動指令の変化に対応しやすいことなどが挙げられる。一方、この手法の短所については、一定の速度で継続的な歩行をした場合、基準歩容を用いるより効率性が劣る(脚の踏み換え回数が多い)ことが挙げられる。ここでは、この欠点を少しでも緩和させるために、直進の様な単純な指令が続くときには、指令変更にも対応しつつ、最適な歩容への収束を考える。

## 5.3 歩行アルゴリズム

### 5.3.1 歩行の基本条件

本章で提案する操縦型歩行制御は、操縦者から3自由度の速度(平面内の2自由度の並進速度と垂直軸回りの角速度、いずれもロボット本体に固定された胴体座標系で記述)をコマンドとして与え、静的な安定性を保ちながら歩行を行うものである。し

たがって重心移動動作は3脚もしくは4脚支持状態である時に行う。また、一連の移動のための動作を、重心推進動作と、重心移動は行わないで脚の上げ下げや着地点変更を行う移動継続対処動作に分ける。重心推進動作時には、常にコマンドを受け付け、これに従ってリアルタイムで胴体の移動が制御される。移動継続対処動作時には、コマンドは受け付けられず、直前のコマンドが移動継続対処動作終了後も大きくは変わらないと仮定して、対処動作が行われる。初期状態は、4脚支持状態として歩行を開始する。前述したように、静的な安定を保つための推進動作には、3脚支持で行う場合と4脚支持で行う場合とがあるので、これらの場合に応じて2種類の歩行アルゴリズムを考える。

### 5.3.2 4脚支持推進型

この歩行アルゴリズムの基本戦略は、推進動作は必ず4脚支持状態で行うというものである。このアルゴリズムを Fig.5-1 に示す。各脚の可動範囲が重心に対して対称に分布しており、かつ可動範囲が重複してないような場合 ( Fig.5-2 に示すような場合 ) には、ロボットが4脚支持で推進動作中は、静的安定性を失うことがなく、保守的な戦略である。初期状態から推進動作を行ってゆくと、どこかの脚がその可動限界



Fig. 5-1 Algorithm of 4 legged propulsion type

Title:  
fig2.eps  
Creator:  
CLARIS EPSF Export Filter V1.0  
Preview:  
この EPS 形式のファイルは、  
プレビュー付きで保存されていません。  
Comment:  
この EPS 形式の図は  
PostScript プリントでのみ  
印刷できます。

Fig. 5-2 Foot arrival at the edge of work space

に達することにより、推進動作の継続ができなくなる。この状態の一例を Fig.5-2 に示す。この図において周囲の4つの四角形とその中の点はそれぞれ各脚の可動範囲と脚位置を、中央の楕円と点は胴体と重心位置を示している。ここでは上方向に移動していることを想定しており、進行方向に対して右後脚が可動限界に到達したことを示している(これより可動限界に達した脚を限界脚と呼ぶことにする)。限界脚が遊脚化可能(右前脚が点Aにあるような状態で、限界脚を上げて静的安定が保てる場合)であれば、この限界脚を遊脚にして復帰動作を行い、新たな4脚支持状態で推進動作が可能となる。右前脚が点Bにあるような場合で、限界脚が遊脚化できない時は、限界脚に隣接する脚のうち、遊脚化可能な脚(この場合では左後脚であり、これを隣接脚と呼ぶことにする)の着地点を変更(隣接脚踏み換え)して限界脚を遊脚化可能にしてから限界脚の復帰動作を行う。一般に4脚支持状態では、2脚が遊脚化可能であり、この2脚は必ず隣接している。Fig.5-2 で右前脚が点Aにある場合では、後ろの2脚が遊脚化可能である。また、遊脚化不可能な脚の対角位置の脚は必ず遊脚化可能である。このことから、限界脚が遊脚化できない場合、対角の脚は遊脚化可能であり、その対角脚に隣接する2脚のうちどちらかは遊脚化可能である。結局、遊脚化できない限界脚に隣接する2脚のうち1脚は必ず遊脚にすることができ、これが隣接脚とな

る。隣接脚踏み換えによって、遊脚化不可能な限界脚を遊脚化可能にすることができるかという問題もあるが、基本的には脚の可動範囲がロボットの重心位置に対して対称に分布していれば、遊脚化可能な隣接脚をその対角脚と対称な位置に踏み換えることにより可能となる。

### 5.3.3 3脚支持推進型

このアルゴリズムは、可能であれば最大限3脚支持状態で推進動作を行うものである。このアルゴリズムを Fig.5-3 に示す。初期状態の4脚支持状態から推進動作を行ってゆくと限界脚が発生する。限界脚が遊脚化可能であればこれを遊脚化して3脚支

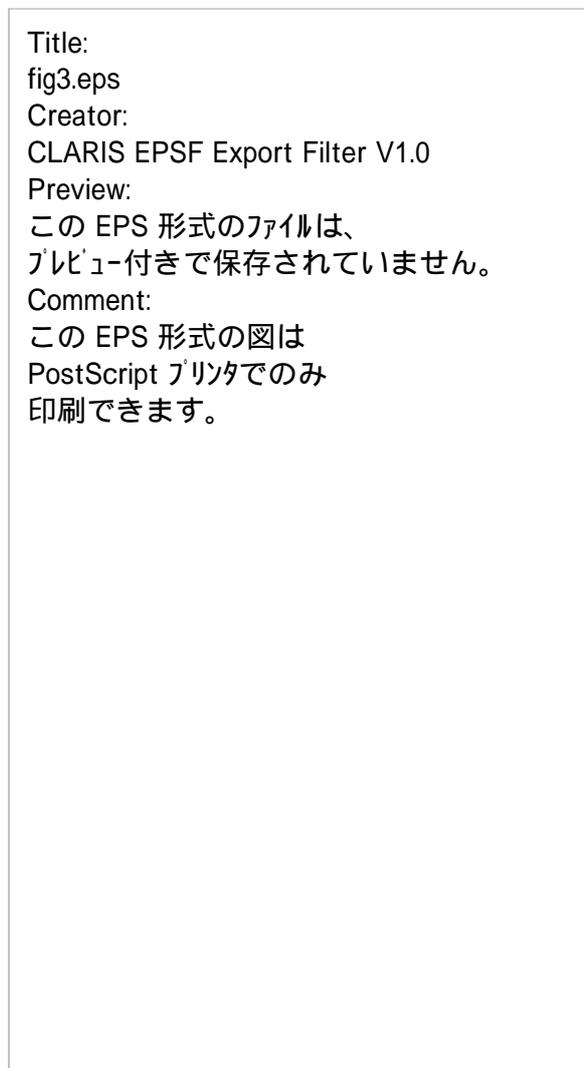


Fig. 5-3 Algorithm of 3 legged propulsion type

持状態にする。そうでない場合は、隣接脚踏み変えを行った後、限界脚を遊脚化する。この後は、3脚支持状態での推進動作を行う。この推進動作中、ロボットは2つの要因で推進ができなくなる可能性がある。1つめの要因は、重心の鉛直射影点が支持三角形（支持脚の接地点を結んでできる三角形）から外れて静的な安定性が保てなくなる時である。この場合は、現在遊脚になっている脚を着地させることにより、4脚支持状態とすることにより初期状態に戻る。2つめの要因は、限界脚が発生したときである。この時は、さらに2つの場合に分けて考えることができる。第1の場合は、限界脚と遊脚とが隣接している場合である。この場合は、限界脚が遊脚化可能となるような位置に遊脚を着地する。そして限界脚を遊脚化し、3脚支持状態にして推進動作に戻る。第2の場合は、限界脚と遊脚が対角位置にある場合である。この場合は、遊脚を着地させてもすぐ限界脚を遊脚化することはできないので、遊脚の着地後、限界脚を遊脚化できるように隣接脚踏み換えを行い、新たな3脚支持状態に移行し、推進動作に戻る。

#### 5.4 シミュレーションによる評価

##### 5.4.1 4脚支持推進型と3脚支持推進型の比較

前述した2種類の操縦型歩行制御アルゴリズムについて、シミュレーションによってその特性を評価してみた。シミュレーションの条件としては、脚の可動範囲を Fig.5-4 のように設定した。これは後述する実験に用いたロボットの数値をそのまま利用したものである。歩行経路は直線とし、x軸正方向への直進と、x軸からy軸方向へ  $45^\circ$  傾いた斜行として、2[m]歩行させることを想定した。脚の初期位置は Fig.5-4 で扇形で示される各脚の可動範囲内に点で示される各脚基準点とした。直線歩行を想定したので、脚は各基準点を通る直線上を運動することとした。脚の着地点であるが、隣接脚踏み替えの場合は対角脚と対称な位置に、その他の場合はできるだけストロークを長くできるように、脚の運動する直線と脚の可動限界との進行方向での交点とした。

シミュレーションの結果を Table 5-1 に示す。このシミュレーションでの評価項目とは、2[m]重心移動する間の総ステップ数、移動セグメント数、および総遊脚移動距離とした。総ステップ数は、ある脚が遊脚となり着地したら1とし、これを4脚分合計したものである。また、移動セグメント数は、何回の連続した推進動作で歩行ができたかを示すものである。本歩行制御手法では、前述したように推進動作と移動継続対処動作を区別しているので、重心移動が間欠的になる。移動セグメント数はそ

Title:  
fig4.eps  
Creator:  
CLARIS EPSF Export Filter V1.0  
Preview:  
この EPS 形式のファイルは、  
プレビュー付きで保存されていません。  
Comment:  
この EPS 形式の図は  
PostScript プリンタでのみ  
印刷できます。

Fig. 5-4 Work space of the leg in simulation

Table 5-1 Comparison of two algorithms

	Forward walk		Diagonal walk	
	3-legged type	4-legged type	3-legged type	4-legged type
Number of Steps	22	17	31.5	34
Number of moving segments	23	9	30	23
Total transfer distance of swinging legs [mm]	8,190	7,784	7,265	9,950

の度合を示すものである。総遊脚移動距離は、各脚が遊脚の状態でも移動した距離を合計したものである。この歩行制御手法では、脚の上げ下げや遊脚での脚の移動中は推進動作は行わないので、総ステップ数や総遊脚移動距離が大きいとそれだけ移動に直接結び付かないむだ時間が多くなることを意味する。

シミュレーション結果を見てまず気がつくのは、斜行の場合は直進に比べ、総ステップ数と移動セグメント数が多くなることである。これは、ロボットの脚の可動範囲に起因するものである。斜め方向の移動では、ストローク（歩幅）を大きくとれない脚が生じるため、総ステップ数と移動セグメント数が多くなる。4脚支持推進型と3

脚支持推進型のアルゴリズムの比較であるが、総ステップ数や総遊脚移動距離に関しては、アルゴリズムの違いから生じる特徴ははっきりとは現れなかった。他の条件(初期位置や移動方向)でのシミュレーションも行ったが、条件によってこれらの項目(総ステップ数と総遊脚移動距離)の値はまちまちであり、アルゴリズムによってどちらかが大きくなるといった一般的な傾向は認められなかった。移動セグメント数については、4脚支持推進型の方が少なくなる傾向が見られた。つまり、3脚支持推進型のほうが同じ距離を移動する時でも小刻みな動きを多くすることになる。これは、4脚支持推進型では連続重心移動を妨げる要因が限界脚の発生だけであるのに対し、3脚支持推進型ではこれに加え、静的安定性の不満足という要因があり、連続重心移動距離が短くなるためである。周期的な固定した歩容を採用する歩行ロボットでは、3脚支持期をもつ歩容の方が、歩行速度の点で有利になるが、遊脚動作と推進動作を同時には行わない方式の歩行では、そのようなメリットが期待できないことがわかる。さらに、歩行の安定性の観点からは、重心移動中に静的安定性を失う可能性のない4脚支持推進型のほうが有利となる。このようなことから、以下の考察は4脚支持推進型に絞って進めることにする。

#### 5.4.2 歩容の収束性

適応能力を持ちながらも、条件の整った環境においては基準となる歩容に収束する性質を有する歩容が、基準収束型適応歩容として提案されている[19]。任意に歩行方向を変えられる操縦型歩行制御でも、ある一定の時間は直進歩行を行わせることは十分に考えられる。ここでは、提案する操縦型歩行制御において、直進指令が続いた場合に最適な歩容に収束するための方策を考える。

前項のシミュレーションにおいて、ある期間一定方向に歩行させた場合、脚の動きはある周期的歩容に収束する現象が確認された。特にアルゴリズムが比較的単純な4脚支持推進型においては、その収束も早く周期も短い。前節のシミュレーションで、4脚支持推進型で直進するときの脚の動きの一例を Fig.5-5 に示す。このグラフにおいて、脚の位置は進行方向の座標での位置を示している。この収束した周期的歩容は、数例のシミュレーションから、脚の初期位置に依存することがわかった。これを確認するために、4脚支持推進型の直進歩行について、初期位置を変えてその収束した歩容を調べたところ、16種類のパターンの歩容が認められた。一方、遊脚動作中は推進動作を行わない4脚歩行ロボットの直進歩行では、間欠クロール歩容が安定性に優れた歩容であることが知られている。この間欠クロール歩容の支持パターンの変化を

Title:  
fig5.eps  
Creator:  
Canvas 3.0  
Preview:  
この EPS 形式のファイルは、  
プレビュー付きで保存されていません。  
Comment:  
この EPS 形式の図は  
PostScript プリンタでのみ  
印刷できます。

Fig. 5-5 Foot position of 4 legged propulsion algorithm

Title:  
fig6.eps  
Creator:  
CLARIS EPSF Export Filter V1.0  
Preview:  
この EPS 形式のファイルは、  
プレビュー付きで保存されていません。  
Comment:  
この EPS 形式の図は  
PostScript プリンタでのみ  
印刷できます。

Fig.5-6 Intermittent crawl gait

Fig.5-6 に示す。この図において、線分はストローク（脚の動く軌跡）であり、線分上の点が脚の位置、線分に付加された矢印は脚の復帰動作を表している。確認された16種類の収束歩容の中には、間欠クロール歩容と同様なものも含まれている。そこで、4脚支持推進型操縦歩行制御法で、直進指令が続いた場合に、間欠クロール歩容へ収束させる手法を考えてみる。収束させる手段としては、遊脚の着地位置の工夫を考える。まず間欠クロール歩容の特徴をまとめてみる。

- (1) 同側の脚の位置は、その脚の座標系では等しい
- (2) 左右の脚の位置は、その脚の座標系で半ストローク異なっている
- (3) 脚の復帰動作は、まず後脚が行い、引き続いて同側の前脚が行う

以上のような特徴を獲得してゆくために、各脚が限界脚となった時の対処動作を以下のようなルールで行うこととする。なお以下の説明で、位置とは各脚ごとに設定した座標系での位置を、対称位置とは重心位置に関する対称位置を意味するものとする。

#### A. 左前脚が限界脚の場合

##### A-1. 限界脚が遊脚化可能な場合

左前脚を左後脚と同位置に着地

##### A-2. 限界脚を遊脚にできない場合

###### A-2-a. 左後脚が遊脚化可能な場合

左後脚を最前部に復帰後、左前脚を最前部に復帰

###### A-2-b. 右前脚が遊脚化可能な場合

右前脚を最前部に復帰後、右前脚を最前部に復帰

#### B. 右前脚が限界脚の場合

##### B-1. 限界脚が遊脚化可能な場合

右前脚を左前脚と半ストローク異なった位置に着地

##### B-2. 限界脚を遊脚にできない場合

###### B-2-a. 右後脚が遊脚化可能な場合

右後脚を左前脚と半ストローク異なった位置に着地させ、右前脚が遊脚化できれば左前脚と半ストローク異なった位置に着地。もし遊脚化できなければ、右後脚を最前部に復帰させてから右前脚を左前脚と半ストローク異なった位置に着地

###### B-2-b. 左前脚が遊脚化可能な場合

左前脚を最前部に復帰後、右前脚を左前脚と半ストローク異なった位置へ着地

#### C. 左後脚が限界脚の場合

##### C-1. 限界脚が遊脚化可能な場合

左後脚を最前部に復帰

##### C-2. 限界脚を遊脚にできない場合

###### C-2-a. 右後脚が遊脚化可能な場合

右後脚を左前脚の対角位置に着地後、左後脚を最前部に復帰

C-2-b. 左前脚が遊脚化可能な場合

左前脚を右後脚の対角位置に着地後、左後脚を最前部に復帰

D. 右後脚が限界脚の場合

D-1. 限界脚が遊脚化可能な場合

右後脚を左前脚と半ストローク異なった位置に着地

D-2. 限界脚を遊脚にできない場合

D-2-a. 左後脚が遊脚化可能な場合

左後脚を右前脚と対角位置に着地後、右後脚を最前部に復帰

D-2-b. 右前脚が遊脚化可能な場合

右前脚を左後脚の対角位置に着地後、右後脚を最前部に復帰

また、複数の脚が限界脚になった場合は、以下の順の優先度をもって上記の対処行動を行うものとする。

- (1) 左右の脚が同時に限界脚になった場合は、左側の脚を優先する
- (2) 同側の前後の脚が同時に限界脚になった場合は、後脚を優先する

このルールの基本的な考え方は、以下の通りである。間欠クロール歩容に収束させるために、右側の脚の対処動作は、基準とする左前脚の運動と半位相だけずらせることを主な目的としている。そして左側の脚の対処動作では、前後を同位相にして、後脚に引き続いて前脚を復帰させるシーケンスを作り出すことを狙っている。また、複数の限界脚の対処は、基本的には左側の脚をマスターにして、後脚の復帰動作を前脚の復帰動作より先に行うことを考えている。

このルールでは、ロボットの進行方向に対して前後、左右の脚を区別しているため、実際のロボットにインプリメントする際には、4つの進行方向に対して、それぞれ別のモードの制御プログラムを用意する必要がある。また、このルールは x 軸または y 軸に平行な方向の直進を基準として考えられているが、実際にはあらゆる方向への移動が想定できる。そのため、脚の着地位置についても最前部とか、同位置、半ストローク異なった位置というのが進行方向によって変わってくる。そこで、ここではロボットの移動方向を前述した4つの方向モードに大別して、各モードに1つずつの基準となるストロークを仮定した。この基準ストロークは x 軸もしくは y 軸に平行な直線である。最前部という場合には基準ストロークの最前部、同位置や半ストローク異

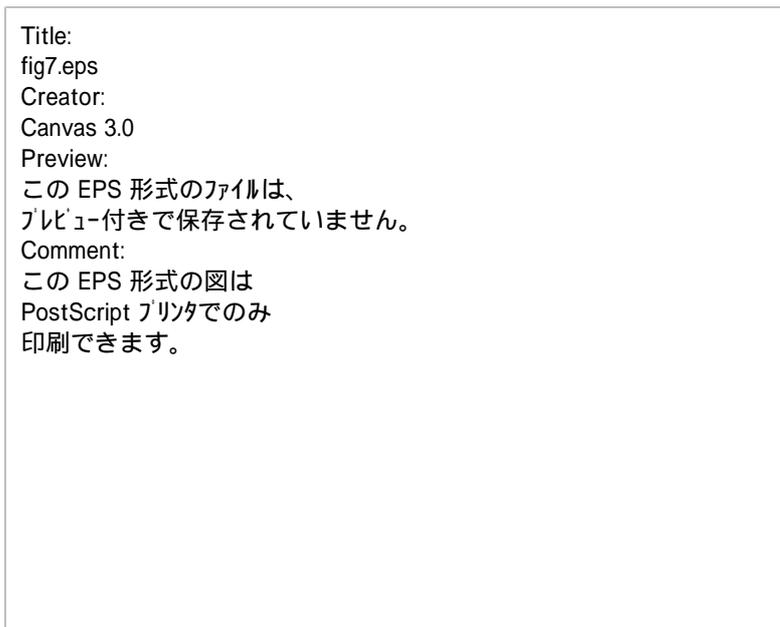


Fig. 5-7 Foot position of convergent algorithm

なった位置の場合は基準ストロークに射影した位置に対して、同位置や半ストローク異なった位置に着地する。

このルールに基づいた歩容の収束のシミュレーションを行った。各脚の基準ストロークを 25 分割した 26 点を初期位置としてシミュレーションした結果、全ての組み合わせについて間欠クロール歩容に収束することが確認された。Fig.5-7 に、Fig5-5 と同じ初期条件で、ここで示した間欠クロールに収束させるためのルールを適用したシミュレーション結果を示す。

## 5.5 実験

上に述べた 4 脚移動ロボットのための操縦型歩行制御手法の有効性を確認するために、実機を用いた歩行実験を行った。

### 5.5.1 実験装置

Fig.5-8 に、実験のために開発された移動ロボットを示す。このロボットは、掘削作業を想定して設計されたロボットで、4 本の脚と 1 対のクローラを持ち、ハイブリッド移動機構と呼ばれている。今回は、歩行制御手法の実験に用いるため、クローラ関係の制御は一切行わない。また、本体には 3 自由度の小型マニピュレータを搭載できるようにしている。大きさは基本姿勢時で全長、全幅とも約 700[mm]であり、全高は約 400[mm]である。重量は約 70[kg]である。各脚は 3 自由度をもっており、



Fig. 5-8 Photograph of the experimental robot



Fig. 5-9 Leg mechanism

各関節はDCサーボモータによって駆動する。クローラ駆動用を含め13個のモータドライバはロボット本体に搭載されているが、電源や制御用のコンピュータは外部に設置されており、ロボットとはケーブルで接続している。センサとしては、胴体部に振子式の姿勢センサと角速度計、足首部に3軸の力センサ、そして足底部に接触センサを備えている。また、操縦者が指令を与えるデバイスとして、力センサを利用したジョイスティックが用意されている。

このロボットの脚機構を Fig.5-9 に示す。3自由度を持った5節リンク機構で構成されている。脚剛性を高めるために、閉リンク機構とし関節は全て回転形とした。各関節軸の交点を原点として、進行方向をx軸、をx軸からの回転角とした時の運動

学と逆運動学を示す。

運動学

$$x = x_0 \cos l \quad (5-1)$$

$$y = x_0 \sin g \quad (5-2)$$

$$z = a \sin a - e \cos q_1 \quad (5-3)$$

ここで

$$x_0 = a \cos a + e \sin q_1 \quad (5-4)$$

$$q_1 = p/2 + a - q_2 - q_3 \quad (5-5)$$

$$q_2 = \cos^{-1} \frac{a^2 + l_0^2 - b^2}{2al_0} \quad (5-6)$$

$$q_3 = \cos^{-1} \frac{d^2 + l_0^2 - c^2}{2dl_0} \quad (5-7)$$

$$l_0 = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos(b - g)} \quad (5-8)$$

逆運動学

$$a = x_1 + x_2 \quad (5-9)$$

$$b = q_1 + x_4 + x_5 \quad (5-10)$$

$$g = \tan^{-1}(y/x) \quad (5-11)$$

ここで

$$x_1 = \cos^{-1} \frac{a^2 + l_1^2 - e^2}{2al_1} \quad (5-12)$$

$$x_2 = \tan^{-1}(z/x_0) \quad (5-13)$$

$$x_3 = \cos^{-1} \frac{a^2 + e^2 - l_1^2}{2ae} \quad (5-14)$$

$$x_4 = \cos^{-1} \frac{a^2 + l_2^2 - c^2}{2al_2} \quad (5-15)$$

$$x_5 = \cos^{-1} \frac{b^2 + l_2^2 - c^2}{2bl_2} \quad (5-16)$$

$$l_1 = \sqrt{x_0^2 + z^2} \quad (5-17)$$

$$l_2 = \sqrt{a^2 + d^2 + 2ad \cos x_3} \quad (5-18)$$

### 5.5.2 脚駆動制御手法

提案する操縦型歩行制御方式では、オペレータから与えられる指令は、ロボット本体に固定された座標系でのロボット本体の3自由度の速度（2自由度の並進速度 ${}^B \mathbf{v}_B$ と垂直軸回りの回転速度 $\mathbf{w}$ ）である。ここでは、3自由度の速度指令と各脚の駆動速度との関係を考える。本質的な運動は平面内なので、Fig.5-10のような2次元モデルで考える。脚先、およびロボット本体中心の位置ベクトルをそれぞれ $\mathbf{p}_{Fi}$ 、 $\mathbf{p}_B$ 、ロボット本体の座標系から見た脚先位置ベクトルを ${}^B \mathbf{l}_i$ 、そしてロボットの姿勢を表す2次元行列を $\mathbf{R}$ とすると、脚先位置は次のように表される。

$$\mathbf{p}_{Fi} = \mathbf{p}_B + \mathbf{R} {}^B \mathbf{l}_i \quad (5-19)$$

これをロボットの胴体に固定された座標系で表すと、

$$\mathbf{R}^T \mathbf{p}_{Fi} = \mathbf{R}^T \mathbf{p}_B + {}^B \mathbf{l}_i \quad (5-20)$$

となり、これを時間微分することにより次式を得る。

$$\dot{\mathbf{R}}^T \mathbf{p}_{Fi} = \dot{\mathbf{R}}^T \mathbf{p}_B + \mathbf{R}^T \dot{\mathbf{p}}_B + {}^B \dot{\mathbf{l}}_i \quad (5-21)$$

これより、ロボットの座標系での脚の速度は次式のように求められる。

$${}^B \dot{\mathbf{l}}_i = -\mathbf{R}^T \dot{\mathbf{p}}_B + \dot{\mathbf{R}}^T (\mathbf{p}_{Fi} - \mathbf{p}_B) \quad (5-22)$$

Title:  
fig9.eps  
Creator:  
CLARIS EPSF Export Filter V1.0  
Preview:  
この EPS 形式のファイルは、  
プレビュー付きで保存されていません。  
Comment:  
この EPS 形式の図は  
PostScript プリンタでのみ  
印刷できます。

Fig. 5-10 Leg motion control in the body frame

(5-22)式の各項においては、以下に示すような関係がある。

$$\mathbf{R}^T = {}^T \mathbf{R}^T \quad (5-23)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & -\mathbf{w} \\ \mathbf{w} & 0 \end{bmatrix} \quad (5-24)$$

$$\mathbf{p}_{Fi} - \mathbf{p}_B = \mathbf{R}^T \mathbf{l}_i \quad (5-25)$$

$${}^B \mathbf{v}_B = \mathbf{R}^T \dot{\mathbf{p}}_B \quad (5-26)$$

これらの関係を利用すると、ロボットの座標系からみた脚の駆動速度は、指令速度を用いて次のように計算できる。

$${}^B \dot{\mathbf{l}}_i = -{}^B \mathbf{v}_B + {}^T \mathbf{l}_i \quad (5-27)$$

### 5.5.3 実験結果

前述した歩行制御アルゴリズムの有用性を確認するために、実機による実験を行った。まず始めに間欠クローラ歩容への収束実験を行った。5.3節のシミュレーションでその収束性を評価してあるが、これを実機に適用した結果を Fig.5-11 のグラフに示す。操縦型の制御方法であるが、この実験では収束性を確認するために、直進の速度指令を継続的に計算機から与えている。このグラフでの脚位置は、進行方向での位置である。実機による実験ではシミュレーションの場合とは異なり、制御誤差等により各脚の速度やストロークが微妙に異なる事態が生じるが、このアルゴリズムでは、ロバスト性を考慮しており、6[sec]過ぎあたりから間欠クローラ歩容に収束していることがわかる。

次に、実際に人間の操縦による歩行実験を行った。この時の様子を Fig.5-12 の写真に示す。この写真では、ロボットの本体に点灯したLEDを設置してあり、ロボットの移動軌跡がわかるようにしてある。操縦者は、ジョイスティックにより3自由度の速度指令を同時に与えることができ、ロボットの動きを見ながら操作をしている。この場合では、ロボットは右奥から旋回しながら手前に歩行してきたところである。この時の移動データを Fig.5-13 に示す。この図において、曲線が脚の運動から求めた移動経路を示しており、(0, 0) 地点が出発点である。また、曲線上の x マークは支

Title:  
fig10.eps  
Creator:  
Canvas 3.0  
Preview:  
この EPS 形式のファイルは、  
プレビュー付きで保存されていません。  
Comment:  
この EPS 形式の図は  
PostScript プリンタでのみ  
印刷できます。

Fig. 5-11 Experimental data of convergent algorithm

Title:  
fig11.eps  
Creator:  
CLARIS EPSF Export Filter V1.0  
Preview:  
この EPS 形式のファイルは、  
プレビュー付きで保存されていません。  
Comment:  
この EPS 形式の図は  
PostScript プリンタでのみ  
印刷できます。

Fig. 5-12 Walking experiment

持脚の切り替えが発生した地点であり、そこを中心とした円は支持脚切り替え時の不安定の度合を示している。具体的には、脚切り替え時の安定余裕（重心と支持脚三角形周囲との最短距離）の逆数を半径としている（その大きさは相対的なものであり、絶対的な大きさの意味はない）。この図からわかることは、ロボットが旋回している時は、一般的に支持脚の切り替え回数が多く、またその安定余裕も小さいことがわか



Fig. 5-13 Result of walking experiment

る。一方、後半になって直進が続くと、歩容が間欠クローリングに収束してゆき、脚切換えの間隔も揃ってきて安定余裕も大きくなっている。実際には、機構のガタや剛性不足の影響もあって、旋回時にバランスを失うこともあった。この原因としては、直進で間欠クローリング歩容に収束することを意識したアルゴリズムであるために、旋回時に必ずしも最善の対処行動を行っていないことが挙げられる。しかし、限界脚が発生した時のみにルールに従った対処動作を行うという単純なアルゴリズムで、操縦者の指令通りの方向、速度で歩行を続けることができ、かつ直進が続いた場合には、効率的な間欠クローリング歩容に収束してゆくことが可能であることが明らかとなった。

## 5.6 本章のまとめ

4脚歩行ロボットのための操縦型歩行制御の一手法を開発した。6脚移動ロボットでは比較的容易に実現できている操縦型の歩行制御であるが、4脚移動ロボットの場合は、安定性の確保のし難さや支持脚の切換えの条件の厳しさから、問題点が多かった。そのため従来の歩行制御手法では、予め移動経路が決めておき、これに沿って安定に重心移動できるように各脚の運動が決定されるものが中心であった。これに対し提案する手法では、移動のための動作を、重心推進動作と歩行継続対処動作とに分

け、重心推進動作中は操縦者から瞬時瞬時の移動速度を指令として移動を行うこととし、リアルタイム性の高い移動が可能となった。また、重心推進動作中は将来の脚軌道を想定することなく、可能である限り移動指令に従って推進動作を続ける。そして、可動限界に達した脚が発生した時点で初めて、前もって決められたルールに従った支持脚の切換えを行う。このような単純な方式で任意の方向への歩行を継続し、かつ、直進が続いた場合には効率的な間欠クロール歩容に収束してゆくという特徴を有している。この歩行制御方式は、実際の4脚ロボットに適用され、その有用性が実験的に示された。

## 第6章 脚移動ロボットのための制御システム

### 6.1 緒言

1960年代にロボットの制御にコンピュータが導入されて以来、コンピュータの発達に伴ってロボットの機能も向上してきた。しかしながら、現在のコンピュータが脚移動ロボットの制御にとってベストなものかという点、必ずしもそうではない。ロボットの制御システムは、単なる計算システムではなく、センサやアクチュエータ、そしてオペレータとの情報のやり取りが大きな役割となっている。従って、計算能力に優れたコンピュータが、良いロボット制御システムになるというわけではない。同じロボットと言っても、マニピュレータと移動ロボット、車輪型ロボットと脚型ロボットで制御システムに要求することが違ってくる可能性もある。また、研究現場で利用する制御システムと製品に組み込まれる制御システムでもその考え方も大きく変わり、当然違った仕様が課せられる。

本章では、脚移動ロボットに適した制御システムを考える[30]。機構や制御の面で、脚移動ロボットならではの特徴もあり、この特徴にあった制御システムを構築することが、ロボットの機能向上や、制御ソフトウェア開発の効率化をもたらす。また、研究用のロボットでは、研究の進捗に伴って処理する情報が多くなっていく場合が多い。この場合、制御システムを全く新しいものに変えてしまうということも考えられるが、過去の資産が無駄になってしまうといったデメリットもある。このような状況に対しても対応できる拡張性のある制御システムも有益である。本章では、第5章での実験に用いたロボットのための制御システムを検討する。

### 6.2 多脚移動ロボットの制御の特徴

一般にロボットは多数の自由度を持つ機械システムであり、この多数の自由度を協調的に動かすことにより、1つの目的のある動作を成し遂げる。従って、制御システムとしては、個々の自由度を制御（サーボ制御）する部分のほかに、これらを統括・調整する役割を持つ部分が必要となる。これは階層を持った制御システムということができ、脚移動ロボットでなくても階層構造は必要になる。脚移動ロボットの場合は、さらに多くの階層が必要なことは容易にわかる。各自由度の制御（関節制御）の上位には、脚ごとの運動の制御（脚制御）が必要になる。各脚が勝手に動いたのでは歩行が実現できないため、各脚の運動を統括・調整するレベルも必要となり、これが歩容制御である。さらに歩容を決定するためには、その上位で移動経路を決定するレベル

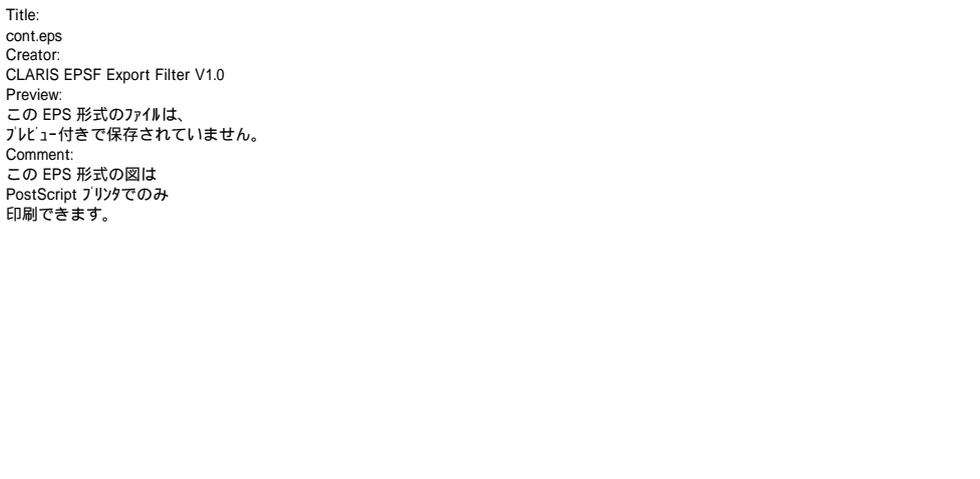


Fig. 6-1 Control system for a legged robot

の制御が必要になる。ざっと考えただけでもこれだけの階層が考えられ、さらに高度な機能を付加しようと考えれば、もっと多くの階層が考えられる。

脚移動ロボットでは、通常どの脚も同じ機構を採用している。これは機構面での脚移動ロボットの特徵で、他のロボットでは見られないものである。同一の機構ユニットが複数あるということは、その部分の制御プログラムは、パラメータ等が違うだけでほとんど同一であり、それぞれが並列的に機能することができる。このように考えると、脚移動ロボットの制御システムは、Fig.6-1 に示すような構造が適していると考えられる。全体としては階層構造を持つが、下位レベルの脚制御、関節制御は階層構造を持ちつつ、並列的に実行されるものである。

6 . 3 並列処理を用いた制御システム

Fig.6-1 に示したような構造を持つ制御システムを実現するために、トランスピュータと呼ばれるマイクロプロセッサを使用して制御系を構成した。トランスピュータとは、英国の inmos 社で開発された通信のためのリンクを持ったマイクロプロセッサである。これを使用した理由は、通信リンクを持っているため容易にマルチプロセッサシステムが構成でき、階層構造をハードウェアとして構成しやすいこと、および並列処理を容易に実現できるソフトウェアが用意されていることである。実際にトランスピュータを用いて何種類かの制御システムを構築して、ロボットの歩行制御を行って、その評価を試みた。制御する対象は、第 5 章の操縦型歩行制御の実験で用いた 4 脚を持ったロボットである。このロボットをプログラム制御で歩行させ、その時のサンプリングタイムを測定した。歩行のためのプログラムでは、サンプリングタイムご

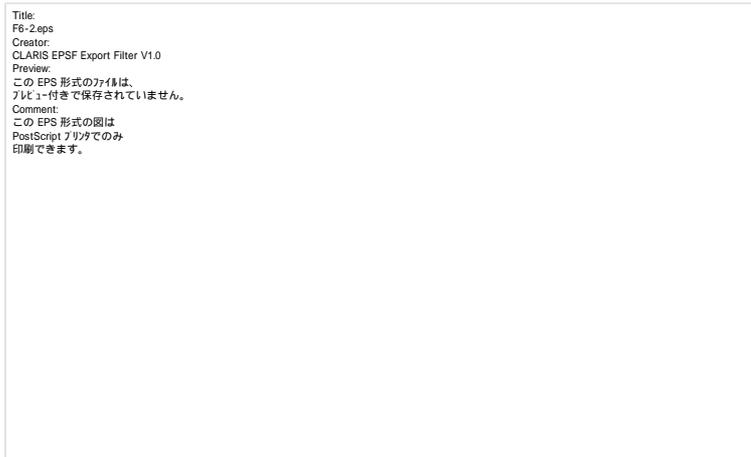


Fig. 6-2 Control system - 1

とに(5-9)式から(5-18)式で示される逆運動学計算、そして関節ごとのサーボ制御を行わなければならない。

最初に試したシステムを Fig.6-2 に示す。この図において、長円で示されたものはプロセスである。プロセスとは、並列的に実行される一まとまりのプログラムである。プロセス GC は歩容制御を表し、プロセス LC は脚制御と関節制御を含んでいる。この脚の運動を制御するためのプロセスのプログラムは、どの脚のものでもパラメータの数値が異なるだけで、あとは同一のものである。そのため、実質的には1つのプロセスのプログラムを開発するだけであり、並列化のメリットが出ている。このシステムでは、各脚の脚制御と関節制御を並列にするとともに、これを実行するためのトランスピュータも各脚に1つずつ割り当てている。上位の制御を T0 のトランスピュータ(32ビット)で行い、T1 から T4 のトランスピュータ(16ビット)にそれぞれ独立に A/D 変換器と D/A 変換器を持たせ、これで各脚の運動の制御を行う。歩容制御は本来上位の T0 で実行させるべきものであるが、トランスピュータの通信のためのリンクが1つにつき4本しか利用できないため、T1 上で実行させる形となった。この結果、T1 だけが2つのプロセスを持つことになり、他の脚との制御パフォーマンスの差が生じるようになった。具体的には、プロセッサの低い性能(16ビット、フローティング演算なし)も影響して、脚1のサンプリングタイムは35[msec]、他のサンプリングタイムが13[msec]という結果になった。ここで得られた知見は、同じ階層のマイクロプロセッサ間では、ロードを等しくすべきということである。

次に、Fig.6-3 に示すようなシステムを構成してみた。このシステムでは、通信のためのリンク数の制約にとらわれないように、4つの脚の運動のためのプロセスと歩

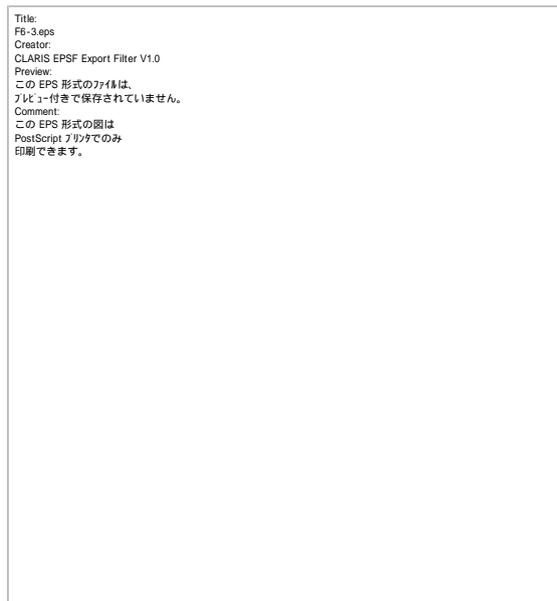


Fig. 6-3 Control system - 2

容制御のプロセスを1つの32ビットのトランスピュータ上で実行させるものである。同一のトランスピュータ上で実行されるプロセス間の通信リンクの数は制限されないため、このような構成が可能である。また、1個のマイクロプロセッサに1つの上位プロセス（歩容制御）と4つの脚制御プロセスがあるため、前の例のように、特定の脚制御プロセスにしわ寄せがいくことはない。ただこの場合、1つの問題が生じる。各脚の制御プロセスはそれぞれ並列的に独立して実行されるものの、1つのトランスピュータ上で実行されるため、インタフェースは共有される。特にA/D変換の場合に問題が起こる。複数のプロセスが並列で実行されるといっても、実際にはある時間ごとにプロセスを切り換えている。あるプロセスがA/D変換を開始し、それが終了する前にプロセスが切り換えられ、他のプロセスがA/D変換を始めようとした場合は、トランスピュータが暴走する危険がある。これを回避するために、A/D変換も一つのプロセスとして独立させ、複数のプロセスから同時にA/D変換を起動することを阻止することが必要となる。この結果、制御プログラムは複雑化することになる。このシステムでのサンプリングタイムは3.1[msec]であった。この他にも、A/D変換の競合を避ける方法として、セマフォを用いることもできる。この場合は、プログラムの複雑化は避けられるが、実行速度の低下が見られた。ここで得られた知見は、脚ごとにインタフェースも独立させた方が、単純なプログラムができることである。

これまでの2例から得られた知見をもとに、Fig.6-4に示すようなシステムを構成し、評価してみた。各脚ごとにインタフェースを独立させるために、最下位レベルに



Fig. 6-4 Control system - 3

4つのトランスピュータを配した。これらは、Fig.6-2のシステムで利用したものである。これらのトランスピュータは、前述のようにあまり性能が高くないため、このシステムでは、インタフェースドライバだけを塔載し、実行させることにした。この上位には、32ビットのトランスピュータ2個を配置し、脚の制御のプロセスを1個につき2つつつ実行させることにした。この上位に歩容制御のプロセスが必要になるが、これはさらに上位のトランスピュータT0で実行させる。T0はホストコンピュータとの通信も必要のため、T1、T2にある4つのプロセスと直接リンクで接続することはできない。そこで、T1およびT2にデータ転送のためのプロセスDTが必要となった。この構成で、競合の問題からは開放されたが、リンク数の制約から、上位のトランスピュータの数が多くなった。このシステムでのサンプリングタイムは0.8[msec]であった。

以上は、制御系の構成を評価するために、プログラム制御で歩行を行わせることだけを行った。しかし、実際のロボットはさまざまなセンサを搭載しており、そのためのインタフェースも必要である。さらには、このロボットは、3自由度のマニピュレータも搭載できるため、そのための制御装置も用意しなければならない。それで、Fig.6-4の制御システムをもとに、さまざまなセンサや塔載したマニピュレータの制御をも含めた制御系へと拡張した。この拡張した全体の制御システムをFig.6-5に示す。脚の制御だけが目的の時は、7個のマイクロプロセッサからなるシステムであったが、これが15個のマイクロプロセッサを含むシステムに増殖している。これからわかるように、ここで考えた制御システムは、拡張性にも優れていることがわかる。

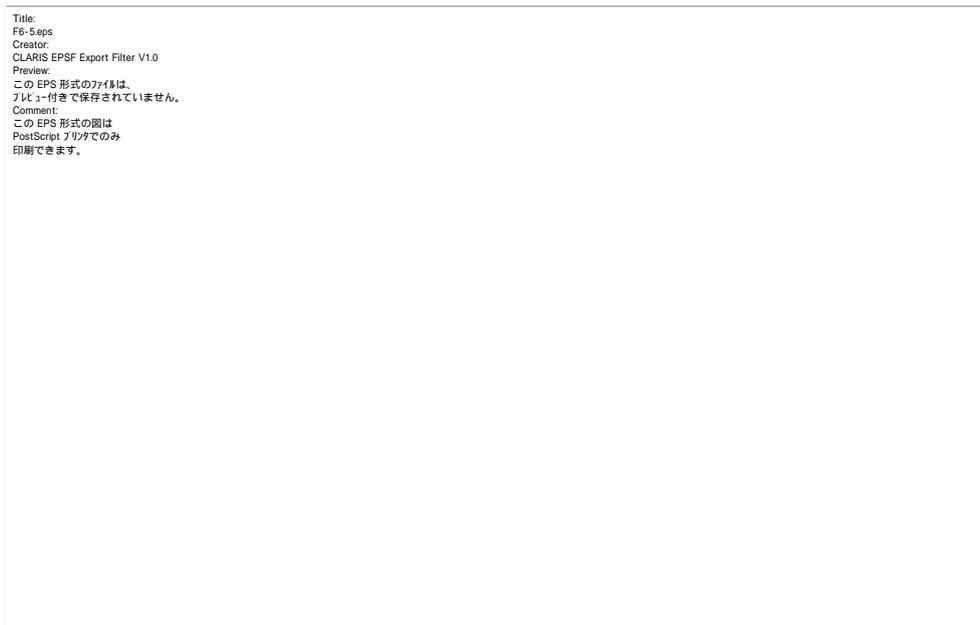


Fig.6-5 Total control system

#### 6.4 本章のまとめ

本章では、脚移動ロボットのための制御システムに対する考察を行い、それをもとに制御システムを構築した。ロボットは一般的に多くの自由度を持っていて、これらの協調により、ある目的を持った動作を行う。そのため、少なくとも動作レベルと各自由度の制御のレベルとを持った制御系が必要になる。脚移動ロボットの場合は、関節レベル、脚レベル、歩容レベル、移動経路レベル、とさらに多くの階層を持った制御システムが便利である。また、脚移動ロボットの機構上の特徴は、脚という同一の機械システムが複数存在することである。そのため、脚の制御のレベルは並列的に独立に行えるほうが有利である。

このような考察をもとに、トランスペュータと呼ばれるマイクロプロセッサを用いて並列処理を用いた制御系を構成し、実際のロボットの歩行制御を試みた。3種類の構造の制御システムを評価した結果、以下のことが明らかとなった。同一レベルのマイクロプロセッサ間ではその負荷をできるだけ等しくする必要があること、並列プログラミングを採用する際には、インタフェースも独立させた方が単純なプログラミングに寄与する、ということである。実際に並列処理のプログラミングでは、1脚分のプログラムを開発するだけで、あとは他の脚に簡単に移植できるということから、プログラム開発の効率化が実現できた。また、当初は4脚のプログラム制御だけを目的

に構成していた制御システムであったが、ロボットの外界センサや、搭載するマニピュレータをも含めた制御を行うシステムに容易に拡張することができた。これは、トランスピュータのもつ通信機能により、容易にプロセッサの数が増やせることに起因している。反面、システムが大規模になっていき、データのやり取りが複雑になるといった点も見られた。

## 第7章 結論

### 7.1 本研究の成果

#### 7.1.1 周期的歩容解析に関する成果

本研究では、4脚移動ロボットのための歩容について考察を行った。脚移動ロボットの機構を製作しても、適切な脚の運動を生成しなければ、ロボットは移動することができない。そのため歩容の問題は、脚移動ロボットのソフト面での研究の柱である。歩容の問題で、最も基本となるのは周期的歩容である。一般には移動時の状況に応じて、脚の運びをその都度決定する必要があるが、単純な環境においては、同じ脚の運動を繰り返す周期的歩容で移動することが可能である。平坦な環境を直進するための周期的歩容は、比較的古くから研究されてきており、15個のパラメータにより歩容が規定されることが知られていた。本研究では、実際に歩行ロボットに適用することを前提に、合理的で現実的な条件を課すことにより、単純な解析法を考案した。ここで課した条件とは、各脚で均等にロボット本体を支持すること(レギュラーな歩容、対称配置の歩容)、そして左右の両側で条件を同じにすること(両側対称な歩容)である。このことにより、15個必要であったパラメータは、デューティファクタと位相差という2つのパラメータに減らされた。この2つのパラメータを用いて、静的歩行および動的歩行のための最適な歩容を導出した。静的歩行のための歩容は、過去の研究の結果とは異なるものではなかったが、動的歩行のための歩容は、従来の研究とは異なった歩容を生み出した。従来の4脚動的歩行の歩容は、2脚を一組として扱うものが中心であり、4脚支持期と2脚支持期を持つものであったのに対し、本研究での歩容は、なるべく2脚支持期を短くしようとするものであり、3脚支持期と2脚支持期を持つものになった。導出された歩容は、実際のロボットにより実験的に検証され、継続的な移動ができることが確認された。

#### 7.1.2 適応歩容に関する成果

脚移動ロボットが、その高い移動能力を発揮するためには、移動環境に応じて脚の運動を変えることのできる適応歩容が必要となる。本研究での適応する対象は、ロボット自身の重心位置の場合と移動面の傾斜の場合とが考えられた。ロボットの重心位置が、その幾何学的中心からずれている場合は、通常の周期的歩容では、バランスを失って歩行が継続できなくなることがある。傾斜面を歩行する場合もまた同様である。安定性を保って移動を継続するためには、これらの歩行条件に応じて歩容を変える必

要がある。本研究では、これらの歩行条件の検出のために、比較的手軽に利用できる力センサを利用し、これを各脚に設置した。そして用いる歩容は、間欠クロール歩容という周期的歩容をベースとし、この歩容の4脚支持・推進期間を可変とする手法を採用した。これにより、各脚の支持推進動作と復帰動作からなる往復運動の位置を変えることができる。この脚の運動位置を変えることによって、ロボットの重心位置の変動や、斜面上での歩行に対応することができた。4脚支持・推進動作の長さの決定に、脚にかかる荷重データを利用した。考案された適応歩容は、実際に4脚歩行ロボットに適用され、実験を通してその有効性が検証された。ロボットが前部もしくは後部に荷重を持っている状態で実験を行ったが、通常の間欠クロール歩容ではバランスを崩し移動ができなかったのに対し、提案された適応歩容では、歩行が継続できた。また、傾斜面の場合も、通常の間欠クロール歩容で移動できない状況下でも、安定した歩行を実現した。

#### 7.1.3 操縦型歩行制御に関する成果

移動ロボットとして有効的に機能するための要件の一つとして、状況に応じて進路を随時変更できることが挙げられる。そのために、4脚歩行ロボットのための操縦型歩行制御の一手法を考案した。4脚移動ロボットでは、安定性の確保のし難さや支持脚の切換えの条件の厳しさから、リアルタイムでロボットの移動方向や速度を制御することは難しかった。そのため従来の歩行制御手法では、予め移動経路を決めておき、これに沿って安定に重心移動できるように各脚の運動が決定されるものが多かった。これに対して提案する手法では、移動のための動作を、重心推進動作と歩行継続対処動作とに分け、重心推進動作中は操縦者から瞬時瞬時の移動速度を指令として移動を行うこととし、リアルタイム性の高い移動が可能となった。また、重心推進動作中は将来の脚軌道を想定することなく推進動作を続け、可動限界に達した脚が発生した時に、前もって決められたルールに従った支持脚の切換えを行う。このような単純な方式で任意の方向への歩行を継続し、かつ、直進が続いた場合には効率的な間欠クロール歩容に収束してゆくという特徴を持たせることに成功した。この歩行制御方式は、実際の4脚ロボットに適用され、その有用性が確認された。

#### 7.1.4 脚移動ロボットの制御システムに関する成果

ロボットの制御に関するアルゴリズムを開発しても、それを実効あるものとするためには、実機のロボットにインプリメントする必要がある。このインプリメントに要

する労力は、ロボットの制御システムに大きく影響される。そこで、脚移動ロボットに適した制御システムに関する考察を行った。脚移動ロボットは一般的に多くの自由度を持っていて、これらの協調により移動というミッションを遂行する。この各自由度とミッションの間には、関節レベル、脚レベル、歩容レベル、移動経路レベル、と多くの制御レベルがある。そのため、脚移動ロボットの制御システムは、階層構造を持つことによるメリットが大きい。また、脚移動ロボットの機構上の特徴は、脚という同一の機械システムが複数存在することである。そのため、脚の制御のレベルは並列的に独立に行えるほうが有利である。そこで、トランスペュータと呼ばれるマイクロプロセッサを用いて、階層構造を持ち、かつ下位レベルでは並列構造を持つ制御系を構成し、実際のロボットの歩行のための制御プログラムを開発した。並列構造を持つことにより、1脚分のプログラムを開発するだけで、あとは他の脚に簡単に移植できるというメリットが生まれた。また、トランスペュータが通信機能を持っているため、ロボットハードウェアの機能追加に対して、プロセッサの数を増やして機能を拡張することが容易にできることを確認した。

#### 7.1.5 リアルロボティクスとしての成果

本研究は、リアルロボティクスを目標として進めた。実際のロボットに適用して実現できる歩容生成アルゴリズム、制御システムの開発を目指した。そのため、現在利用できる資産を前提としてアルゴリズムやシステムの構築を行い、信頼性が高く実現しやすい手法を採用した。より普遍性、完成度を高くするために、理論を中心として体系を整える研究手法もあるだろうが、実際に物を動かして見えてくるものもあるはずである。

周期的歩容の解析では、現実的な条件を考慮することにより、解析のためのパラメータを減らし、より単純な解析法を提案した。そして動的歩行実験では、デューティファクタの値に対して、不安定期間が最も短くなるような歩容を採用することによって、動的歩行を実現した。また、適応歩容に関しては、従来手法が環境情報が既知であるという仮定を前提としているのに対し、本研究では環境情報を取得するところから出発した。地面の傾斜に対応する歩容では、直接地面の傾斜を測定することはせず、脚にかかる力情報を利用した。地面の傾斜から安定性を判断するためには、ロボットの幾何学的データを利用する必要があり、モデリング誤差等の影響も受ける。またロボットが動いていることに起因する外乱の影響もある。それに対し、力情報を利用することは、地面の傾斜やモデリング誤差、外乱等を全て含んだデータが得られ、

より信頼性の高い制御が可能となった。ロボットの操縦型歩行制御では、移動中はいつでも進路変更ができることを課題とした。従来の手法と大きく異なる点は、基準となる歩容を想定して移動するのではなく、現在の状態で胴体を推進できれば推進し、いずれかの脚が可動限界に達した時に初めて脚の踏み替えを行うという単純なアルゴリズムを採用したことである。制御システムに関しては、階層構造を持つことが有利であることは周知の事実であるが、それに加えて分散・並列処理が可能なシステムを構築した。さらにセンサ等の機能拡張に対して柔軟なシステムとなるように、マルチ・プロセッサ構成とし、ロボットの資産の増加とともにプロセッサの数を増やすことも可能なシステムを構築した。実際に、5つのマイクロ・プロセッサで構成されていた制御システムが、資産の増加に伴い、最終的には15個のマイクロ・プロセッサからなるシステムに増殖した。

本研究の課題は実際に検証できる歩行ロボット制御手法の開発であった。実際に検証して初めて見えてくるものもある。実際に検証できるように、単純化したモデルでの解析が行われることもあったが、実際のロボットにおいて機能することでその手法の妥当性が示された。そして適切な理論、高いロバスト性、高い信頼性を持った制御アルゴリズム、システムが構築された。本研究の成果は、必ずしも完成されたものではないかもしれないが、実際のロボットで実現できた成果であり、またここから次の課題が生まれてくるものである。

## 7.2 残された課題

本研究において、4脚ロボットの歩容に関して基礎的な実現可能な制御手法が示された。脚移動ロボットの実用化のためには、まだ解決すべき問題も残されている。まず第1に考えられるべき問題は、不整地への対応である。脚移動ロボットの導入が期待されている環境は、車輪やクローラでは移動できない不整地である。このような環境で移動して初めて、脚移動ロボットの存在意義が生じる。不整地移動で問題となるのは、脚の着地点の選択である。複雑な地形や不安定な足場の中から、継続的な移動を可能とするような脚の着地点をどのように探索するかは、大きな問題である。またこれに関連して、着地しようとする場所が着地点として適当かどうかの判断のためのセンシング技術も重要である。レンジセンサや画像を利用して、足場を選択することも考えられているが、形状的な情報だけでは不十分であり、どのくらいの荷重に絶えうるか、どの程度変形するか、滑りやすさはどうか、など質的な情報も必要となる。このようなセンシング技術を含めて不整地歩行は考えられなければならない。また、

不整地の範疇には入らないかもしれないが、球面や円錐面等の曲面上での移動も考えられるべきである。脚移動ロボットでは移動面の形状にとらわれなくて、ロボット本体の姿勢を維持することができるため、このような環境では重心移動のみではなく、姿勢も考慮した歩行方法の開発が望まれる。さらに、エネルギー問題も解決すべき問題である。現在研究中の脚移動ロボットのほとんどは、エネルギー源をロボット外部に置いている。そのため、ロボットはエネルギーを供給するためのケーブルを引きずることになる。移動ロボットは、本来自由に動き回ることが必要であり、そのためにはケーブルフリーである必要がある。地味な問題であるが、脚移動ロボットはそれほどエネルギー効率が良くないため、自立化のための技術開発も重要である。この他にも、ロボット工学の範囲から外れるかもしれないが、材料、アクチュエータ、センサなど、他分野の技術革新も望まれるところである。

### 7.3 本研究のまとめ

本研究では、4脚移動ロボットの歩容についての考察を行った。始めに、単純な環境で直進をする場合の周期的歩容の解析を行った。周期的歩容を定義するためには15のパラメータが必要であるが、これに現実的な条件を課すことにより、2つのパラメータで解析することが可能となった。この手法を用いて、静的歩行、動的歩行それぞれについての最適歩容を求めた。また、移動環境に適応する歩容についての考察も行った。ロボットの重心位置変動や移動面の傾斜に応じて歩容を変える制御アルゴリズムを考案した。この適応歩容アルゴリズムは、環境条件を脚に設置された力センサにより検出するものであり、実際に歩行ロボットに適用してその有効性が確認された。さらに、4脚移動ロボットの操縦型歩行制御手法について検討を行った。歩行ロボットの現実的な歩行制御手法として、人間による操縦が考えられる。本研究では、歩行のための動作を重心推進動作と、移動継続対処動作に分離し、重心推進動作中の移動速度を直接オペレータが指示する手法を開発した。最後に、脚移動ロボットの制御システムについて論じた。脚移動ロボットの機能とメカニズムに着目し、階層構造と並列構造を持ち合わせた制御システムを提案するとともに、実際に、これを構成して脚移動ロボットの制御に利用した。

我が国は、自然災害の多い国であり、毎年のように被害を受けている。地震、噴火、土砂崩れ、土石流等で多くの被害者を出している。これらの災害が発生した場合は、素早く救助作業や復旧作業が必要となるが、現実には二次災害の危険からなかなかできないのが現状である。そしてこれらの災害地の多くは、足場の不安定な不整地であ

る。このような時、自律移動、もしくは遠隔操作された脚移動ロボットたちがいち早く出動し、救助作業、復旧作業を行う。早くこのような光景を目にしたいものである。

## 謝辞

本論文の作成にあたり、暖かいご指導とご激励を賜りました、筑波大学電子・情報工学系 油田信一教授に深い感謝の意を表します。また、本研究をまとめる段階で広い範囲に渡って有益なご助言を数多く賜りました筑波大学構造工学系 太田道男教授、筑波大学電子・情報工学系 宮本定明教授、東京電機大学工学部電子工学科 柿倉正義教授、大阪大学大学院基礎工学研究科 新井健生教授に厚くお礼申し上げます。

更に、本研究の遂行ならびにまとめにあたって、絶えずご指導、ご声援を賜りました機械技術研究所ロボット工学部自律制御研究室 小谷内範穂室長に心から感謝の意を表します。また、本研究を遂行する上で暖かいご激励とご支援をいただいた機械技術研究所ロボット工学部 谷江和雄部長、岐阜県科学技術振興センター 野崎武敏所長（前機械技術研究所ロボット工学部長）、東京都立大学大学院工学研究科 中村達也教授（元機械技術研究所ロボット工学部自律制御課長）、東北大学大学院情報科学研究科 中野栄二教授（元機械技術研究所自律機械課長）に厚くお礼申し上げます。そして本研究を遂行するために数多く議論していただいた歴代の機械技術研究所ロボット工学課、自律機械課、自律制御課、自律制御研究室のメンバーの諸氏に感謝申し上げます。さらには、研究を進める上での実験でお手伝いを頂いた日清紡績（株） 西村賢一郎、篠原善裕の両氏にも感謝申し上げます。

最後に、研究を続ける上で精神的な支えとなってくれた家族に感謝します。

## 参考文献

- [1] Muybridge, E. , “Animals in Motion,” New York: Dover Publications, 1957, First edition, Chapman and Hall, Ltd., London, 1899.
- [2] Raibert , M . H., “Legged Robots That Balance,” The MIT Press, 1986.
- [3] Mosher, R. S., “Test and Evaluation of a Walking Truck,” In Cornell Aeronautical Lab / ISTVS Off-road Mobility Research Symposium, June 1968.
- [4] McGhee, R. B., “Robot locomotion,” In Neural Control of Locomotion, Plenum, 1976, pp.237-264.
- [5] Todd, D. J., “Walking Machines,” Kogan Press, 1985.
- [6] McGhee, R. B. and Iswandhi, G. I., “Adaptive Locomotion of a Multilegged Robot over Rough Terrain,” IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.SMC-9, No.4, 1979, pp.176-182.
- [7] 広瀬, 梅谷, “ 4 足歩行機械の基本的運動調整系の構成と歩行実験 ,” 計測自動制御学会論文集, 第 16 卷, 第 5 号, 1980, pp.747-753 .
- [8] Waldron, K. J., and McGhee, R. B., “The Adaptive Suspension Vehicle,” IEEE Control Systems Magazine, December 1988, pp.7-12.
- [9] Bares, J. E., and Whittaker, W. L., “Walking Robot With A Circulating Gait,” Proc.of the Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, 1990, pp.809-816.
- [10] Hartikainen, K. K., Lehtinen, H., Halme, A. J., and Koskinen, K. O., “Control and Software Structures of a Hydraulic Six-Legged Machine Designed for Locomotion in Natural Environment,” Proc of the 1992 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS '92), 1992, pp.590-596.
- [11] McGhee, R. B., and Frank, A. A., “On the Stability Properties of Quadruped Creeping Gaits,” Mathematical Biosciences 3, 1968, pp.331-351.
- [12] 木村, 下山, 三浦, “ 四足動歩行ロボットの力学的解析 ,” 日本ロボット学会誌, 第 6 卷, 第 5 号, 1988, pp.367-378 .
- [13] Klein, C. A., and Briggs, R. L., “Use of active Compliance in the Control of Legged Vehicle,” IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-10, No. 7, 1980, pp.393-400.
- [14] McGhee, R. B., and Iswandhi, G. I., “Adaptive Locomotion of a Multilegged Robot over Rough Terrain,” IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-9, No. 4, 1979, pp.176-182.
- [15] 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, 第 18 卷, 第 2 号, 1982, pp.193-200.
- [16] Lee, W-J., and Orin, D. E., “The Kinematics of Motion Planning for Multilegged Vehicle Over Uneven Terrain,” IEEE J. of Robotics and automation, Vol. 4, No. 2, 1988, pp204-212.
- [17] 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, 第 25 卷, 第 4 号, 1989, pp.455-461 .
- [18] Orin, D. E., “Supervisory Control of a Multilegged Robot,” Int. J. of Robotics Research, Vol. 1, No. 1, 1982, pp.79-91

- [19] 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, 第3巻, 第4号, 1985, pp.304-323.
- [20] Qiu, X-D., and Song, S., “A Strategy of Wave Gait for a Walking Machine Traversing a Rough Planar Terrain,” Trans. of the ASME, J. of Mechanism, Transmissions, and Automation in Design, Vol.111, 1989, pp.471-478.
- [21] Lee, T-T., and Shih, C-L., “A Study of the Gait Control of a Quadruped Walking Vehicle,” IEEE J. of Robotics and Automation, Vol. RA-2, No. 2, 1986, pp.61-69.
- [22] Lee, W-J., and Orin, D. E., “The Kinematics of Motion Planning for Multilegged Vehicle Over Uneven Terrain,” IEEE J. of Robotics and automation, Vol. 4, No. 2, 1988, pp.204-212.
- [23] Choi, B. S., and Song, S. M., “Fully Automated Obstacle-Crossing Gaits for Walking Machines,” IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 18, No. 6, 1988, pp.952-964.
- [24] 梶田, 小林, “位置エネルギー保存形軌道を規範とする動的2足歩行の制御,” 計測自動制御学会論文集, 第23巻, 第3号, 1987, pp.281-287.
- [25] 佐野, “脚式移動ロボットにおける動歩行制御に関する研究,” 名古屋大学学位論文, 1992.
- [26] 木村, “四足歩行ロボットの動歩行における力学と制御,” 東京大学学位論文, 1987.
- [27] Adachi, H., Koyachi, N., and Nakano, E., “Mechanism and Control of a Quadruped Walking Robot,” IEEE Control System Magazine, Vol. 8, No. 5, 1988, pp.14-19.
- [28] 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, 第9巻, 第6号, 1991, pp.707-717.
- [29] 安達, 小谷内, 新井, 本間, 篠原, 西村, “可動限界到達時の脚踏み換えルールに基づく4脚ロボットの操縦型歩行制御,” 日本ロボット学会誌, 第16巻, 第3号, 1998, pp.329-336.
- [30] Adachi, H., Homma, K., Arai, T., “Control of a Quadruped Walking Robot Using Parallel Programming,” Proc. of the 6th Transputer/Occum Int. Conf., 1994, pp.231-237.
- [31] Adachi, H., Koyachi, N., and Nakano, E., “Mechanism and Control of the Quadruped Walking Robot,” Proc. of the Int. Conf. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation '87 (IECON'87), 1987, pp.630-635.
- [32] Adachi, H., Koyachi, N., Nakamura, T., and Nakano, E., “Development of a Quadruped Walking Machine and Its Adaptive Crawl Gait,” Proc. of the Japan-U.S.A. Symp. on Flexible Automation, 1990, pp.91-94.
- [33] Adachi, H., Koyachi, N., Nakamura, T., and Nakano, E., “Gait Analysis of a Quadruped Walking Robot,” Proc. of the '91 Int. Symp. on Advanced Robot Technology ('91 ISART), 1991, pp.397-402.
- [34] Adachi, H., Arai, T., Homma, K., Nakamura, T., and Yoshinada, H., “Study on Underground space Excavating Machine,” Proc. of the 9th Int. Symp. on Automation and Robotics in Construction, 1992, pp.751-758.
- [35] 安達, 小谷内, 中村, 中野, “4脚移動ロボットの開発とその歩容の検討,” 機械技術研究所所報, Vol.46, No.2, 1992, pp.113-127.

- [36] Adachi, H., Koyachi, N., Nakamura, T., and Nakano, E., "Adaptive Gait for Quadruped Walking Robot Using Force sensor," Proc. of the 3rd Int. Conf. on Intelligent Autonomous System, 1993, pp.54-63.
- [37] Adachi, H., Koyachi, N., Nakamura, T., and Nakano, E., "Development of Quadruped Walking Robots and Their Gait study," J. of Robotics and Mechatronics, Vol. 5, No. 6, 1993, pp.548-560.
- [38] Adachi, H., Arai, T., Koyachi, N., and Homma, K., "Six Degrees of Freedom Position and Posture Control for a Quadruped Robot," Proc. of the IFAC Conf. on Intelligent Autonomous Vehicle, 1995, pp.133-138.
- [39] Adachi, H., Arai, T., Koyachi, N., Homma, K., and Nishimura, K., "Development of a Mobile Manipulator for Underground Excavation Task," Proc. of the 13th Int. Symp. on Automation and Robotics in Construction, 1996, pp.73-80.
- [40] Adachi, H., Koyachi, N., Arai, T., and Nishimura, K., "Control of a Manipulator Mounted on a Quadruped," Proc. of the Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS '96), 1996, pp.883-888.
- [41] Adachi, H., Koyachi, N., Arai, T., and Shinohara, Y., "Human-Operated Walking Control of a Quadruped by Event-Driven Method," Proc. of the Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS '97), 1997, pp.260-265.
- [42] Simmons, R. G., "Monitoring and Error Recovery for Autonomous Walking," Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 1992, pp.1407-1412.
- [43] Wettergreen, D., and Thorpe, C., "Gait Generation for Legged Robots," Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 1992, pp.1413-1420.
- [44] Hoffman, R., and Krotkov, E., "Terrain Mapping for Long-Duration autonomous Walking," Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 1992, pp.563-568
- [45] Waldron, K. J., et al., "Configuration Design of the Adaptive Suspension Vehicle," Int. J. of Robotics Research, Vol. 3, No.2, 1984, pp.37-48.
- [46] Bares, J. E., and Whittaker, W. L., "Configuration of Autonomous Walkers for Extreme Terrain," Int. J. of Robotics Research, Vol. 12, No. 6, 1993, pp.535-559.
- [47] Simmons, R. G., et al., "Progress Towards Robotic Exploration of Extreme Terrain," J. of Applied intelligence 2, 1992, pp.163-180.
- [48] Russel, M., "ODEX I: The First Functionoid," Robotics Age, Vol. 5, No. 5, 1983, pp.12-18.
- [49] Gurfinkel, V. S., et al., "Walking Robot with Supervisory Control," Mechanism and machine Theory, Vol.16, 1981, pp.31-36.
- [50] 田口, 池田, 野崎, 松本, "4足移動機械と歩行方法," バイオメカニクス 2, 1973, pp. 154-163.
- [51] 池田, 谷田部, 松本, 光岡, "4足移動機械の有限状態制御," バイオメカニクス 2, 1973, pp. 164-172.
- [52] Mcghee, R. B., et al., "A Hierarchically Structured System for Computer Control of a Hexapod Walking Machine," Theory and Practice of Robots and Manipulators, Proc. of ROMANSY-84

- Synposium, 1984, pp.375-381.
- [53] Song, S. M., and Waldron, K. J., "Geometric design of a Walking Machine for Optimal Mobility," Trans.of the ASME, J. of Mechanism, Transmissions, and Automation in Design, Vol.109, 1987, pp.21-28.
- [54] 広瀬 横井, "4足歩行機械の踏み換え歩容に関する研究," 日本ロボット学会誌, 第4巻, 第4号, 1986, pp.364-373.
- [55] 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, 第2巻, 第6号, 1986, pp.545-556.
- [56] 小谷内, 安達, 中村, 中野, "階段登降のための自立形6脚歩行ロボットの設計と制御," 日本ロボット学会誌, 第11巻, 第6号, 1993, pp.918-928.
- [57] 小谷内, 安達, 新井, "脚・腕統合リムメカニズム - 腕転用脚機構の運動解析 - ," 日本ロボット学会誌, 第14巻, 第7号, 1996, pp.968-976.
- [58] 佐野, 古荘, "疑似角運動量に基づく動的4足歩行の解析," 計測自動制御学会論文集, 第24巻, 第12号, 1988, pp.1299-1305.
- [59] 佐野, 古荘, "点支持型四足歩行ロボットの三次元動的制御に関する実験的研究," 日本機械学会論文集 (C編), 55巻 520号, 1989, pp.3014-3021.
- [60] 木村, 下山, 三浦, "四足歩行ロボットの力学と制御 (複数脚接地によって生じる制御入力冗長性を利用した動歩行)," 日本機械学会論文集 (C編), 55巻 517号, 1989, pp.2396-2403.
- [61] Bares, J., "Ambler: An Autonomous Rover for Planetary Exploration," IEEE Computer, June, 1989, pp.18-26.
- [62] Raibert, M. H., "Trotting, Pacing and Bounding by a quadruped Robot," J. of Biomechanics, Vol. 23, Suppl. 1, 1990, pp.79-98.
- [63] Kau, C.-C., et al., "Design and Implementation of a Vision Processing System for a Walking Machine," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 36, No. 1, 1989, pp.25-33.
- [64] Song, S.-M., and Waldron, K. J., "An Analytical Approach for a Gait Study and Its Application on Wave Gaits," Int. J. of Robotics Research, Vol. 6, No. 2, 1987, pp.60-71.
- [65] Zhang, C.-d., and Song, S.-M., "Stability Analysis of Wave-Crab Gaits of a quadruped," J. of Robotic Systems, Vol. 7, No. 2, 1990, p.243-276.
- [66] Okhotsimsky, D. E., et al., "Walking Machines," Advances in Mechanics, Vol. 15, No. 1-2, 1992, pp.39-70.
- [67] Lee, J.-K., Song, S.-M., "Path Planning and Gait of Walking Machine in an Obstacle-Strewn Environment," J. of Robotic systems, Vol. 8, No. 6, 1991, pp.801-827.
- [68] Simmons, R., "Concurrent Planning and Execution for Autonomous Robots," IEEE Control Systems, Feb. 1992, pp.46-50.
- [69] Lee, W.-J., and Orin, D. E., "Omnidirectional Supervisory Control of a Multilegged Vehicle Using Periodic Gaits," IEEE J. of Robotics and Automation, Vol. 4, No. 6, 1988, pp.635-636.
- [70] Klein, C. A., et al., "Use of Force and Attitude Sensors for Locomotion of a Legged Vehicle over

- Irregular Terrain,” *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 2, No. 2, 1983, pp.3-17.
- [71] Messuri, D. A., Klein, C. A., “Automatic Body Regulation for Maintaining Stability of a Legged Vehicle During Rough-Terrain Locomotion,” *IEEE J. of Robotics and Automation*, Vol. 1, No. 3, 1985, pp.132-140.
- [72] Song, S.-M., and Choi, B. S., “The Optimally Stable Ranges of 2n-Legged Wave Gaits,” *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 20, No. 4, 1990, pp.888-902.
- [73] Kumar, V. R., and Waldron, K. J., “Adaptive Gait Control for a Walking Robot,” *J. of Robotic Systems*, Vol. 6, No. 1, 1989, pp.49-76.
- [74] [特集] 歩行ロボット, 日本ロボット学会誌, 第11巻, 第3号, 1993, pp.305-394.

## 研究業績

### 発表論文

1. Adachi, H., Koyachi, N., and Nakano, E., "Mechanism and Control of the Quadruped Walking Robot," Proc. of the International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation '87 (IECON'87), pp.630-635, November, 1987.
2. Adachi, H., Koyachi, N., and Nakano, E., "Mechanism and Control of a Quadruped Walking robot," IEEE Control System Magazine, Vol.8, No.5, pp.14-19, October 1988.
3. Adachi, H., Koyachi, N., Nakamura, T., and Nakano, E., "Development of a Quadruped Walking Machine and Its Adaptive Crawl Gait," Proc. of the Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, pp.91-94, July, 1990.
4. Adachi, H., Koyachi, N., Nakamura, T., and Nakano, E., "Gait Analysis of a Quadruped Walking Robot," Proc. of the '91 International Symposium on Advanced Robot Technology ('91 ISART), pp.397-402, March, 1991.
5. 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, 第9巻, 第6号, pp.707-717, 1991年11月.
6. 安達, 小谷内, 中村, 中野, "4脚移動ロボットの開発とその歩容の検討," 機械技術研究所報, 第46巻, 第2号, pp.113-127, 1992年3月.
7. Adachi, H., Arai, T., Homma, K., Nakamura, T., and Yoshinada, H., "Study on Underground space Excavating Machine," Proc. of the 9th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp.751-758, June, 1992.
8. Adachi, H., Koyachi, N., Nakamura, T., and Nakano, E., "Adaptive Gait for Quadruped Walking Robot Using Force sensor," Proc. of the 3rd International Conference on Intelligent Autonomous System, pp.54-63, February, 1993.
9. Adachi, H., Koyachi, N., Nakamura, T., and Nakano, E., "Development of Quadruped Walking Robots and Their Gait study," J. of Robotics and Mechatronics, Vol. 5, No. 6, pp.548-560, December, 1993.
10. Adachi, H., Homma, K., and Arai, T., "Control of a Quadruped Walking Robot Using Parallel Programming," Proc. of the 6th Transputer/Occum International Conference, pp.231-237, June, 1994.
11. Adachi, H., Arai, T., Koyachi, N., and Homma, K., "Six Degrees of Freedom Position and Posture Control for a Quadruped Robot," Proc. of the IFAC Conference on Intelligent Autonomous Vehicle, pp.133-138, June, 1995.
12. Adachi, H., Arai, T., Koyachi, N., Homma, K., and Nishimura, K., "Development of a Mobile Manipulator for Underground Excavation Task," Proc. of the 13th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp.73-80, June, 1996.
13. Adachi, H., Koyachi, N., Arai, T., and Nishimura, K., "Control of a Manipulator Mounted on a Quadruped," Proc. of the International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '96),

pp.883-888, November, 1996.

14. Adachi, H., Koyachi, N., Arai, T., and Shinohara, Y., "Human-Operated Walking Control of a Quadruped by Event-Driven Method," Proc. of the International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '97), pp.260-265, September, 1997.
15. 安達弘典, 小谷内範穂, 新井健生, 本間敬子, 篠原善裕, 西村賢一郎, "可動限界到達時の脚踏み換えルールに基づく4脚ロボットの操縦型歩行制御," 日本ロボット学会誌, 第16巻, 第3号, pp.329-336, 1998年4月.
16. Adachi, H., Koyachi, N., Arai, T., and Halme, A., "Development of a Leg-Wheel Hybrid Mobile Robot "Walk'n Roll"," Proc. of the 2nd International Conference on Machine automation, pp.145-154, September, 1998.

#### 口頭発表

1. 安達, 小谷内, 中野, "固定歩容形6脚移動ロボットの階段登降歩容," 第2回日本ロボット学会学術講演会, 1984年11月.
2. 安達, 小谷内, 中野, "固定歩容形6脚移動ロボットの階段登降歩容(第2報)," 第3回日本ロボット学会学術講演会, 1985年11月.
3. 安達, 中野, 小谷内, "四脚歩行ロボット「かめ1号」の機構と制御 第2報 準動的歩行の適用," 第4回日本ロボット学会学術講演会, 1986年12月.
4. 安達, 小谷内, 中野, "自由歩容形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, 1988年6月.
5. 安達, 小谷内, 中野, "自由歩容形4脚歩行ロボットの開発(第2報) 3自由度脚モデルの試作," 第6回日本ロボット学会学術講演会, 1988年10月.
6. 安達, 小谷内, 中村, 新井, 本間, 中野, "自由歩容形4脚移動ロボットの開発 第3報 重心位置適応歩容," 第8回日本ロボット学会学術講演会, 1990年11月.
7. 安達, 新井, 本間, 中村, 吉灘, "脚とクローラを用いたハイブリッド移動機構の試作," 第10回日本ロボット学会学術講演会, 1992年10月.
8. 安達, 本間, 新井, "自動掘削ロボットの移動機構の研究 第2報 並列プログラミングによる歩行制御," 第11回日本ロボット学会学術講演会, 1993年11月.
9. 安達, 新井, 小谷内, 川瀬, 村田, 山田, "4脚移動ロボットの操縦形歩行制御," 第4回ロボットシンポジウム, 1994年5月.
10. 安達, 新井, 小谷内, 川瀬, "4脚ロボットの6自由度位置・姿勢制御," 第12回日本ロボット学会学術講演会, 1994年11月.
11. 安達, 小谷内, 新井, 西村, "脚機構を利用した移動マニピュレータの試作," 第13回日本ロボット学会学術講演会, 1995年11月.
12. 安達, 小谷内, 新井, 篠原, 西村, "イベントドリブン方式による4脚歩行ロボットの操縦形歩行制御," 第14回日本ロボット学会学術講演会, 1997年11月.
13. 安達, 小谷内, 新井, 清水, "脚・車輪複合型移動機構の開発 第1報 機構の試作と基本

動作，” 第3回ロボティクスシンポジア、1998年5月．

#### 解説

- 1． “ 歩行ロボットのための脚リンク機構，” 機械設計，Vol.33, No.12, pp.22-23，1989年12月．
- 2． “ 力覚歩行ロボット，” ニューメカトロニクス制御技術，ミマツデータシステム，pp.453-465，1992年9月．
- 3． “ 歩行ロボットの実用化に向けて，” 日本ロボット学会誌，第11巻，第3号，pp.391-392，1993年4月．