

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

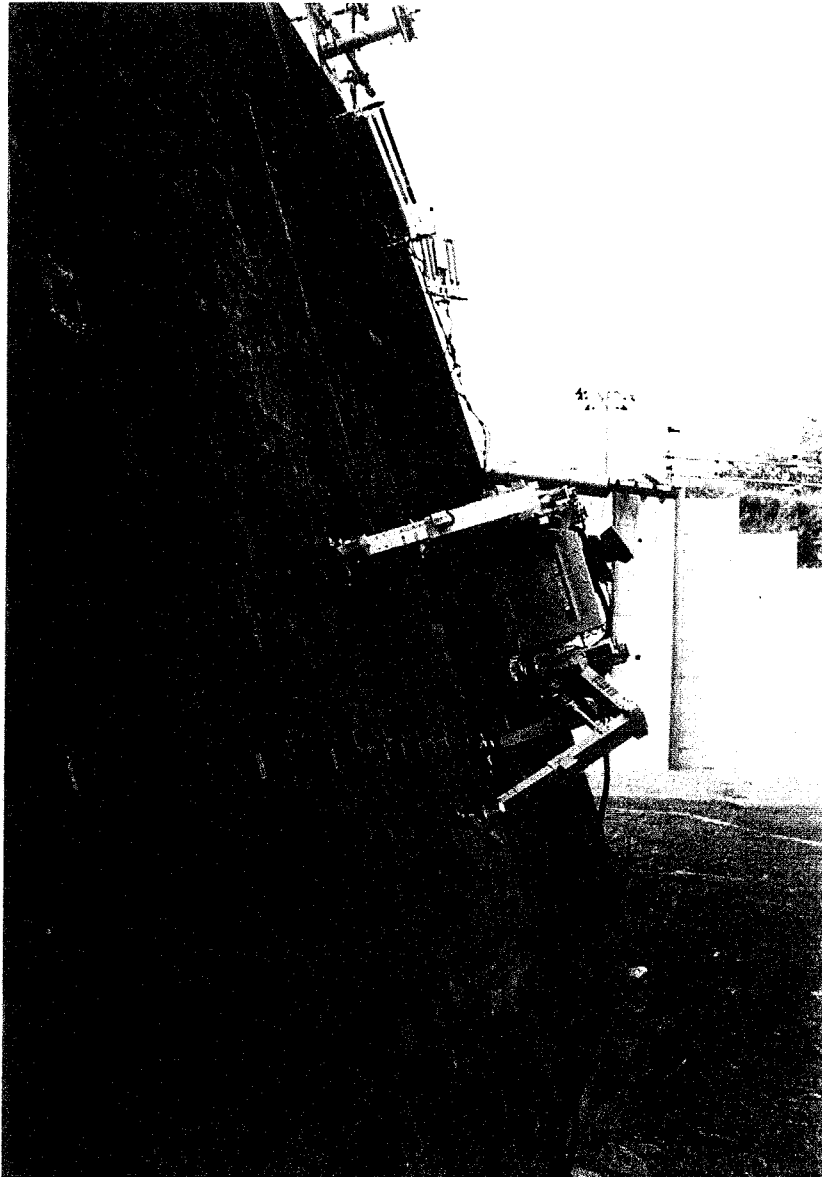
題目(和文)	傾斜面作業型 4 足歩行機械の機構と制御の研究
Title(English)	
著者(和文)	塚越秀行
Author(English)	Hideyuki Tsukagoshi
出典(和文)	学位:工学博士, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第3703号, 授与年月日:1998年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:広瀬茂男
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第3703号, Conferred date:1998/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

東京工業大学 平成9年度 学位論文

傾斜面作業型4足歩行機械の  
機構と制御の研究

東京工業大学 理工学研究科 機械物理専攻

塚越 秀行



TITAN VII, a Quadruped Walking Robot, climbing 70 degree slope  
to bore holes in it.

# 目次

<b>1</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	本研究の目的	1
1.2	本研究の背景	1
1.2.1	現場の現状と打開策	1
1.2.2	不整地の分類	5
1.2.3	技術動向	7
1.3	本論文の内容	13
1.3.1	本論文の位置づけ	13
1.3.2	本論文で対象とする4足歩行機械	14
1.3.3	構成	14
1.3.4	用語と記号の説明	16
<b>2</b>	<b>不整地における静的安定性評価基準</b>	<b>20</b>
2.1	静的安定性評価基準の総合的検討	20
2.1.1	従来の安定性評価の分類	20
2.1.2	比較実験	24
2.1.3	正規化エネルギー安定余裕の提案	25
2.2	$S_{NE}$ 等高線とその特性	27
2.2.1	誘導の準備	27
2.2.2	$S_{NE}$ 等高線の誘導	28
2.2.3	$S_{NE}$ 等高線の性質	31
<b>3</b>	<b>間歇クロール歩容の提案とその生成原理</b>	<b>35</b>
3.1	間歇クロール歩容の提案	35
3.2	歩容誘導のための準備	38
3.3	基準歩容の誘導	39
3.3.1	間歇クロール歩容の基本特性	39
3.3.2	誘導手順の概要	41
3.3.3	A「準備」	41
3.3.4	B「安定余裕の設定」	43
3.3.5	C「有効な挟平行支持脚直線群の誘導」	43
3.3.6	D「各脚の脚軌道候補の選出」	43
3.3.7	E「4脚共通の脚軌道候補の選定」	45
3.3.8	F「総合比較」	45
3.3.9	接地面傾斜が異なる場合の最適歩容	47
3.4	間歇型追従歩容の導入	47

4	ワイヤによる牽引補助	50
4.1	基本概念	50
4.2	牽引システムの構成	50
5	機械モデルの開発	55
5.1	高出力脚駆動機構の開発	55
5.1.1	基本設計方針	55
5.1.2	干渉駆動型直動機構の導入	57
5.2	臍節の伸縮機構	59
5.2.1	伸縮の効果	59
5.2.2	臍節モデル	59
5.3	対地適応型足先機構	61
5.3.1	足先機構の基本設計概念	61
5.3.2	足先第1次モデル	62
5.3.3	足裏状態の安定性	62
5.3.4	足先第2次モデル～ロッカー・ボギー・ソール～	64
5.3.5	足先第2次モデル～不整地認識型足首センサシステム～	68
5.4	機械モデルの全体構成	68
5.5	制御システムの構成	72
6	実験	75
6.1	基準間歇クロール歩容の生成結果	75
6.2	緩斜面の歩行実験	78
6.3	急斜面の歩行実験	80
7	結論と今後の課題	86
7.1	結論	86
7.2	今後の課題	87

# 第1章 序論

## 1.1 本研究の目的

本研究は、不整地傾斜面を有する建設作業現場で行なわれてきた種々の危険な作業を、作業員に代わって4足歩行機械が安全かつ効率的に遂行できることを最終目的に、機構と制御の両面から追究したものである。

鉄道や道路を山間部に敷設するため山岳を切り開いた後の建設作業内容には、急峻かつ烈しい凹凸面を有する傾斜面における施工が数多く存在する。このような現場において、今日まで作業員自らが傾斜面、時には崖と呼ぶにふさわしい環境に登り、土砂崩れ防止のための施工を行ってきた。このような非効率的で危険な作業内容を近い将来自動機械化するために様々な検討を行なった結果、移動形態として従来の移動機械とは異なる機能性を有した4足歩行機械が最もふさわしい、という結論に辿り着いた。

しかしその実用化への道は決して容易なものとは思えない。そこで本研究では、このプロジェクトの第1段階として4足歩行機械を不整地傾斜面で安定に移動できる単なる運搬機械と位置づけ、その使用目的を達成するための傾斜面歩行特有の機構、歩容、牽引補助システムについて検討していく。

## 1.2 本研究の背景

### 1.2.1 現場の現状と打開策

そもそも、本研究の発端には次のような現状が存在している。山岳地帯の多い日本においては、山間部に高速道路や鉄道路線を敷設するにあたって厳しい環境における建設作業が数多く存在する。一方で、従来まで極力このような作業の困難な山間部を避けるように道路や鉄道の敷設地が選択されてきたが、今後新たに敷設される地域は残された山岳地帯が主流となると予測されている。現に着工したばかりの第2東名高速道路に関しては山間部での作業が数多く計画されている。従って、傾斜面建設作業現場における作業効率化は今後の日本の建設業にとって極めて重要な課題といえる。

実際の作業現場は Fig.1-1 に示すような環境である。これは、山岳を切り開いた後に土砂崩れ防止の処置として鉄筋コンクリートフレームが施された法面風景である。Fig.1-1 のような最終風景に至るまでには、切り開かれた急峻な土砂面に対して、主に整地、鉄筋フレームの設置、コンクリートの流し込み、ボーリング、土砂及び種子の吹き付けなど

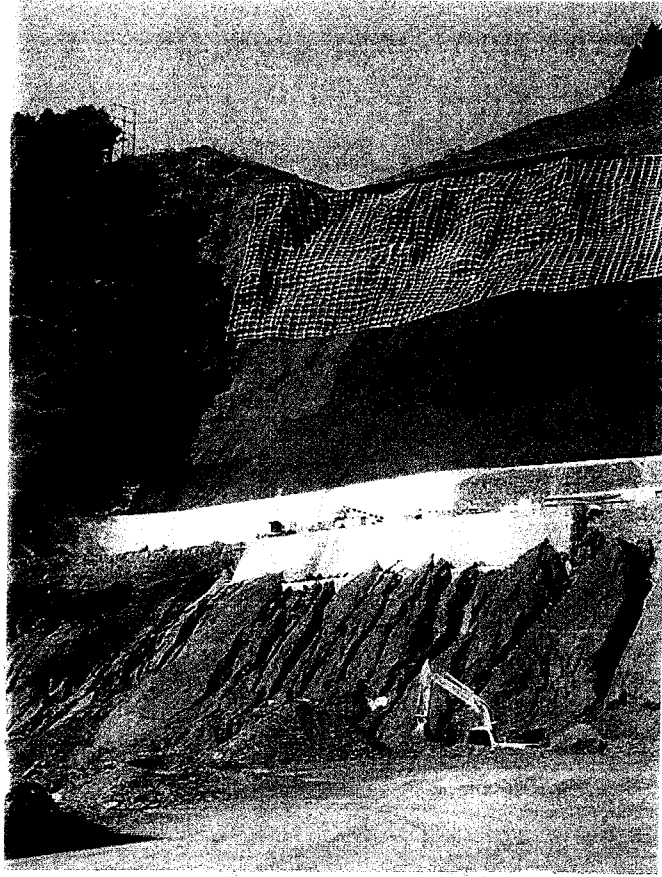


Fig.1-1 Overall view of the steep construction site covered with lattice shaped ferroconcrete frames.

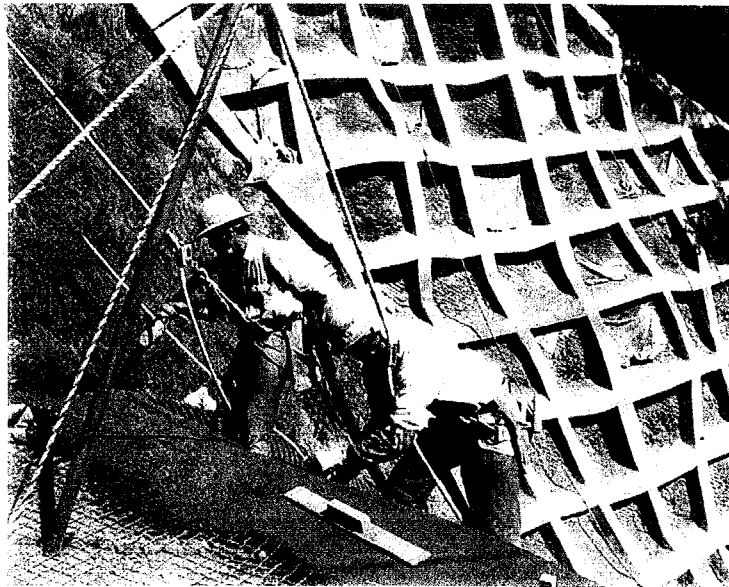


Fig.1-2 Workers suspended by ropes on about 70 degree slope.

の工程を経る。これらは従来まで Fig.1-2 のようにロープで吊された作業員自らの手で  
行なわれてきた。さらに、ボーリング作業一つとっても、Fig.1-3 に示すような仮設足場の  
設営やそこへの作業機の運搬をすべて人力に頼らざるを得なかった。これらの作業内容  
は作業員にとって常に危険と背中合わせであり、また決して効率のよいものではなかつ  
た。また、在来の車両・クローラ型の移動作業機械程度の機能を導入したとしても、傾  
斜度が大きく表面に凹凸の存在する法面では安定性が補償されず、安全な自動化は極め  
て困難であった。

このような現状を打開するために様々な移動形態を比較検討した結果、多足歩行機  
械が最適であるという結論に至った。その理由は以下の通りである。

(i) Fig1-1 に見られるコンクリートフレームがあるような不整地作業環境でも障害物  
を避けながら安定に動き回るには接地点を離散的に選択できる機能が不可欠である。た  
とえば、まだ固化しないコンクリートフレームに接触しないようにして重量物を運搬す  
るには歩行型以外は不可能である。

(ii) 移動作業機械が傾斜面において安定な姿勢を常に形成するためには、接地点に対  
する胴体重心の位置を能動的に調整できる歩行型が適している。

(iii) 脚の能動自由度を利用すれば、ある時は歩行機械に搭載された作業機の作業を補  
助する運動を生み出し、またある時は高出力のマニピュレータとして併用することもで  
きる。

さらに歩行機械の脚数に関しては、重量の軽減化、接地回数の低減化、障害物回避の  
簡略化を期待し、静的に安定な歩容を最小脚数で実現できる4足歩行機械を用いて上記  
の機能を実現していく。もちろん、4足歩行機械はそれ以上の脚数を有する多足歩行機  
械に比べ安定余裕が少ないという欠点も有するが、脚の能動自由度を利用した計画的な  
胴体重心の移動によって傾斜面作業に十分対応できると予測している。本研究は、その  
予測の正否を問うための下準備とその回答を探るためのものといってもよい。なお、4  
足歩行機械に上記(i)~(iii)の機能を実現させることで、たとえばFig.1-4に示す構想図  
のように工事現場でトラックから自力で降りて作業現場に近づき、急斜面の作業現場で  
はワイヤの牽引補助を利用して自在に動き周りながら諸々の作業をするなどが可能と考  
えられる。



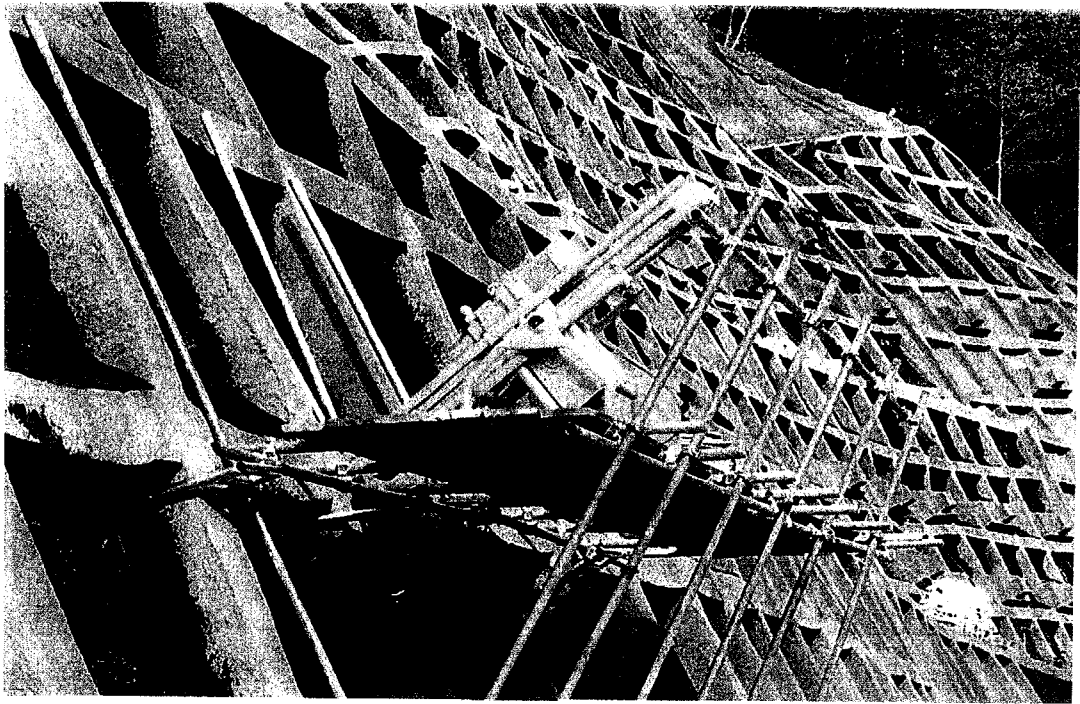


Fig.1-3 One of the anticipated tasks for walking machines. It is to bore holes on the steep slope. At present, it is carried out by a machine on a temporarily installed scaffold.

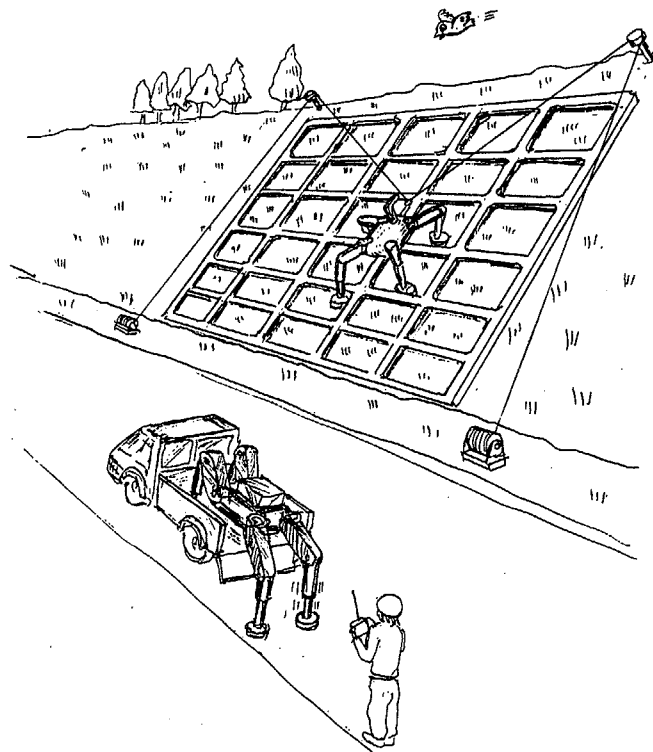


Fig.1-4 Future concept of application.

## 1.2.2 不整地の分類

4足歩行機械がFig.1-1のような不整地を安定な姿勢を維持して自在に動き回るためには、技術的にいくつかの克服すべき課題が存在する。それらを明確にするために上で述べた複雑な不整地環境を、複数の単調な移動環境の組合せと考えることで、個々の環境を4足歩行機械が移動するために必要な機能を明確にしていくことにする。

本論文では凹凸面の全くない水平面を整地とみなし、それ以外の地形をすべて不整地と呼ぶことにする。その上で、Fig.1-1の環境をFig1-5に示すように、ミクロな視点からマクロな視点までそれぞれの見方に応じて異なる種類の不整地に分類して考えることにする。(Terrain A)~(Terrain E)のそれぞれの不整地を4足歩行機械が安定に移動するには、それぞれの不整地地形に応じて次のような機能が必要と予測される。

(Terrain A)を安定に歩行するには、人間の足裏が小さな凹凸を柔軟に吸収するように、歩行機械にとってもこのような地形で歩容を変化させなくても地形に適応できる足裏機能が必要となる。

(Terrain B)を安定に歩行するには、凹凸地形でも胴体姿勢を水平に保持するための遊脚接地の制御と胴体を滑らかに推進するための制御が必要となる。遊脚接地時の基本原理は、接地面と平行方向に関しては安定性と移動速度の点から最も効率のよい位置制御を行ない、接地面と垂直な方向に関しては足先に装備した接触センサや力センサが接地面を認識するまで下げていくというシーケンスになると予測できる。

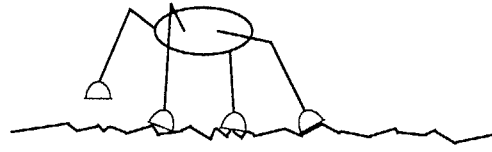
(Terrain C)を安定に歩行するには、不整地情報認識のためのセンサシステムと、安定な歩行を続行するために必要な遊脚着地点選択方法、また接地不可能な障害物が高さを持つ場合には遊脚軌道の設計が必要となる。

(Terrain D)を安定に歩行するには、傾斜面情報を認識しその上で任意傾斜度の斜面において安定な歩行を続行させるための歩容ならびに胴体姿勢に関する技術、および傾斜度の変化に応じて歩容や胴体姿勢を追従する手法などが必要となる。

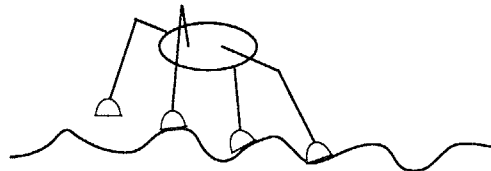
(Terrain E)を安定に歩行するには、もはや歩行機械単独では歩行不可能な傾斜度であるため、ワイヤによる牽引補助が不可欠であり、傾斜面特有の牽引補助制御とそれに対応した歩容が必要となる。

Fig.1-1の不整地は(Terrain A) ⊂ (Terrain B) ⊂ (Terrain C) ⊂ (Terrain D) ⊂ (Terrain E)の包含関係によって複合された環境であるため、(Terrain A)~(Terrain E)を安定に移動できる技術目標が達成されたとき、Fig.1-1の環境における4足歩行機械の運搬機械として実用化への道が開けることになる。

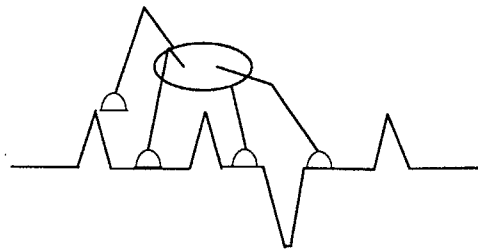
(Terrain A)



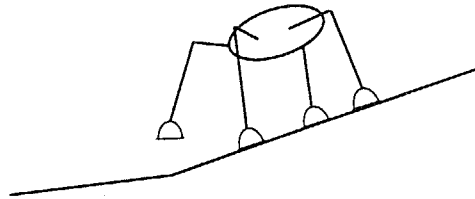
(Terrain B)



(Terrain C)



(Terrain D)



(Terrain E)

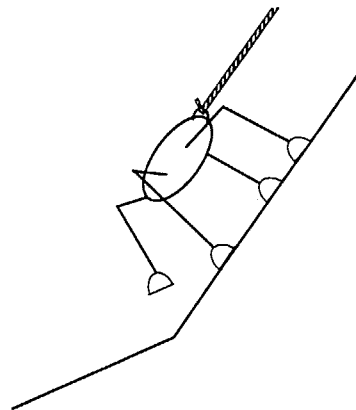


Fig.1-5 Chart of basic terrain types included in the construction site.

### 1.2.3 技術動向

従来まで多くの研究者によって達成されてきた歩行機械による不整地歩行に関する研究成果を (Terrain A)~(Terrain E) の各領域に分類して復習し、それぞれの領域を4足歩行機械を用いて移動するために新たに必要と思われる技術を明らかにしていく。なお、不整地踏破の歩行技術は脚本数に依存しない普遍性のある理論の可能性もあるため、ここでは歩行機械一般についての事例を検索していく。

(Terrain A) に関しては、足先機構の変形で接地面の小さい凹凸を吸収しようという試みは従来まであまり重要視されてこなかった。以前の多足歩行機械は、McGhee らの6足歩行機械 [1] のように足先を点接地もしくはミュンヘン大学の TUM (Fig.1-6) のように小球状にし足首を挫く可能性をなくした機構をとりいれていたためその重要性に注目されずにきたが、本田技研2足歩行機械 [2] にみられるような足裏部にスポンジを介してゴムを貼り、着地衝撃を緩和するとともに、コンプライアンス制御のオープンループゲインを下げる工夫をしているが接地面への適応は足首に装備された駆動系で能動的に行なっている。4足以上の多足歩行機械においては、足先で凹凸面を吸収するという報告はほとんどなく、足先に受動回転3自由度を有する程度の機構に収まっている。4足歩行機械を建設現場のような土砂面で用いることを想定すると、これらの機能に加えて柔軟さと滑べりにくさとを兼ね備えた足先機構が必要と思われる。

(Terrain B) に関しては、これまでに数多くの研究成果が残されている。歩行機械に力制御を導入した古典的な報告としては Klein らの [3] が挙げられる。6足歩行機械を用いて剛体面に対してアクティブコンプライアンス制御を取り入れたものである。また、金子ら [4] は脚接地面が変形するような環境を同じく6足歩行機械を用いて、胴体の高さや姿勢を一定に維持するための制御を行なっている。不整地認識には足裏の力センサのみを用いており、基本的には自重支持力が目標値になるまで足を押しつけるという単純なシーケンスであるが、路面モデルを形成して胴体推進時の路面変形量を修正しながら胴体推進時の補償を行なっている。

さらに、不整地での滑らかな歩行を実現するためには力指令値の連続性を確保する必要があり、Gorinevsky ら [5] は4脚以上が支持状態のため不静定となる期間の力指令値としてその前後で線形補間の生成方法を述べている。この他にも理論的アプローチとしては、足先支持力に関する不静定問題に関して最大接地圧を最小化するように解いた [6][7] がある。また、段差のあまり高くない階段も (Terrain B) に含まれるが、広瀬は4足歩行機械に触覚センサと姿勢センサを用いたセンサベースな階段昇降を世界で始めて

成功させている (Fig.1-7).

以上は、静歩行における不整地歩行の報告であったが、動歩行に関する研究も行なわれており、米田ら [8] は足先の接地力をあらかじめ動力学で計算するフィードフォワード制御と、空間インピーダンスを設定して胴体姿勢の補正を行なうフィードバック制御を融合した動的効果を加味したアクティブサスペンション制御を検討している (Fig.1-8):

これらの正確な制御を要求する不整地歩行の流れとは逆に、歩行機械の形態そのものを変化させることで不整地を容易に移動する試みも行なわれてきている。6足歩行機械 Ambler[9] は昆虫型とは全く異なる駆動機構を有し、それぞれ3本の足が左右2つの軸まわりに回転し、各々の足は胴体垂直方向にのみスライドするという形状をとることで不整地の接地判断を簡略にしている。これと類似した発想は三菱重工によって開発された LandMaster(Fig.1-9) にもみられ、3脚ずつペアをなしたテーブル2台が胴体平面方向の並進と垂直軸回りの回転を行ない、各脚は足先の接触センサが作動するまで伸長するという機構を形成している。この移動方式により、常に胴体を水平に保持しながら不整地をゆっくりではあるが確実に移動することを可能とした。これら2台は不整地歩行の実用化への近道を提示したという点で意味が大きい。その一方で、胴体姿勢を変化させる自由度を縮退しているため歩行機械本来の機能として有する多自由度を生かした作業を望むことはできない。

なお、(Terrain B) の環境移動に関しては、フィンランドで操縦者が乗用する昆虫型6足歩行機械 Plustech-Walker[19](Fig.1-10) が国の主要産業である林業に参入し活躍している。歩容そのものは一般化ウェーブ歩容 [20] と思われる静歩行で全方向に移動し、凹凸面を吸収ながらの歩行が可能である。胴体にはパワーショベルのバケット代わりに大木の把持・伐裁・枝の切り落とし機能をつけたような大型マニピュレータを装備しており、筆者の知る限りでは世界最初の実用歩行機械と思われる。

(Terrain C) を歩行する研究成果は、筆者の知る限り2足、及び4足歩行機械の事例しかなく、その原因は多足歩行機械の接地点選択が煩雑なためと予測している。接地点を選択する歩容に関して数少ない報告事例をあえて分類すれば、不整地情報を持たずに遊脚接地時にタッチセンサなどを用いて接地できる位置を探索するその場探索型歩容と、不整地情報を何らかの手段でとりこみ事前に接地点を選んでおく事前計画型歩容に二分できる。

前者に関しては、McDonaldら [10] が小型4足歩行機械を用いた接地点選択型歩容を成功させている。複数の階層を設けた接地点決定のアルゴリズムを報告しているが、遊脚

接地後の胴体推進方法についてどのような評価で決定しているかは明らかでない。また、本田技研 [2] は 2 足歩行機械を用いて障害物形状が既知のもとで 150[mm] の段差乗り越えを行ない、また日立製作所 [11] は 4 足歩行機械を用いて同様の乗り越えに成功しているようであるが、歩容アルゴリズムが明らかではないが、いずれも数歩先を予測して歩行しているわけでないためその場探索型歩容の一種といえる。また、その場探索型歩容は比較的簡易なアルゴリズムで済むものの複数散在する障害物に対して連続的に跨ぎ越えることは不可能である。これに対して広瀬ら [12] は、着地不可能な数歩先の穴を乗り越えることを想定した事前計画型歩容を行ない、常に安定性を維持しながら基準クロール歩容への収束性をもたせることで連続性のある穴の乗り越え歩容をシミュレーション下で実現している。しかし、実機への応用はまだ試みられていないが、今後新たに安定余裕を考慮した接地点選択方法の検討も必要であろう。また、事前計画型歩容の場合、歩行に必要な障害物認識方法がいまだ確立されておらず、確実な情報処理系を構築することから始める必要があると思われる。

(Terrain D) に関しては、高西ら [13] は既知の環境下ではあるが、仮想路面という概念を導入し、その上での ZMP[22][23] を用いることで段差 10cm の階段や傾斜角  $10^\circ$  の台形状不整地斜面などにおいて上体によりモーメント補償を行なう動歩行を実現している。同じく [2] は既知の環境下で傾斜角  $5^\circ$  の傾斜面の動歩行を実現している。詳細は明らかでないが、上記と基本的原理は同じものと思われる。

これらに対し安達ら [14] は 4 足歩行機械の各脚に設置された力センサに歩行条件を把握し、この情報を基にロボットの安定性を確保するための歩容を生成する。具体的には水平面における安定な基準歩容を予め求めておき、未知の傾斜面では足先の力センサのみを用いて傾斜度を予測し、水平面基準歩容から遊脚の復帰位置を傾斜角に応じて斜面下側にシフトさせるという手法をとり入れ、 $6^\circ$  の傾斜面の歩行を行なっている。しかし、傾斜度の変化に応じて遊脚復帰位置を斜面下側に平行移動させることが最適とはいえ、例えば斜面下側を遊脚にする場合、斜面上側 2 脚の支持位置を斜面横方向に広げても静的安定性は増加する。この曖昧さを明確にしたのが広瀬ら [15] であり、4 足歩行機械を用いてクロール歩容で傾斜面を歩行する際に、限られた脚可動範囲内で安定条件を満たし、ストローク等高線を用いてストローク長が最長となる脚軌道を誘導し、斜面上側 2 脚を開いて歩行する“逆台形歩容”を提案している。しかし、実機で試してはならず、クロール歩容特有の支持脚三角形切り換え点での安定性低下のため実際に歩行できる傾斜度は小さいものと予測される。

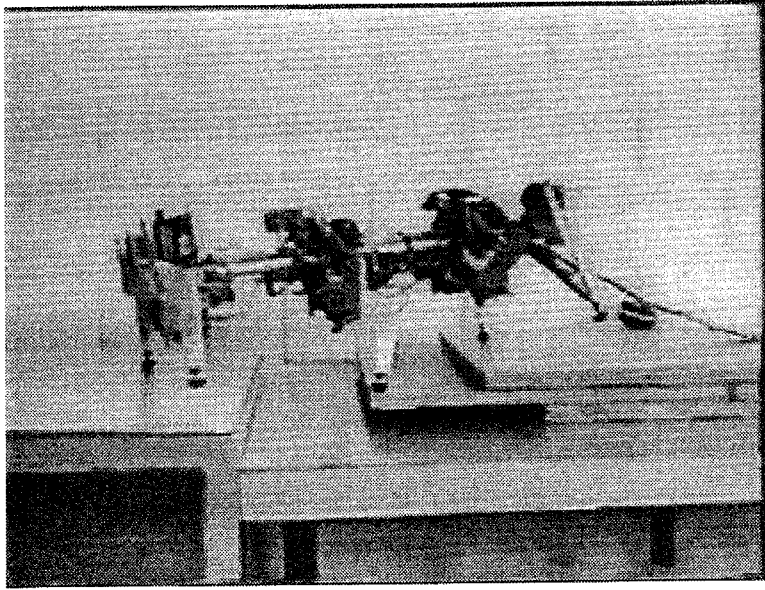


Fig.1-6 TUM by Munich Univ. walking on the reugged terrain, using ball shaped sole.

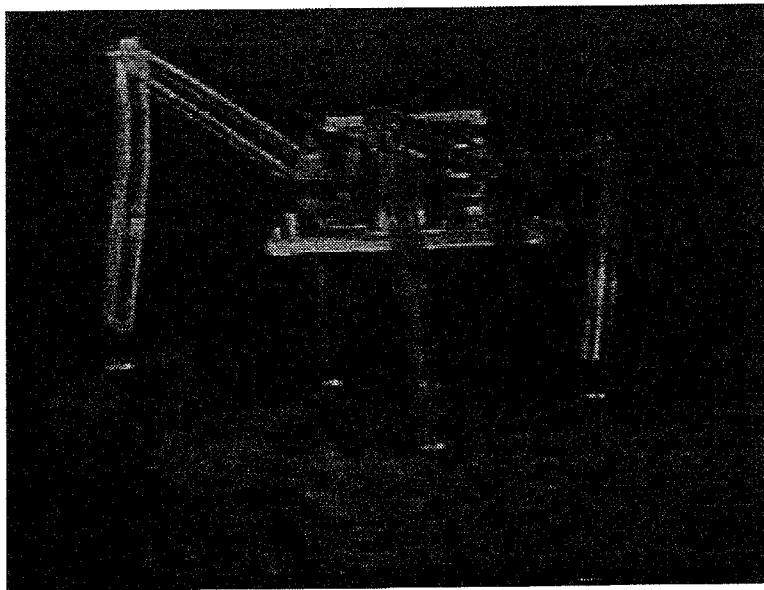


Fig.1-7 Hirose's PV-II climbing the steps by using tactile sensors and posture sensors.

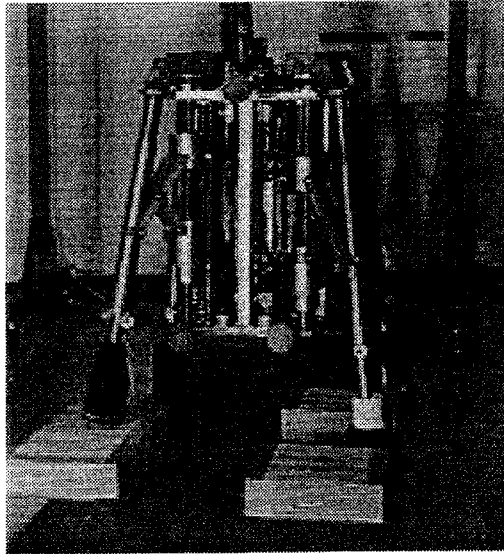


Fig.1-8 Hirose, Yoneda and etc's TIATAN VI adapting to rugged terrain.

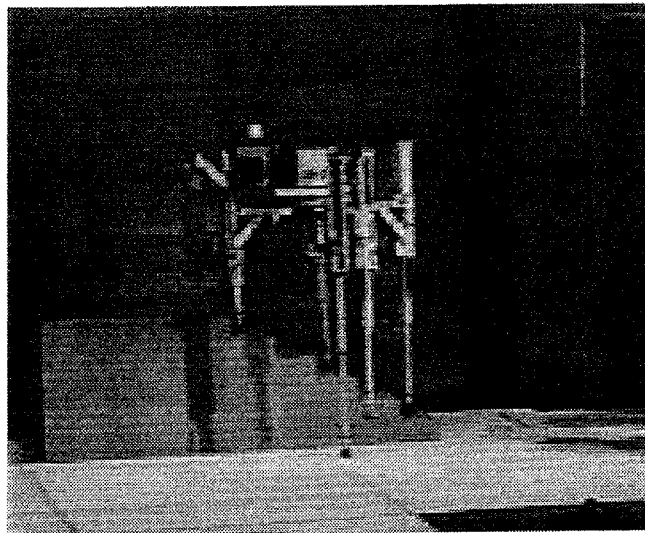


Fig.1-9 Land-Master by Mitsubishi Heavy Industry going over the steps by using 6 extensible legs.





Fig.1-10 Plustech-Walker in Finland walking around the forest to cut trees.

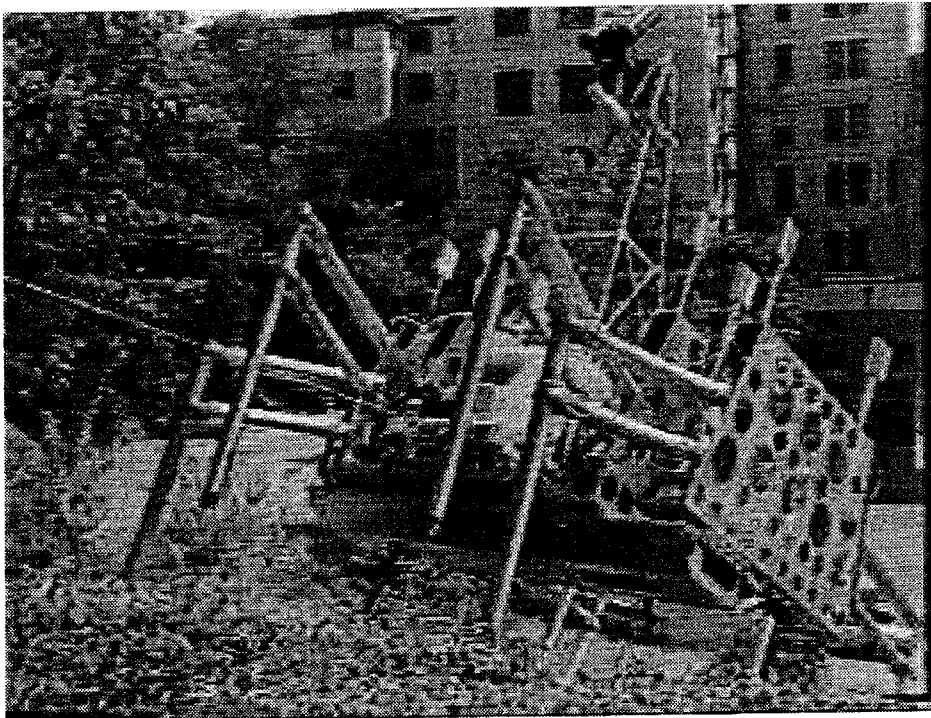


Fig.1-11 DANTE-II by CMU climbing the steep slopes by using 8 legs and cooperating with a wire.

また, Orin ら [16] は 6 足歩行機械 Adaptive Suspension Vehicle を用いて凹凸を有する傾斜面に適応する歩容を論じており, 遊脚の近接センサからの情報をもとに局所的斜面の傾きを推定しながら歩行を実現している. なお, この手法は 3 脚を同時に遊脚化できる 6 足歩行機械特有の傾斜面認識方法といえる.

(Terrain E) に関しては, これまでにカーネギ・メロン大学の 1 グループが試みた Dante I と Dante II (Fig.1-11)[17][18] が存在する唯一の例である. これは南極大陸の活火山 Erebus 山の火口へワイヤで牽引補助されながら探査に行くための 8 足ロボットであり, 4 脚セットで駆動される構造のため, 駆動系は簡略化できているが, 移動できる方向は一方向に拘束されている. そのため, 一本の牽引補助ワイヤを用いているに過ぎないが, ワイヤの構造は工夫をこらしており, 770[kgf] のロボット自重を支える耐久性と情報伝達のためのイーサネットケーブル, 電力供給用ケーブルといった機能性を兼ね備えている. また, 岩などにワイヤがスタックしたことを感知するためのロードセルはついているものの, 基本的にワイヤ手繰りだし量は位置制御であり, 安定性保持のための姿勢制御は歩行機械本体が行なっている.

## 1.3 本論文の内容

### 1.3.1 本論文の位置づけ

本研究における 4 足歩行機械は, Fig.1-1 に示した傾斜面建設作業現場を安定かつ自在に移動するための運搬機械と位置づける. このような目的と従来までの研究成果とを比較して結果, (Terrain B) を除く不整地環境においてはいまだ発展途上の領域であり, それぞれの不整地環境において解決すべき点が多く残されている. それらのなかで, (Terrain D) と (Terrain E) を 4 足歩行機械が安定に移動するための理論を確立することは, 傾斜面移動の可能性提示として意義が最も大きいと思われる.

(Terrain D) の研究成果によると, 2 足歩行機械を用いて傾斜度  $10^{\circ}$  の動歩行を成功しているものの, 4 足歩行機械では未知環境とはいえ  $6^{\circ}$  の静歩行を成功している程度であり, 安定余裕の大きさから考えるとさらに大きな傾斜度での歩行の可能性があるとと思われる.

(Terrain E) の研究成果によると, Dante I, II の移動方向は一方向の報告のみであり, 全方向を移動できるための機構, 歩容, 牽引補助の技術が望まれる. また, Dante I, II におけるワイヤ補助牽引の基本概念は滑落防止のための位置決めであり, 安定保持のための姿勢制御は歩行機械に委ねている. これとは別に, 牽引力を積極的に制御することで

安定姿勢保持のための制御も可能と思われる。

以上の経緯を踏まえたうえで、これら両領域において4足歩行機械が運搬機械として実用化するには速度よりも安定性を重視すべきであるという観点から、本研究では一貫して4足歩行機械が傾斜面において静歩行（1.3.4参照）を行なうこととし、その実現のための静的安定性評価基準、歩容生成、牽引補助制御、以上3点の理論の確立とそれらの傾斜面特有の歩行機械による検証を行なっていくことにする。

### 1.3.2 本論文で対象とする4足歩行機械

本研究で対象とする4足歩行機械は、不整地における移動作業を前提としているため、少なくとも次に示す機能を有することを前提として、論理の展開を行なう。

- i) 4足歩行機械は胴体とその上に設置された4脚を有し、それぞれの脚は3自由度、合計12自由度を能動的に駆動できるものとする。すなわち、遊脚接地点は3次元空間内の任意の位置に設定でき、胴体は地面に対して並進3自由度、回転3自由度を要する作業が可能であるものとする。
- ii) 足先は理論上点接触とし、3脚以上で支持している状態では静的に安定性が保持されるものの、2脚支持状態では静的安定性が保持できないものとする。
- iii) 接地面の最大傾斜角、最大傾斜線方位角（詳しくは第2章参照）は既知なもの、もしくは歩行機械に搭載する姿勢センサによって計測可能なものとする。

### 1.3.3 構成

本論文全体の構成は Fig.1-12 に示すようになっている。第2章では、不整地に立脚する歩行機械の静的安定性評価基準として最適な「正規化エネルギー安定余裕」の提案を行なうとともに、任意傾斜面上でその評価量を等しく点を結んだ「 $S_{NE}$ 等高線」の導入を行なう。第3章では、「正規化エネルギー安定余裕」を最大化する歩容「間歇クロール歩容」の提案とその脚軌道の誘導を行なう。第4章では、「間歇クロール歩容」を用いても歩行機械が単独では歩行できない急勾配の傾斜面移動を可能にするため、ワイヤによる牽引補助の導入を行なう。第5章では、上記の理論を検証するために開発した機械モデル「TITAN VII」の機構とその制御手法について述べる。第6章では、TITAN VIIを用いた歩行実験の結果を提示する。第7章では、本研究で得られた結論と実用化へむけての課題を述べる。

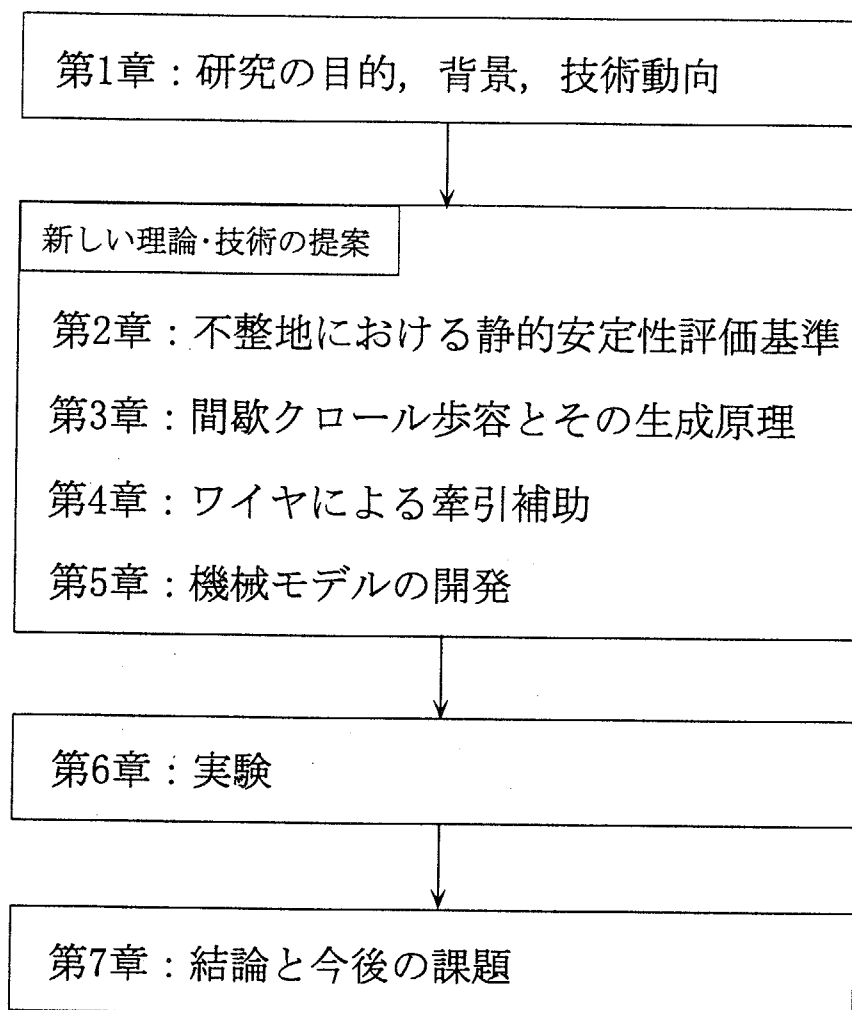


Fig.1- 12 Whole structure of this thesis.

### 1.3.4 用語と記号の説明

本論文で用いる用語と記号の説明を行なう。

- 不整地： 1.2.2 で分類した (Terrain A)～(Terrain E) の地形を総称した地形。
- 傾斜面： 1.2.2 で分類した (Terrain D) と (Terrain E) を総称した地形。
- 緩斜面： 1.2.2 で分類した (Terrain D) に相当し、対象とする 4 足歩行機械が単独で安定に移動できる傾斜面の地形。
- 急斜面： 1.2.2 で分類した (Terrain E) に相当し、対象とする 4 足歩行機械が単独では安定に移動できない傾斜面の地形。
- 接地面： 足が常に同一平面上に乗った歩行を仮定したとき、その平面。ただし、不整地移動ではもちろんこの設定は近似的にしか成り立たないため、最も誤差の少ない接地面の設定を行う必要がある。本論文では触れない。
- 遊脚： 歩行中接地力を受けないように制御している足。
- 支持脚： 歩行中接地力を受けるように制御している足。
- 支持脚直線： 接地面上の支持脚のうち、お互いに隣り合う 2 脚を結んだ直線。
- 転倒中心点： 歩行機械の重心からある支持脚直線に下ろした垂線の足。
- 静歩行： 常に静的にバランスをとる歩行。
- クロール歩容： 重心を連続的に動かしながら左後ろ、左前、右後ろ、右前の順で脚を遊脚化する静歩行。
- 間歇クロール歩容： 本論文で提案する静歩行。重心の移動は 4 脚支持状態時のみとし、遊脚順序はクロール歩容と同じ。3.1 参照
- 最大傾斜線： 接地面上に存在する直線の中で水平面と最大角度を有する直線。
- 最大傾斜角： 接地面と最大傾斜線とのなす角度。
- NE安定余裕： 本論文 2 章で新たに提案する安定余裕。
- 側行角： 歩行機械の進行方向ベクトルと胴体座標系の  $x$  軸をそれぞれ接地面に投影したときに 2 本のなす角度。

記号	説明	参考箇所
$A_h$	$H$ を駆動するためのアクチュエータ.	5.1.1
$A_k$	$K$ を駆動するためのアクチュエータ.	5.1.1
$A_{hk}$	$H, K$ を駆動するためのアクチュエータ.	5.1.1
$A_\theta$	胴体座標 $z$ 軸回りの脚駆動をするためのアクチュエータ.	5.1.2
$C_1 \sim C_3$	足裏機構の爪の接地点.	5.3.4
$d$	$G_c$ - $P$ 間の距離.	2.2.1
$F$	1本のワイヤを用いた牽引補助の際のワイヤにかかる牽引力.	4.1
$F_1, F_2$	2本のワイヤを用いた牽引補助の際のそれぞれのワイヤにかかる牽引力.	4.2
$F_3$	2本のワイヤを用いた牽引補助の際のワイヤ牽引力の合力.	4.2
$F_s$	足先支持力.	5.3.4
$f$	歩行機械の進行方向に対して左前足.	3.2
$\bar{f}$	歩行機械の進行方向に対して右前足.	3.2
$G$	歩行機械の重心点.	2.2.1
$G_c$	$G$ から接地面に下ろした垂線の足.	2.2.1
$G_{max}$	転倒過程の $G$ の $z_0$ 軸方向の最高点.	2.2.1
$\underline{G}$	$G$ から鉛直方向におろした直線と接地面との交点.	2.2.3
$H$	関節点, Hip Point.	5.1.1
$h$	$G$ - $G_c$ 間の距離.	2.2.1
$h_{max}$	$G_{max}$ の $z_0$ 成分と $P$ の $z_0$ 成分との差.	2.1.1
$h_0$	$G$ の $z_0$ 成分と $P$ の $z_0$ 成分との差.	2.1.1
$K$	関節点, Knee Point.	5.1.1

$K_F$	力の偏差からウインチ駆動電圧までのゲイン.	4.2
$K_{m1}, K_{m2}$	AC サーボドライブへの入力指令電圧からモータ駆動速度までのゲイン.	4.2
$L_1, L_2$	$S_1-S_3, S_2-S_3$ 間のワイヤの長さ.	4.2
$L_3$	$S_1-S_2$ 間の距離.	4.2
$l_e$	放射軸線.	2.2.1
$l_{max}$	最大傾斜線.	2.2.1
$l_s$	支持脚直線.	2.2.1
$l_s(n)$	ある脚 $n$ を遊脚化することではじめて隣接脚となる, 脚 $n$ の両隣の脚で構成される支持脚直線.	3.2
$M_d$	転倒生成モーメント.	2.1.1
$M_g$	安定保持モーメント.	2.1.1
$P$	転倒中心点.	2.2.1
$P_s$	足先支持力ベクトルと接地面との交点.	5.3.4
$S_1, S_2$	絶対座標系におけるプーリからワイヤが手繰り出される位置.	4.2
$S_3$	絶対座標系におけるワイヤと歩行機械との結合位置.	4.2
$S_{NE}$	正規化エネルギー安定余裕 ( $NE$ 安定余裕).	2.1.3
$T$	歩行機械が歩行中周期的に遊脚する際の一周期.	3.1
$r$	歩行機械の進行方向に対して左後ろ足.	3.2
$\bar{r}$	歩行機械の進行方向に対して右後ろ足.	3.2
$u_1, u_2$	左右ウインチを駆動するための入力電圧.	4.2
$v$	歩行機械の重心進行速度ベクトル.	3.2
$W$	歩行機械の自重.	4.1

$x_\alpha$	「安定余裕」最大化重心位置の水平面への投影点.	2.1.1
$x_\beta$	「傾斜度安定余裕」最大化重心位置の水平面への投影点.	2.1.1
$x_\gamma$	「エネルギー安定余裕」最大化重心位置の水平面への投影点.	2.1.1
$VQRU$	間歇クロール歩容時の基準脚軌道.	3.3.1
$\Sigma(Gxyz)$	胴体座標系.	2.2.1
$\Sigma_0(0x_0y_0z_0)$	絶対座標系.	2.2.1
$\Sigma_c(G_cx_cy_cz_c)$	接地面座標系.	2.2.1
$\alpha$	$x$ 軸と $v$ とのなす角.	3.2
$\theta$	最大傾斜角.	2.2.1
$\theta_e$	水平面と放射軸線とのなす角.	2.2.1
$\theta_s$	水平面と支持脚直線とのなす角.	2.2.1
$\xi$	$l_{max}$ と $x_c$ 軸とのなす角.	2.2.1
$\phi_1, \phi_2$	$S_1, S_2$ において接地面と平行なプーリを含む平面内で手繰り出されるワイヤが $l_{max}$ 方向となす角度.	4.2
$\varphi$	傾斜度安定余裕.	2.1.1
$\lambda^*$	任意の $NE$ 安定余裕における間歇クロール歩容の最大ストローク長.	6.1



## 第2章 不整地における静的安定性評価基準

不整地を歩行する歩行機械の歩容を考えていく場合、まず始めに考慮しなければならない条件は、どの様な歩行面でも安定で転倒しない歩行を持続できる特性を与えることである。そして、そのためには不整地環境で任意の立位姿勢をなしている歩行機械の静的安定性について合理的な評価基準を定めた上で、その評価量を最大化する歩容生成が不可欠となる。もちろんこれまでも、歩行機械の安定性評価基準に関してはいくつかの報告がなされている [24]~[29]。しかし、それぞれの評価量を最大化することによって得られる歩行機械の相異なる姿勢が、物理的にどのような相違点をもたらすことになるのか比較し検討されたことはなかった。そこで本章では、不整地環境にある多足歩行機械が静的安定性を最大限維持するための評価基準を相対的に検討し、新たに「正規化エネルギー安定余裕」と呼ぶ安定性評価基準を提案する。次にその評価量の最大化を図った姿勢と歩容生成を検討するため「 $S_{NE}$  等高線」の概念を導入し、不整地における一般歩行機械の歩容計画の基礎を構築することにする。

### 2.1 静的安定性評価基準の総合的検討

不整地環境にある多足歩行機械の静的安定性を最大化する問題を考えていくためには、まず始めに安定性評価基準を明確化しなければならない。静的安定性が崩される原因には、「転倒」と「滑落」が考えられる。このうち、滑落は脚支持面の摩擦係数などに依存する現象である。滑落を防止する条件を探ることはもちろん重要であり今後考察していくことが必要であるが、本研究ではひとまず足裏にはスパイクなどがあって接地面との摩擦係数は十分大きく「滑落」は起きにくいという状況を想定し、「転倒」の効果のみを考察していくこととする。

歩行機械の転倒安定性の評価基準は、これまで個別にいくつかの提案がなされてきたが、その特性を総合的に比較検討することは行われていなかったと思われる。そのため本研究では、簡単な転倒実験を含めた考察によってそれらを比較し、最も適する評価基準を新たに提案することにする。

#### 2.1.1 従来の安定性評価の分類

これまで、歩行機械の転倒安定性の評価基準としては以下の6つが提案されていたと

考えられる。

1) 「安定余裕 (Stability Margin)」 [24]. これは、歩行機械が水平で平坦な地表面を歩行しているとしたとき、歩行機械の重心から地表面へ下ろした垂線の足を重心投影点としたとき、その重心投影点から支持脚によって地表面に形成される支持多角形の境界線への距離である。

2) 「転倒安定余裕 (Tumble Stability Margin)」 [25]. これは、歩行機械の支持脚のうち任意の2つの支持脚接地点を結ぶ軸回りに転倒が生ずると考えた際、その軸回りに歩行機械の重量が発生する転倒防止方向のモーメントの絶対値を歩行機械の重量で割った長さの次元の評価量である。これは、歩行機械が水平で平坦な地表面を歩行している状況に限定すると1)の安定余裕と同じ評価基準となる。

3) 「傾斜度安定余裕 (Gradient Stability Margin)」 [26]. これは、歩行機械が立っている環境全体を任意の方向に傾斜していったとき、歩行機械が転倒を始める傾斜角によって安定性を評価しようとするものである。

4) 「Tipover Stability Margin」 [27]. これは概念的には傾斜度安定余裕と等しいが、倒れる要因を重力だけでなくすべての外力を含めて考慮しながら倒れ始める限界角度によって安定性を評価しようとするものである。

5) 「Energy Stability Margin」 [28]. これは、歩行機械の支持脚のうち任意の2つの支持脚接地点を結ぶ軸回りに転倒が生ずると考えた際、転倒の過程で重心が持ち上げられる位置エネルギーの大きさによって安定性を評価するものである。

6) 「Dynamic Energy Stability Margin」 [29]. これは概念的には Energy Stability-Margin と等しいが、重力だけでなくすべての外力を含めて安定性を評価しようとするものである。

なお、以上すべての評価において、ある瞬間の姿勢における歩行機械の安定性は、通常その姿勢で考えられるすべての方向（ヨ一角方向）への転倒の評価値の最小値によって与えるのが普通である。

さて、これらのうち1)「安定余裕」の概念は、移動体が水平面上に立っているという姿勢を前提として提案された安定性評価である。そのため、これを不整地傾斜面を歩行するような歩行機械の安定性評価にそのまま使用しようとする、若干の矛盾が生じてしまう。たとえば Fig.2-1(1)のように不整地歩行の特例として傾斜面に立っている歩行機械を考えよう。この歩行機械の重心位置は斜面から一定の高さの任意の位置に保持するものとする。このとき「安定余裕」の観点から最も安定と考えられる重心位置は、

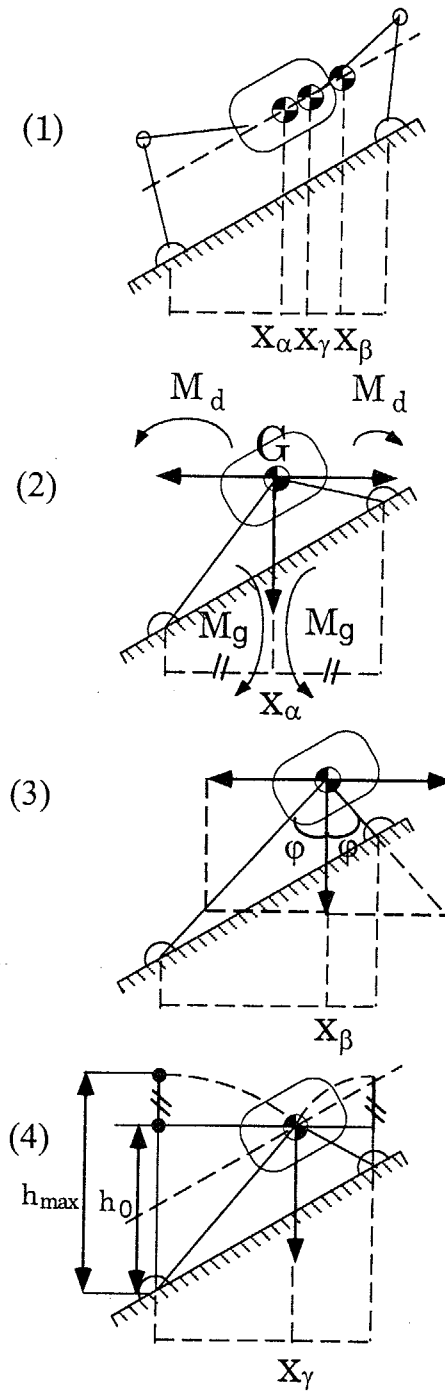


Fig.2-1 The relationship between the posture and stability criterion.

- (1) The walking vehicle under consideration.
- (2) Posture to maximize the Stability Margin.
- (3) Posture to maximize the Gradient Stability Margin.
- (4) Posture to maximize the Energy Stability Margin.

Fig.2-1(2) の様に重心を前後脚の真中に保持するものとなる。しかし Fig.2-1(2) の重心位置は、重力が上側（右側）と下側（左側）の支持点周りに発生する安定保持モーメント ( $M_g$ ) は等しくその最低値は最大化できるが、重心に横方向に働く外乱で転倒させようとする支持点周りの転倒生成モーメント ( $M_d$ ) は、上側（右側）と下側（左側）で同じでない。Fig.2-1(2) の例では明らかに下側（左側）の脚周りの転倒生成モーメントの方が大きく下側に転倒しやすい。つまり「安定余裕」は支持脚の接地高さが異なると正しく安定性を反映しない。

外乱により転倒生成モーメントが異なるのであれば、それに比例した安定保持モーメントを生じる姿勢をとれば安定性は向上する。このような姿勢は重心に加わる左右方向への外乱力と重力との合力が左右とも支持点を通る状態であり、これは Fig.2-1(3) の姿勢となる。なお、この姿勢は別の表現で示すと、歩行機械を載せた不整地を全体に傾けていったときにどの角度まで傾けると転倒を開始するかという評価と結果的には同じになる。そのためこれは3) の「傾斜度安定余裕」に対応したものであることがわかる。

「傾斜度安定余裕」は、たとえば自動車などの車両の安定性評価などにも実際に使用されており具体的な実績のある評価基準である。しかし実際の移動状況を考えるとこの評価基準にも矛盾が残されている。歩行機械が歩行中に小さな凹凸を踏み外した場合を考えよう。この際には瞬間的に横方向に大きな加速度が生ずる。外乱加速度とそれによって生ずる外乱力がこのようにインパルス的であれば、歩行機械は支持脚周りに一瞬浮き上がったとしても、すぐにもとの姿勢に復帰し完全に転倒しないはずである。しかし、その瞬間の傾斜度安定余裕は明らかに一時的に負になり、傾斜度安定余裕の意味からは転倒しなければならないことになる。従って瞬間的に大きい外乱インパルスが加わる場合には「傾斜度安定余裕」は不適と考えられる。

このような観点から、転倒の現象を瞬間的な力の方向で扱うのではなく、外乱として働く「エネルギー」に注目し、姿勢を保持しようとするポテンシャルエネルギーの大きさ、逆に言えば完全に転倒するまでに供給しなければならないエネルギーの大きさによって安定性を評価しようとする考え方が浮上する。このような立場の評価基準として提案されたものが5) の「エネルギー安定余裕 (Energy Stability Margin)」である。この「エネルギー安定余裕」を基に転倒する過程で支持脚周りに重心がどれだけ持ち上げられるかを評価する。

たとえば、「安定余裕」を最大化する Fig.2-1 (2) の姿勢では、傾斜面上側より下側へ転倒するとき重心の浮き上がり量が少ない。そのため歩行機械は下側に転倒しやすい。

逆に、傾斜度安定余裕を最大化する Fig.2-1 (3) の姿勢では、上側へのポテンシャルの障壁 (potential barrier) が小さく、そちら側に転倒しやすい。これらに対し、Fig.2-1 (4) は斜面上下の「エネルギー安定余裕」を等しくする姿勢であり、すべての方向の「エネルギー安定余裕」を最大化する姿勢になっている。

## 2.1.2 比較実験

このように、不整地での歩行機械の安定性の評価基準にはいくつかのものが考えられているが、実際にはどの評価基準が妥当なのであろうか。「安定余裕」や「傾斜度安定余裕」よりは「エネルギー安定余裕」が望ましいのは明らかと思われる。しかし実際の現象としては、歩行機械が外乱力を受けたとき、脚が一瞬でも浮くとそれをきっかけとして歩行機械が振動を始め、それが原因で転倒することも予測される。そしてもしもこのように考えると、「エネルギー安定余裕」と「傾斜度安定余裕」を組み合わせたそれらの中間的な評価基準が必要であることも推定される。そのため、本研究では以下に示すような簡単な転倒実験による安定性評価の妥当性を検討した。実験装置は、Fig.2-2 に示すような質量 1.88 kg、前後の脚の間の幅 225.0mm、そして支持面から 145mm 位置にウエイトをスライドして重心位置を変えられる歩行機械モデルを、最大傾斜度  $\theta = 13.6^\circ$  の可動式傾斜面に載せたものである。可動式傾斜面は水平な支持面に対してスライドできるようになっており、一端から常にバネで引っ張り支持面他端のストッパーに衝突させることで、その上の歩行機械モデルに外乱力を与えるものとなっている。実験は、歩行機械モデルを可動式傾斜面にのせ、バネの引き延ばし量を次第に増加させながら可動式傾斜面を何度も衝突させ、載せていた歩行機械モデルが倒れたバネの伸展量（外乱の強さに対応）を記録することで行った。なお、この際脚が一瞬離れてももとの復帰して安定すれば転倒とはみなさないこととした。Fig.2-3 が実験結果である。これは、歩行機械モデルの重心位置（横軸）に対して転倒を始めるバネの引き延ばし量（縦軸）を、傾斜面上側と下側それぞれから衝突させた場合を分けて記したものである。この実験から、上下両方に対して最も倒れにくい重心位置は  $x = 151[\text{mm}]$  であることがわかった。なおこの実験装置についての、上述した「安定余裕」、「傾斜度安定余裕」、および「エネルギー安定余裕」のそれぞれを最大化する重心位置、つまり Fig.2-1 における  $x_\alpha x_\beta x_\gamma$  に相当する重心位置は、それぞれ  $x_\alpha = 112.5[\text{mm}]$ 、 $x_\beta = 174.0[\text{mm}]$ 、 $x_\gamma = 153.0[\text{mm}]$  であった。事前の予測では「エネルギー安定余裕」を最大化する姿勢と「傾斜度安定余裕」を最大化する姿勢との中間的な姿勢に最適点があると予測したが、この実験結果と計算値の比較から

すると安定性の評価基準としては「エネルギー安定余裕」を単体で使用するのが最適であると結論づけられる。

Fig.2-4 は同様の実験を歩行機械型のモデルで実施した際の様子でありこの実験からも上述の実験結果と同じ傾向を得ている。

### 2.1.3 正規化エネルギー安定余裕の提案

以上の考察から、「エネルギー安定余裕」が不整地での歩行機械の安定性評価基準として望ましいことが明らかとなった。そのため、筆者らは以降「エネルギー安定余裕」を基本的に使用していくことにする。ただし、Klein らによって提案されたこの「エネルギー安定余裕」は、物理的には十分妥当な評価基準であるが、これを歩行機械の安定性の評価基準として使用していくためには若干の問題が残されている。それは、姿勢を保持するポテンシャルエネルギーを評価基準そのものとして使用しているため、歩行機械の重量がその評価の中に残されている点である。

歩行機械の自重が増大すると、歩行機械の立位姿勢が変わらなくても「エネルギー安定余裕」の概念では安定余裕は比例的に増大する。このことは、たしかに姿勢保持のためのポテンシャルエネルギーが自重に比例して増大するという意味では合理的である。しかし自重が増加すると、それに比例して外乱を受ける効果も増大するのが普通である。たとえば、歩行機械が凹凸を踏み外したり急停止などした場合の動的な外乱の効果は、自重（質量）の大きさに比例する。こう考えると「エネルギー安定余裕」の評価値は自重とは無関係に定義する方が望ましいと考えられる。そのため、本研究では「エネルギー安定余裕」を自重で正規化した「正規化エネルギー安定余裕 (Normalized Energy Stability Margin)」を新たに導入する。なお、これは省略して「NE安定余裕」、あるいは単に「NESM」と示し、 $S_{NE}$ と表記することにする。「NE安定余裕  $S_{NE}$ 」は転倒中に歩行機械の重心が描く軌道の最高点と初期位置との（絶対座標系での）鉛直距離を示すものであり次式で与えられる。

$$S_{NE} = h_{max} - h_0 \quad (1)$$

「NE安定余裕」は実質的には従来からの「エネルギー安定余裕」とほとんど変わらないものであるが、i) 上述したように歩行機械の自重とは無関係となり、歩行機械のサイズ、立位姿勢についての安定性が評価できる、ii) 水平面に置かれた歩行機械の「安定余裕」に対比させて考えると、この評価基準は歩行機械の重心が歩行面に接しているときの

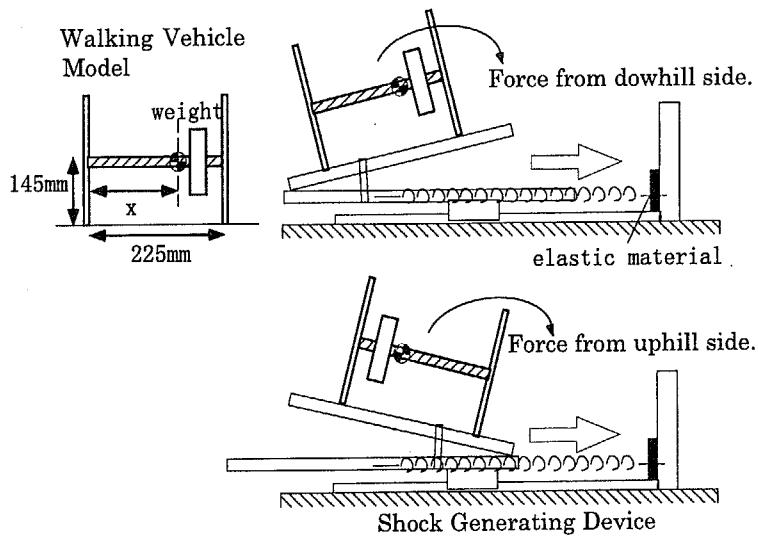


Fig.2-2 The experimental device.

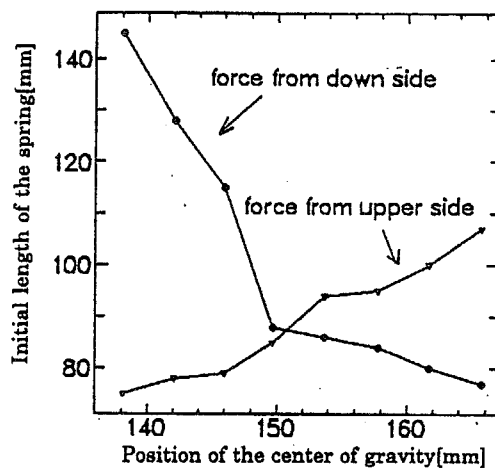


Fig.2-3 The experimental results showing the conditions to start tumbling.

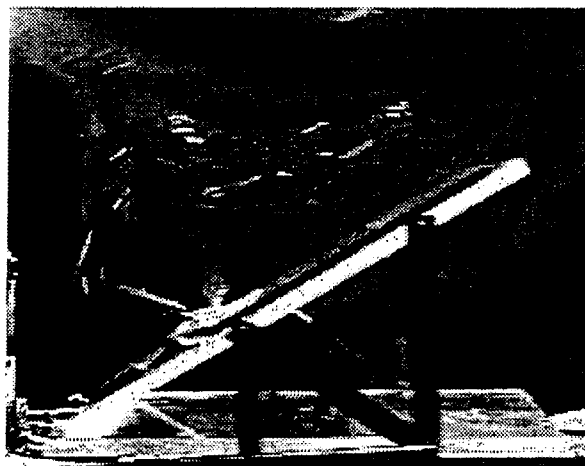


Fig.2-4 Another experiment for tumble using walking vehicle models.

「安定余裕」と一致するものとなっており、従来からの概念との連続性があり直感的に理解しやすい、といった特徴を有している。

なお「 $NE$ 安定余裕」は、さらに歩行機械の重心高さなどの基準寸法で正規化すれば完全な無次元化評価基準にすることも可能である。しかし、サイズが安定性に及ぼす効果を評価に残しておいた方が安定性を適切に評価できる考えられるため、ここではあえて長さの次元の評価基準としている。

## 2.2 $S_{NE}$ 等高線とその特性

前節では、新たに歩行機械の安定性評価基準として  $NE$  安定余裕  $S_{NE}$  を導入した。今後、この評価基準  $S_{NE}$  を用いて不整地で安定性を確保した歩容計画を検討していく。さて、このような評価基準を用いて任意の凹凸面上での対地適応的な歩容を考察する過程において、まず始めに任意の地形上の任意の地点に歩行機械の重心が置かれたとき、目標の  $NE$  安定余裕  $S_{NE}$  以上の安定性をすべてのヨー角方向に生成する姿勢を生成する手法、いわば安定立位姿勢の生成手法の誘導が不可欠となる。従来の安定性に関する研究では、任意の姿勢での安定性を求めることは普通に論じられていたが、逆に安定性の条件からその安定性評価量を最大化する姿勢を誘導する議論はあまり行われていなかった。「安定余裕  $S$ 」についてかつて、歩行面に下ろした重心点の周りに安定余裕  $S$  の半径の円を求め、その円に外接する支持脚多角形を作る歩容計画が概念的に議論されたのが唯一の前例と思われる。本節では、不整地における歩容計画を実行するため、一定の「 $NE$  安定余裕  $S_{NE}$ 」を与える点の集合を結んだ「 $S_{NE}$  等高線」の概念を導入し、その特性を論じておくことにする。

### 2.2.1 誘導の準備

「 $S_{NE}$  等高線」の誘導に当たって導入した仮定と用語を以下に示す (Fig.2-5 参照)。

- 1) 4足歩行機械は、すべての足が常に同一平面上に乗った歩行を行うものと想定し、その平面を「接地面」と呼ぶ。ただし、不整地移動ではもちろんこの設定は近似的にしか成り立たないため、この面の誘導はたとえば最小二乗法などによって誘導することになる。接地面の誘導法は本論文では触れない。
- 2) 歩行機械の重心は Fig.2-5(a) のように  $G$  点とし、 $G$  から接地面に下ろした垂線の足を  $G_c$  点とする。 $G$  点と  $G_c$  点間の距離は  $h$  とする。



- 3) 歩行機械は接地面に対して任意の姿勢をなすものとする。歩行機械の胴体座標系  $\Sigma(Gxyz)$  は, Fig.2-5(a) のように重心  $G$  を原点とし, 胴体前方を  $x$  軸, それと直交して胴体平面上に  $y$  軸, さらにそれらと右手座標系をなすように胴体上方に  $z$  軸をとることで構成する。
- 4) 接地面上の点  $G_c$  には, Fig.2-5(a) のようにその点を原点とする接地面座標系  $\Sigma_c(G_c x_c y_c z_c)$  を想定する。これは直線  $G_c G$  を  $z_c$  軸とし,  $x$  軸を  $z_c$  軸方向から接地面に投影した軸を  $x_c$  軸,  $x_c$  軸に直交する接地面上の軸を  $y_c$  軸とした直交座標系である。
- 5) 絶対座標系  $\Sigma_0(0x_0y_0z_0)$  は, その  $z_0$  軸が重力線方向を向くものとして定義する。
- 6) 接地面の最大傾斜線  $l_{max}$  が水平面と成す角度は Fig.2-5 のように  $\theta$  とし, これを「最大傾斜角」と呼ぶ。
- 7) 接地面上において, 接地面座標系の  $x_c$  軸と最大傾斜線とのなす角度は「最大傾斜線方位角  $\xi$ 」と示す。
- 8) 接地面上の支持脚のうち, お互いに隣り合う2脚を結んだ直線を「支持脚直線  $l_s$ 」と呼ぶ。また,  $l_s$  と水平面とのなす角度を  $\theta_s$  と示す。
- 9) 歩行機械の重心  $G$  からある支持脚直線  $l_s$  に下ろした垂線の足を「転倒中心点  $P$ 」と呼ぶ。また,  $G_c$  と  $P$  との距離を  $d$  と示す。
- 10) 点  $G_c$  から転倒中心点  $P$  へ伸ばした直線を「放射軸線  $l_e$ 」, 接地面座標系の  $x_c$  軸と放射軸線とのなす角度を「放射軸線方位角  $\eta$ 」と呼ぶ。また,  $l_e$  と水平面とのなす角度を  $\theta_e$  と示す。
- 11) 4足歩行機械の機械モデルに定着した脚の呼称は, 胴体座標系  $xy$  平面における第1象限に存在する脚を leg 1 とし, 以下象限番号に応じて leg 2, leg 3, leg 4 と呼ぶ。

## 2. 2. 2 $S_{NE}$ 等高線の誘導

歩行機械が転倒する場合, その転倒の過程における歩行機械の重心は, Fig.2-5(b) のように1つの支持脚直線  $l_s$  回りに回転して転倒すると考えられる。そのため, このような転倒過程での  $NE$  安定余裕  $S_{NE}$  はその支持脚直線  $l_s$  上に存在する転倒中心点  $P$  の回りに重心が回転した時の重心の初期位置  $G$  から最高点  $G_{max}$  までの鉛直方向の高さの差で求めることができる。そして,  $S_{NE}$  等高線は,  $NE$  安定余裕  $S_{NE}$  を等しくするすべての転倒中心点  $P$  の集合として接地面内に描かれる閉曲線として定義できる。

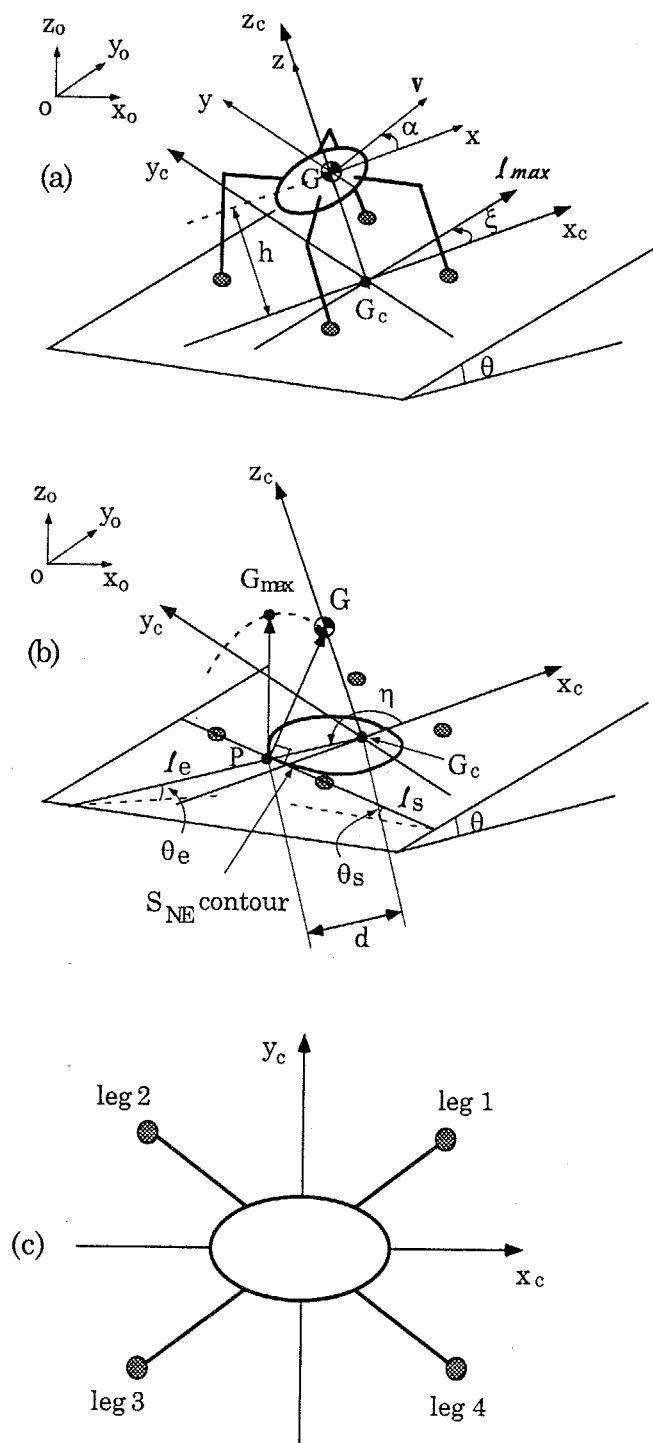


Fig.2-5 Notation and coordinates used for the following discussions.

Fig.2-5(a) のように傾斜面に立つ歩行機械についての「 $S_{NE}$  等高線」を誘導しよう。  $P$  からみた重心の絶対座標高さ  $(\vec{P}G)_{zo}$  と重心が転倒するときの軌道の最高点の高さ  $(\vec{P}G_{max})_{zo}$  は次式で表される。

$$(\vec{P}G)_{zo} = h \cos \theta + d \sin \theta_e \quad (2)$$

$$(\vec{P}G_{max})_{zo} = \sqrt{h^2 + d^2} \cos \theta_s \quad (3)$$

ただし,  $\theta_s, \theta_e$  はそれぞれ  $l_s, l_e$  軸が水平面とのなす角度を示し次式のように与えられる。

$$\sin \theta_e = -\cos(\eta - \xi) \sin \theta \quad (4)$$

$$\cos \theta_s = \sqrt{1 - \sin^2(\eta - \xi) \sin^2 \theta} \quad (5)$$

このとき  $NE$  安定余裕  $S_{NE}$  は, これらの式を

$$S_{NE} = (\vec{P}G_{max})_{zo} - (\vec{P}G)_{zo} \quad (6)$$

に代入することで求まり,  $S_{NE}$  等高線は上式の関係を満たす転倒中心点  $P$  を接地面座標系  $\Sigma_c (G_c x_c y_c z_c)$  上で求めた  $(d \cos \eta, d \sin \eta, 0)$  の点の集合として求まる。よって  $S_{NE}$  等高線の描画方法は,  $NE$  安定余裕  $S_{NE}$ , 最大傾斜角  $\theta$ , 最大傾斜線方位角  $\xi$  が与えられたとき, 放射軸線方位角  $\eta$  を  $0 \leq \eta < 2\pi$  の範囲で変化させ, それぞれの放射軸線方位角  $\eta$  方向に対応する  $G_c$  から  $P$  までの距離  $d$  を算出して得られる。なお,  $d$  は  $S_{NE}$ ,  $\theta$ ,  $\xi$ ,  $\eta$  の関数であり, 以下のように誘導できる。

$$d = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - AC}}{A} \quad (7)$$

ただし, ここで  $A = \sin^2 \theta_e - \cos^2 \theta_s$ ,  $B = (S_{NE} + h \cos \theta) \sin \theta_e$ ,  $C = (S_{NE} + h \cos \theta)^2 - h^2 \cos^2 \theta_s$  である。この式で誘導できる  $d$  の解は 2 つあるが  $d < 0$  である解は使用しない。2 解とも  $d > 0$  である場合は, 同一放射軸線方位角  $\eta$  に対して実際に 2 つの解が存在することを意味している。

$S_{NE}$  等高線の実際の誘導例を Fig.2-6 に示す。ここで (a) は最大傾斜角  $\theta = 0^\circ$ , つまり水平面での  $S_{NE}$  等高線であり, (b) は  $\theta = 15^\circ$  の例である。なお, ここでは重心と斜面との距離  $h$  は 380[mm] とし, 最大傾斜線と  $x_c$  軸は一致し  $\xi = 0$  であると考えている。等

高線のわきに付した数字は  $NE$  安定余裕の値 [mm] である。Fig.2-6(a) から  $\theta = 0^\circ$  における  $S_{NE}$  等高線は、「安定余裕」の考え方と等しく、 $S_{NE} = 0$  の点を中心とした同心円状となること、また Fig.2-6 (b) から  $\theta = 15^\circ$  では  $S_{NE}$  等高線は斜面下側方向に膨らんだ特異な形状になることが分かった。なおこの等高線は、すでに述べたように斜面をなす接地面上に描かれたものである。

### 2. 2. 3 $S_{NE}$ 等高線の性質

Fig.2-6(b) の  $S_{NE}$  等高線には 2 つの特異点が存在している。それらは重心  $G$  から接地面へ下ろした垂線の足  $G_c$  と、重心からの重力線が接地面を横切る点  $\underline{G}$  である。それぞれは以下の特徴を有した点となっている。

(1)  $G_c$  点は、この周りに  $S_{NE}$  等高線を描く中心点である。そのため  $G_c$  点上では特異的に支持脚直線の向きは全方向を向くことが可能である。これらのうち、支持脚直線が最大傾斜線と直交する向きへの  $NE$  安定余裕が最大であり（その最高値を  $S_{NE}(G_cmax)$  とする）、支持脚直線の方角を傾けるに従い  $NE$  安定余裕は徐々に減少し、最大傾斜線と一致した時点で  $S_{NE} = 0$  となる。

(2)  $\underline{G}$  点は、その真上に重心が存在する点である。そのため、 $\underline{G}$  点周りの回転で重心を回転させる場合、その回転による重心の位置は、その回転軸の方向に係わらず始めの重心の位置より上にいくことがない。つまり、支持脚直線が  $\underline{G}$  点を通るのであれば、その支持脚直線の方角にかかわらず常に  $S_{NE} = 0$  が成り立つ。

上記 2 つの特異点があることから傾斜面における  $S_{NE}$  等高線は次の性質を有することになる。

i)  $S_{NE}$  等高線における  $S_{NE} = 0$  の点は、水平面では  $\underline{G}$  が  $G_c$  と重なり  $G_c$  の 1 点のみであるが、傾斜面における  $S_{NE} = 0$  の点は実は 1 点とはならず、 $\underline{G}$  点と  $G_c$  点とを結ぶ線分を直径とする円になるという興味深い特徴を示す。この理由は次のように説明できる。放射軸線  $G_cP$  は  $P$  点で直交する支持脚直線  $l_s$  を有するが、もしもこの  $l_s$  が  $\underline{G}$  点を通ればその上の  $P$  点では  $S_{NE} = 0$  となる。このような  $P$  点は  $\angle \underline{G}PG_c = 90^\circ$  を成す点の集合となる。一方、円の直径を弦とする円周角は  $90^\circ$  を成す幾何学的性質がある。よってこのような  $P$  点の集合は  $\underline{G}G_c$  を直径とする円と理解できる。

ii)  $\underline{G}$  点と  $G_c$  点とを結ぶ線分を直径とする円の内部は  $0 < S_{NE} < S_{NE}(G_cmax)$  の  $S_{NE}$  等高線が描かれ、円の外部には  $S_{NE} > 0$  の  $S_{NE}$  等高線が無限に描かれる。 $S_{NE} = 0$  の内

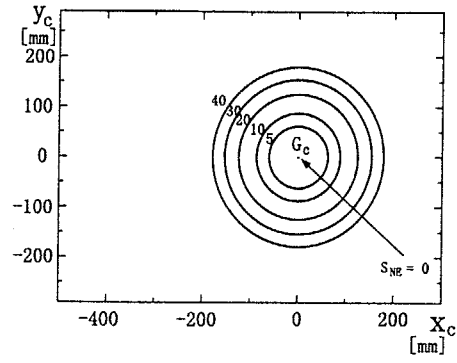


Fig.2-6(a)  $S_{NE}$  contour in the case of 0 degrees.

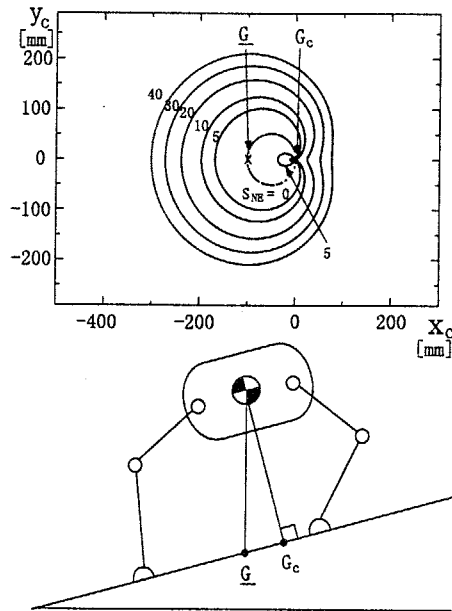


Fig.2-6(b)  $S_{NE}$  contour in the case of 15 degrees.

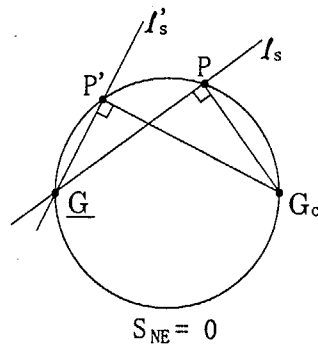


Fig.2-6(c) The extended figure of  $S_{NE} = 0$  in Fig.2-6(b).

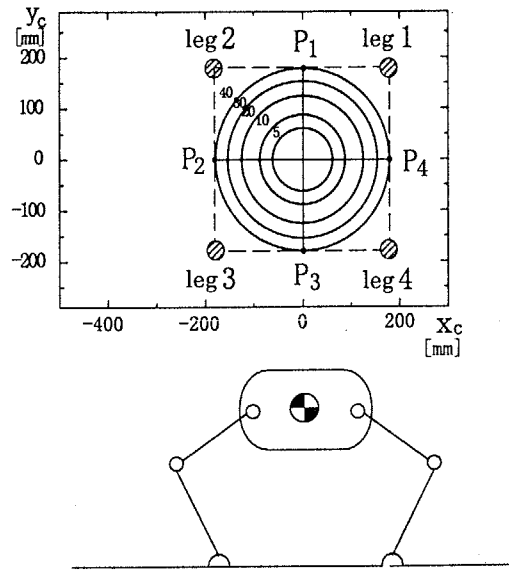


Fig.2-7(a) The robot takes the posture which possesses  $S_{NE} = 40$  for all directions on 0 degree slope.

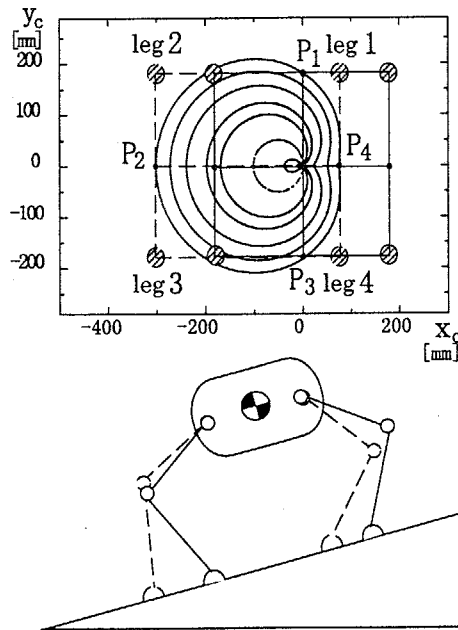


Fig.2-7(b) The feet on 15 degrees should be shifted just like dotted line so as to keep the same  $S_{NE}$  as (a).

部と外部に同じ高さの等高線が生じることは立体的な回転軌跡の特性からもたらされるものであり、式(7)の2次方程式で表される解が2つ存在することに対応したものとなっている。Fig.2-6(b)の図においては $S_{NE}(G_c max) \approx 10$ となり、その値以下を有する $S_{NE}$ 等高線の1つとして $S_{NE} = 5$ が $S_{NE} = 0$ の円の内外部両方に存在している。

なお、導入した「 $S_{NE}$ 等高線」の安定化姿勢への利用法を最後に示しておくことにする。 $\theta = 0^\circ$ において $S_{NE} = 40$ を有するように $F_1 \sim F_4$ をFig.2-7(a)のような脚配置に設定することを計画しようとするとき、 $\theta = 15^\circ$ においてこれと全く同じ姿勢を保持して立脚しようとするとき、Fig.2-7(b)の実線姿勢のように斜面下側のNE安定余裕が10以下になり上側へは40を大幅に越えた値となる。(a)と同じように $\theta = 15^\circ$ においても4方向に40のNE安定余裕を有するようにするには、「 $S_{NE}$ 等高線」に接する条件から(b)の点線に示すような姿勢であることが分かる。

## 第3章 間歇クロール歩容の提案とその生成原理

不整地環境における作業型移動機械としての4足歩行機械の利用を想定すると、前章で導入したNE安定余裕を最大化するような歩容が最も望ましい。本章では、そのような発想のもとに生まれた「間歇クロール歩容」と呼ぶ歩容を新たに導入し、安定性と移動速度の点から最も効率の良い脚軌道の基準形を誘導する。さらに、任意の目標方向への追従を可能とする「間歇型追従歩容」の導入を行い、移動性能の向上を図る。

### 3.1 間歇クロール歩容の提案

安定性を保持しながら最大限滑らかな移動を可能とする、乗り物としての4足歩行機械のための歩容として、従来までクロール歩容 [12] や、クロール歩容とトロット歩容を融合する静動融合歩容 [30] などが検討されてきた。しかしクロール歩容は、Fig.3-1(a)のように胴体重心を等速に推進させようとするため、支持脚3角形を切り替える Fig.3-1(a)の(1)(3)の歩行状態では著しく安定性が低下するという問題を有していた。

それに対し、本研究で提案しようとする「間歇クロール歩容 (Intermittent Crawl Gait)」は、4足歩行運動時の静的安定性を出来る限り最大化するような歩容である。これは Fig.3-1(b) に示すように、まず(1)~(2)のように胴体重心を支持脚3角形の中のできるだけ安定性の高い位置に静止させ、その状態で残りの1脚を復帰運動させその遊脚を接地する。ついで4脚支持状態となった(3)の状態では重心移動を行い、新たな支持脚3角形の内部に重心を移動させて重心運動を静止する。そしてまた後脚の復帰、前脚の復帰を行い重心を移動させるというようにして、結果的に(6)に示すようなジグザグな重心移動軌道を辿りながら推進を行なうものである。

このような間歇クロール歩容は、特に変わった歩容ではなく、これまでもその安定性の高さや制御の容易さから、4足歩行機械の歩容として使用された実例はあるのではないかと推測される。しかし、この間歇クロール歩容について、その詳細な歩容生成法を体系的に取り扱った研究は、少なくとも筆者らの知る限り皆無であった。そこで本研究では、任意の形態の歩行機械を対象とし、静的安定性を最大化する最適化された間歇クロール歩容の生成法を検討することとする。



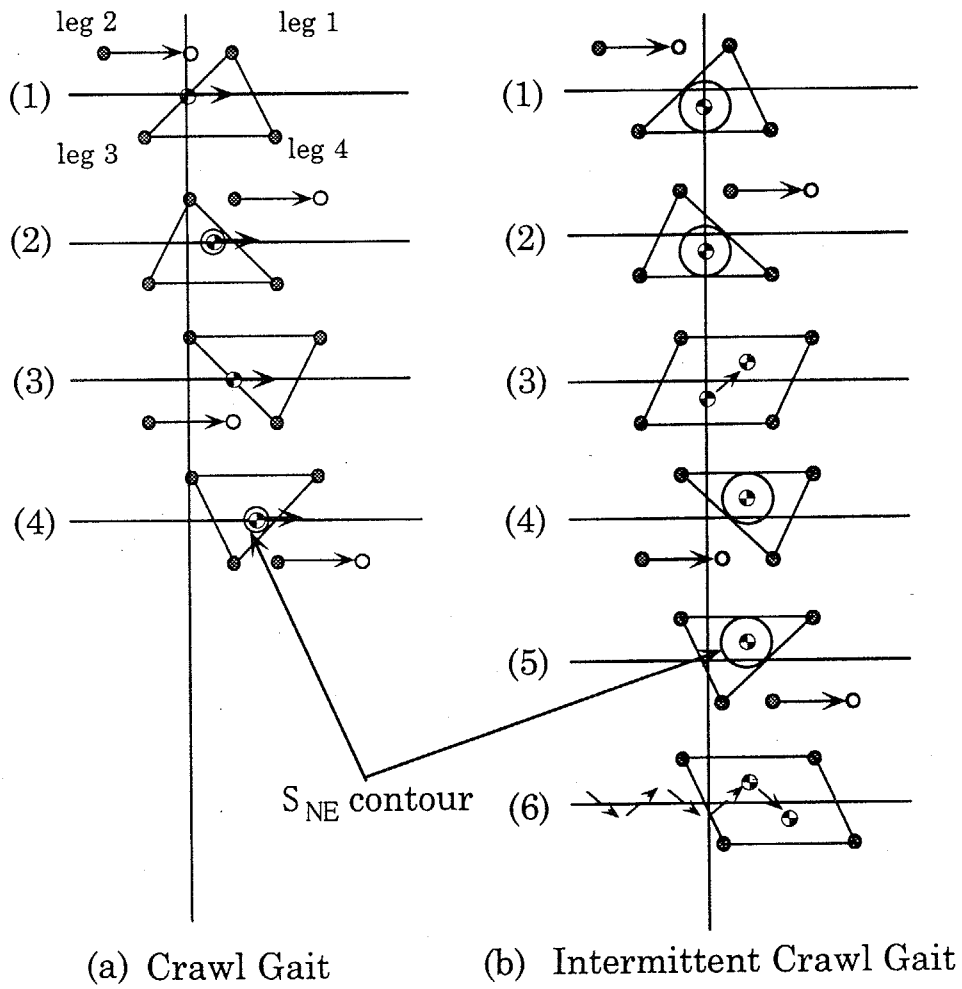


Fig.3-1 Comparison of motion and stability of Crawl Gait and Intermittent Crawl Gait.

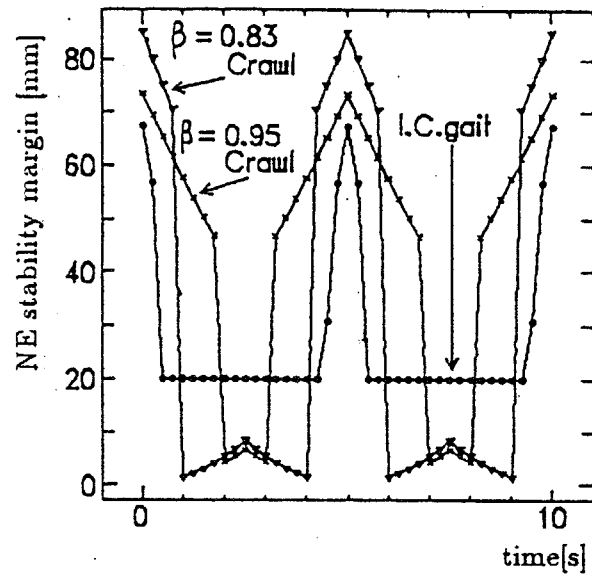
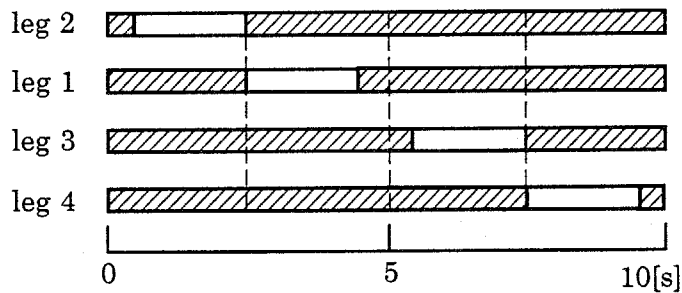
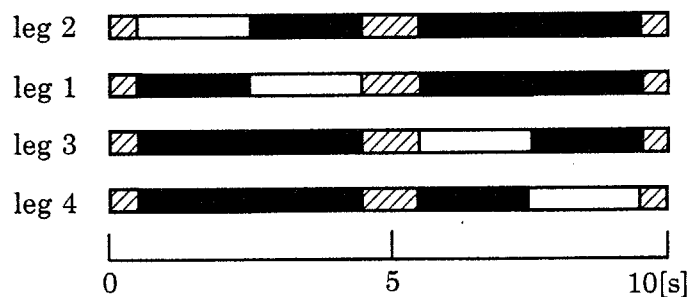


Fig.3-2 Comparison of NE stability margin for two Crawl Gaits ( $\beta = 0.83, 0.95$ ) and Intermittent Crawl Gait.



(a) crawl gait



(b) intermittent crawl gait

- swing mode
- support mode while the center of gravity moves
- support mode while the center of gravity stops

Fig.3-3 Comparison of time schedules for Crawl Gaits and Intermittent Crawl Gait.

なお、従来からのクロール歩容と提案する間歇クロール歩容によって歩行する際、 $NE$ 安定余裕がどのように変動するか、誘導した結果を Fig.3-2 に示す。ここには1周期(ある足を遊脚化してから次にその足を遊脚化するまでの時間)運動中における間歇クロール歩容、その間歇クロール歩容と平均推進速度の等しい $\beta$ (デューティ比：1脚が1周期に対して支持脚でいる時間の割合)が0.83のクロール歩容、そしてより低速だが安定性を高めた $\beta = 0.95$ のクロール歩容の3例についての $NE$ 安定余裕を示している。なお、それぞれの歩容における遊脚のタイミングは Fig.3-3 に示す通りである。Fig.3-2 によるとそれぞれの $NE$ 安定余裕の最小値を比較すると、間歇クロール歩容は確かに安定性を常時高く保つことの出来る歩容であることが分かる。

### 3.2 歩容誘導のための準備

間歇クロール歩容の具体的な生成手法を論ずるために使用する設定条件、および使用する用語と記号は 2.2.1 の 1)~11) に加えて以下の項目である。

12) 歩行機械の進行方向は、常時接地面と並行するものとする。そして、その方向を示す進行方向ベクトル  $\mathbf{v}$  と、胴体座標系の  $x$  軸ベクトルを接地面に投影したベクトルとなす角度は「側行角 $\alpha$ 」と呼ぶ。

13) 4足歩行機械が任意の方向に推進するときの脚の呼称は、進行方向前方の2脚のうち的一方を脚  $f$  とするとき、他方を脚  $\bar{f}$ 、脚  $f$  の後脚を脚  $r$ 、そして脚  $\bar{f}$  の後脚を脚  $\bar{r}$  とする。

14) 「支持脚直線  $l_s$ 」のうち、ある脚  $n$  を遊脚化することではじめて隣接脚となる、脚  $n$  の両隣の脚で構成される支持脚直線は  $l_s(n)$  と表記する。

15) ある放射軸線が任意の  $S_{NE}$  等高線と2点で交わり、2本の直線がそれぞれこれらの交点において当該放射軸線と直交する平行姿勢をとるとき、この2本の支持脚直線を  $S_{NE}$  等高線に関する1組の「挟平行支持脚直線」と呼ぶ。

16)  $(l_s(f), l_s(\bar{r}))$  のセットで構成される1組の挟平行支持脚直線のうち、この2本の支持脚直線とも脚  $\bar{f}$  と脚  $r$  の脚可動範囲を通過するとき、これらを「有効な挟平行支持脚直線」と呼ぶ。このことは  $(l_s(\bar{f}), l_s(r))$  のセットについても同じである。

17) 任意の立脚姿勢における4足歩行機械の $NE$ 安定余裕は、その立脚姿勢でのすべての支持脚直線に関する $NE$ 安定余裕の最小値を意味するものとする。

### 3.3 基準歩容の誘導

4足歩行機械の不整地における歩容制御では、地表面の凹凸がある場合には地形適応型の歩容を選択し、そのような外乱が無くなる平坦地では、安定性や移動速度など最大化する最も効率の良い基準歩容を自動的に選択できるような特性を持たせるべきである。以前このような歩容が「基準収束型適応歩容 [12]」として提案されていたが、間歇クロール歩容を考える場合にも同様な歩容の導入が必要と考えられる。ただしこのような歩容を可能にするためには、間歇クロール歩容の「基準歩容」を明確化しておくことが必要である。従来まで、クロール歩容における基準歩容の誘導は行われてきたが [12]、間歇クロールの基準歩容はまだ検討していなかった。そのためその誘導法を以下に論ずることにする。

#### 3.3.1 間歇クロール歩容の基本特性

まず前提として、間歇クロールの基準歩容とは、その基本運動パターンを Fig.3-1(b) のように遊脚化と重心移動のシーケンスが「leg 2 遊脚→leg 1 遊脚→重心移動→leg 3 遊脚→leg 4 遊脚→重心移動」の順に固定しているものとし、その中で一周期運動中の  $NE$  安定余裕とストローク長をそれぞれ最大化、最長化するものであるという立場をとる。そしてこの歩容では、1周期運動中2回、4脚支持相においてのみ重心が移動し、この重心移動は2回とも対角の位置にある脚（脚  $f$ —脚  $\bar{r}$ 、あるいは脚  $\bar{f}$ —脚  $r$ ）を結ぶ支持脚直線上を重心が横切るようにして行われる。

このような特徴を有する間歇クロール歩容では、Fig.3-1(b) の歩容時の脚軌道を胴体座標系からみた Fig.3-4 から明らかなように、1周期運動中  $NE$  安定余裕が最小となる転倒は、通常対角脚（脚  $f$ —脚  $\bar{r}$ 、あるいは脚  $\bar{f}$ —脚  $r$ ）が構成する支持脚直線回りに生ずる。そしてこのような対角脚によって構成される支持脚直線は、1周期運動中合計4回、つまり Fig.3-4 の例では (1)(2)(4)(5) の各支持姿勢で生じ、これらの支持脚直線は、3.2 節 14) の表記法によればそれぞれ  $l_s(r)$ 、 $l_s(f)$ 、 $l_s(\bar{r})$ 、 $l_s(\bar{f})$  と示される。そのため基準間歇クロール歩容は、これらの支持脚直線に関する  $NE$  安定余裕の最小値を最大化するものであり、結果的にこれら4本の支持脚直線についての  $NE$  安定余裕を等しくするものとなる。このような特性から基準間歇クロール歩容には、以下に示す特有の性質がさらに誘導できる。

性質 i) 重心移動の前後には、「前脚着地 → 4脚支持相での重心移動 → 対角位置の後脚遊脚化」というシーケンス運動を行い、その前後の支持脚3角形の  $NE$  安定余裕は等

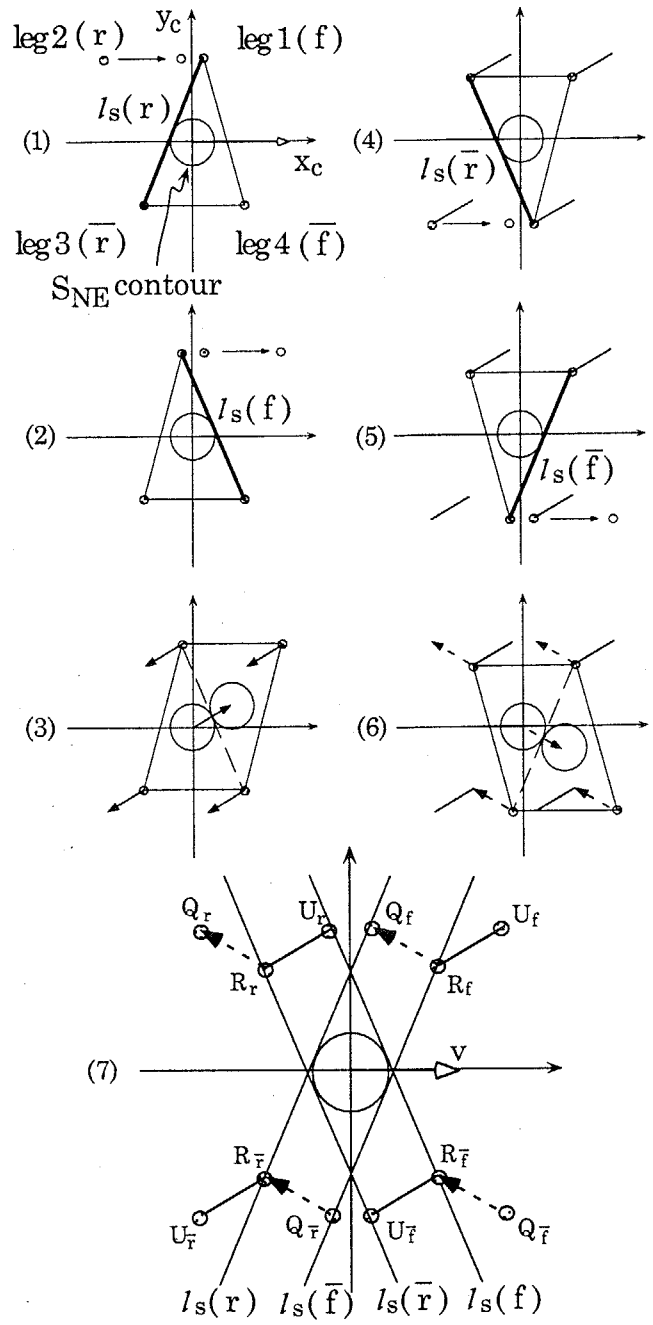


Fig.3-4 Trajectory of Intermittent Crawl Gait viewed from the body coordinates.

しい。そのため、この前後に現れる、対角脚によって構成される支持脚直線 2 本は同一  $S_{NE}$  等高線を挟んで互いに平行な 1 組の「挟平行支持脚直線」を構成する。例えば Fig.3-4 の (2)→(3)→(4) の動作中においては  $l_s(f)$  と  $l_s(\bar{r})$  とが  $S_{NE}$  等高線の挟平行支持脚直線であり、Fig.3-4 の (5)→(6)→(1) の動作中においては  $l_s(\bar{f})$  と  $l_s(r)$  とが  $S_{NE}$  等高線の挟平行支持脚直線となる。

性質 ii) 上述 4 本の支持脚直線についての NE 安定余裕はすべて等しいため、これらは同一の  $S_{NE}$  等高線を挟み合う 2 組の挟平行支持脚直線となる。

性質 iii) 4 脚支持相での重心移動運動は、重心座標系からみれば支持脚が 4 脚とも同一方向に移動する運動であるため、4 脚とも長さが同一で互いに平行な脚軌道をたどる。そして 1 周期運動中に 4 脚支持相が 2 回あるため、1 周期間の脚軌道はこのような性質の 2 種類の脚軌道の組み合わせで Fig.3-4(7) に示す V 字形（以後、V と略す）を構成する。そしてこれら 4 脚の V は互いに合同図形であり、

$$V Q_f R_f U_f \equiv V Q_r R_r U_r \equiv V Q_{\bar{r}} R_{\bar{r}} U_{\bar{r}} \equiv V Q_{\bar{f}} R_{\bar{f}} U_{\bar{f}} \quad (8)$$

となる。

### 3.3.2 誘導手順の概要

基準間歇クロール歩容は Fig.3-5 に示す手順で誘導できる。

#### 3.3.3 A 「準備」

基準歩容を誘導する上での準備を行なう。まず最初に、重心  $G$  と接地面との距離  $h$  により定まる脚可動範囲を、接地面座標系の  $G_c$  を原点とする  $x_c y_c$  平面に描く。ここでは、機械モデルとして開発した TITAN VII の脚可動範囲をもとに議論をしており、TITAN VII は  $z_0$  軸回りに円筒座標運動を行う脚であるため、その可動範囲は扇型としている。ただし、本節で誘導する基準歩容の誘導法は、脚可動範囲の形状には依存しないため、脚可動範囲がどのように与えられても本手法は適用可能である。

さらに、脚可動範囲と歩行機械の進行方向（側行角  $\alpha$ ）関係から、leg1~leg4 の呼称を左前脚  $f$  と右前脚  $\bar{f}$ 、左後脚  $r$  と右後脚  $\bar{r}$  に割り当てる。

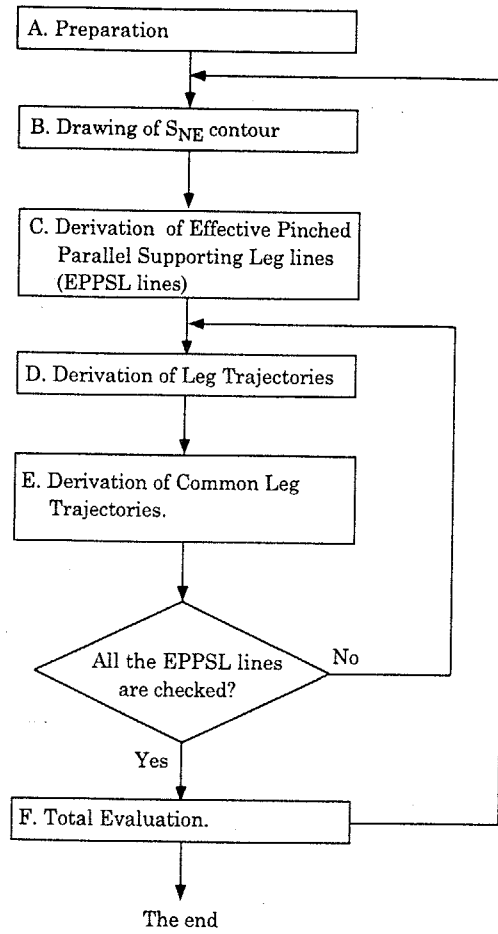


Fig.3-5 Flow chart to derive the standard foot trajectory.

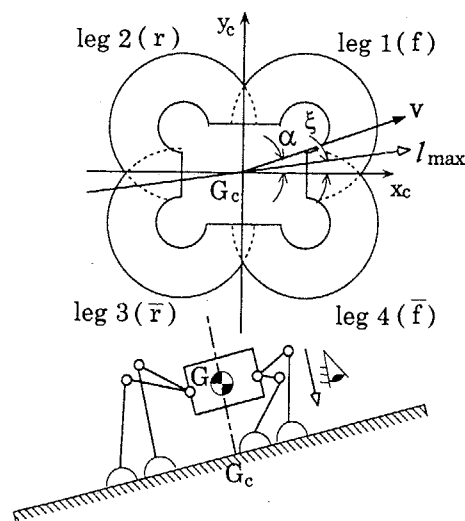


Fig.3-6 The range of each leg for TITAN VII.

### 3.3.4 B「安定余裕の設定」

$x_c y_c$ 平面に  $G_c$ を原点として十分大きい  $NE$ 安定余裕の  $S_{NE}$ 等高線を描く (Fig.3-7).  $S_{NE}$ 等高線は, すべての放射軸線  $l_c$ についての  $NE$ 安定余裕  $S_{NE}$ が等しくなる転倒中心点  $P$ の集合である. そのため,  $NE$ 安定余裕が  $S_{NE}$ であるような点  $P$ が原点  $G_c$ から放射軸線方位角  $\eta$ の方向に  $d$ だけ離れたところに存在するとしたとき, その距離  $d$ は  $NE$ 安定余裕  $S_{NE}$ , 最大傾斜角  $\theta$ , 最大傾斜線方位角  $\xi$ , 放射軸線方位角  $\eta$  の4変数を30頁の(7)式に代入することにより求められる. 等しい  $S_{NE}$ を有するすべての点  $P$ は,  $0 \leq \eta < 2\pi$ の各方位角における  $d$ を誘導することによって求まり, そうして得られた点  $P$ を結んで  $S_{NE}$ 等高線が求まる. なお, 関数の出力  $d$ には,  $S_{NE} = 0$ の等高線を境として2.2.3のii)で述べた特性を示すが, ここではこのような特異領域は無視し, 通常の領域のみについて考察する.

### 3.3.5 C「有効な挟平行支持脚直線群の誘導」

このルーチンでは, 与えられた  $S_{NE}$ 等高線について有効な挟平行支持脚直線の候補を  $(l_s(f), l_s(\bar{r}))$  と  $(l_s(\bar{f}), l_s(r))$  について方位角  $0 \leq \eta < 2\pi$ の範囲で誘導する. Fig.3-8に示す4本の直線は, 誘導された2組の「有効な挟平行支持脚直線」の一例である.

### 3.3.6 D「各脚の脚軌道候補の選出」

ここでは, Cで誘導された「有効な挟平行支持脚直線」群の中から,  $(l_s(f), l_s(\bar{r}))$ の挟平行支持脚1組と  $(l_s(\bar{f}), l_s(r))$ の挟平行支持脚1組を任意に抽出し, これら2組の有効な挟平行支持脚直線から各脚可動範囲に含まれるストローク長を最長化する脚軌道  $V$ の選出をする. 以下にその手法を述べる.

脚軌道  $V$ の選出過程で注目すべきことは, 任意の脚について, その遊脚開始点のある点に設定してしまうと, 間歇クロール歩容特有の特性によって脚軌道  $V$ が一意に決定されるという性質である.

例えば, Fig.3-9に示す脚  $f$ の遊脚開始点  $Q_f$ を与えた場合, 1組の挟平行支持脚直線の一方  $l_s(r)$ は遊脚開始点  $Q_f$ を通過する. そして遊脚開始点を  $Q_f$ とした時, ストローク長を最長化する条件から, この時の遊脚着地点  $U_f$ は点  $Q_f$ から重心の推進方向に延ばし



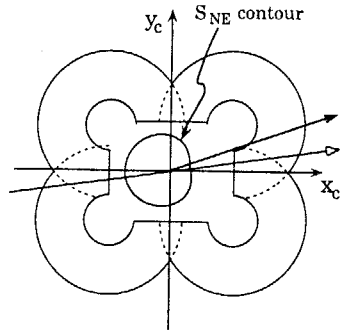


Fig.3-7  $S_{NE}$  contour of Fig.8 in the case of  $\theta = 15$  degrees.

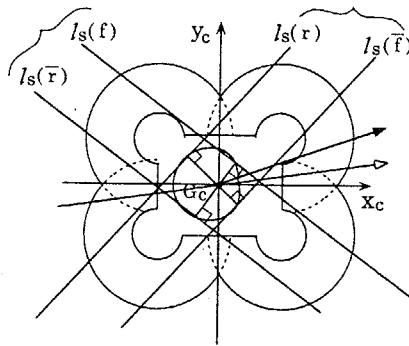


Fig.3-8 Two pairs of Effective Pinched Parallel Supporting Legs (EPPSL) lines.

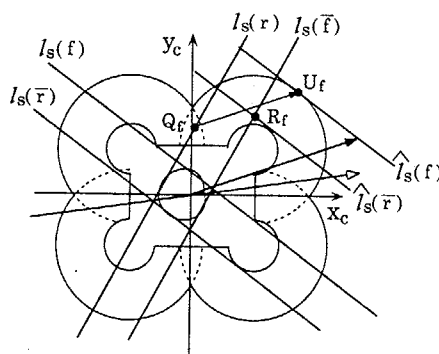


Fig.3-9 Derivation of three exchange points in one leg motion range.

た直線と脚可動範囲境界線の交点となる。さらに、脚軌道 $V$ の重心移動折り返し点  $R_f$ は、以下の2つの条件から誘導できる。

条件 i)  $R_f$ は支持脚直線  $l_s(\bar{f})$  上に存在する。

条件 ii) 4脚共通の脚軌道 $V$ として $VQ_fR_fU_f$ を選定した場合、 $U_f R_f$ は脚  $r$ においてはそれぞれ  $U_r R_r$ に相当する。そのため、一組の挟平行支持脚直線  $(l_s(f), l_s(\bar{r}))$  を平行移動して支持脚直線  $l_s(f)$  が  $U_f$ 上を通過するようにしたとき、これらを新たに  $(\hat{l}_s(f), \hat{l}_s(\bar{r}))$  と呼べば、支持脚直線  $\hat{l}_s(\bar{r})$  は  $R_f$ の上を通らなければならない。

重心移動折り返し点  $R_f$ は、これら2つの条件を同時に満足する点であることから支持脚直線  $l_s(\bar{f})$  と支持脚直線  $\hat{l}_s(\bar{r})$  の交点で与えられる。

以上のように、遊脚開始点  $Q_f$ が与えられると、脚軌道 $VQ_fR_fU_f$ は一意に定まる。遊脚開始点  $Q_f$ は、可能範囲内で自由に選択できるため脚軌道 $VQ_fR_fU_f$ も無限に存在し得る。本ルーチンでは、離散的に選択された各遊脚開始点  $Q_f$ ごとに脚軌道 $VQ_fR_fU_f$ を誘導し、それらの中でストローク長に相当する線分 $\overline{Q_fU_f}$ が最長となる脚軌道 $VQ_fR_fU_f$ を各脚の脚軌道候補として選出する。

このような選出方法の概念はすべての脚について適用可能であることから、各脚について同様のプロセスを繰り返しストローク長を最長化する脚軌道 $V$ を1つずつ選出する。

### 3.3.7 E 「4脚共通の脚軌道候補の選定」

本ルーチンでは前節で選出された各脚の脚軌道候補のうち、4脚に共通の脚軌道 $V$ でしかもストローク長が最短のものを選択する。その手順は以下の通りである。まず最初に、4つの重心移動量を示す線分 $\overline{Q_nU_n}$  ( $n = f, \bar{f}, r, \bar{r}$ )のうち最短の線分を含む脚軌道 $V$ を最短脚軌道 $VQRU$ と呼ぶ。

ついで、最短脚軌道 $VQRU$ を含む脚可動範囲を除く他の3つの脚可動範囲について、脚  $f$ においては点  $Q$  を  $l_s(r)$  上で、脚  $\bar{f}$ においては点  $U$  を  $l_s(\bar{r})$  上で、脚  $r$ においては点  $U$  を  $l_s(f)$  上で、そして脚  $\bar{r}$ においては点  $Q$  を  $l_s(\bar{f})$  上で、それぞれスライドし最短脚軌道 $VQRU$ が4つの脚可動範囲内すべてに納まるかを検討する。それが可能であればこれを基準歩容の1候補とする (Fig.3-10)。

### 3.3.8 F 「総合比較」

Cで誘導された有効な挟平行支持脚直線群に含まれる  $(l_s(f), l_s(\bar{r}))$  と  $(l_s(\bar{f}), l_s(r))$  の

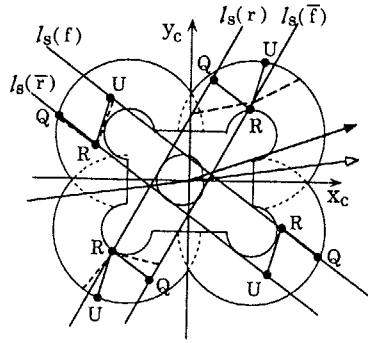


Fig.3-10 The V shaped trajectories common among all four legs.

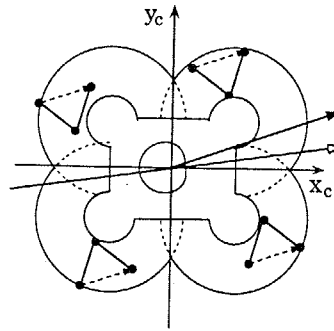


Fig.3-11 The final form of the standard foot trajectory.

	Level	Inclined
Forward		
Sideway		

Fig.3-12 One of the examples of the foot trajectory on level and inclined ground.

すべての組合せに関して D,E のルーチンを繰り返す。このような繰り返し作業によって E のルーチンを終えるたびに相異なる脚軌道  $VQRU$  の候補が選定されていく。こうして選定された複数の脚軌道  $VQRU$  のなかで、4 脚の脚軌道が互いに交差することがなくかつストローク長  $QU$  が最長となる脚軌道  $V$  を基準歩容として選択する (Fig.3-11)。もし、上述の条件を満たす  $V$  が得られなかったときは、再び B にもどり、前段階より小さい  $NE$  安定余裕を設定して、以下同様のルーチンを繰り返す。

### 3.3.9 接地面傾斜が異なる場合の最適歩容

以上のような誘導手法は、与えられた任意の角度の接地面での歩行で適用可能である。そのため、平地や任意の傾斜地での歩行時の最適歩容を一例として誘導しておくことにする (Fig.3-12)。この結果から、平地での間歇クロールでは左右の足を並行に配置するのに対し、傾斜地では最大傾斜線方向に移動する際には傾斜地上側に向かって前 2 脚を開いた逆台形歩行が選択されていることが分かる。我々はすでにクロール歩容においては、傾斜地を歩行する際には逆台形歩行が適することを [15] で報告されているが、同様の結果が間歇クロールの基準歩容にも観察されることは興味深い。なお、傾斜地を横ばいに移動する時に、傾斜地下側に比べ上側を開いて移動する歩容が生成されていることが分かる。

## 3.4 間歇型追従歩容の導入

前節で示した基準間歇クロール歩容は一定の方向に推進する歩行運動のみを考慮して誘導された。しかし、4 足歩行機械の実際の作業性能を向上させるためには、任意の方向に進む場合の歩容生成手法を明らかにする必要がある。本節では、このようなより一般化された歩容生成実現のための準備として、任意の推進軌道を追従する単純化された間歇クロール歩容生成法を提案する。さて、4 足歩行機械を任意の脚配置から別の脚配置へ遷移するアルゴリズムとしては、筆者らはすでに「踏み換え歩容」[31] が提案されている。この「踏み換え歩容」は、任意の脚配置同志の踏み換えを安定条件を満たしながら実現する一般性を有している。しかし、基本的にはクロール歩容を基準としているため、重心位置は地面に対して不動のまま踏み換える動作が優先的に選択され、 $NE$  安定余裕は低くなってしまふ。そこでここでは、 $NE$  安定余裕を最大化する新たな歩容として「間歇型追従歩容」を導入しておくことにする。

「間歇型追従歩容」の基本概念は、指令される目標方向が各歩行周期ごとによって

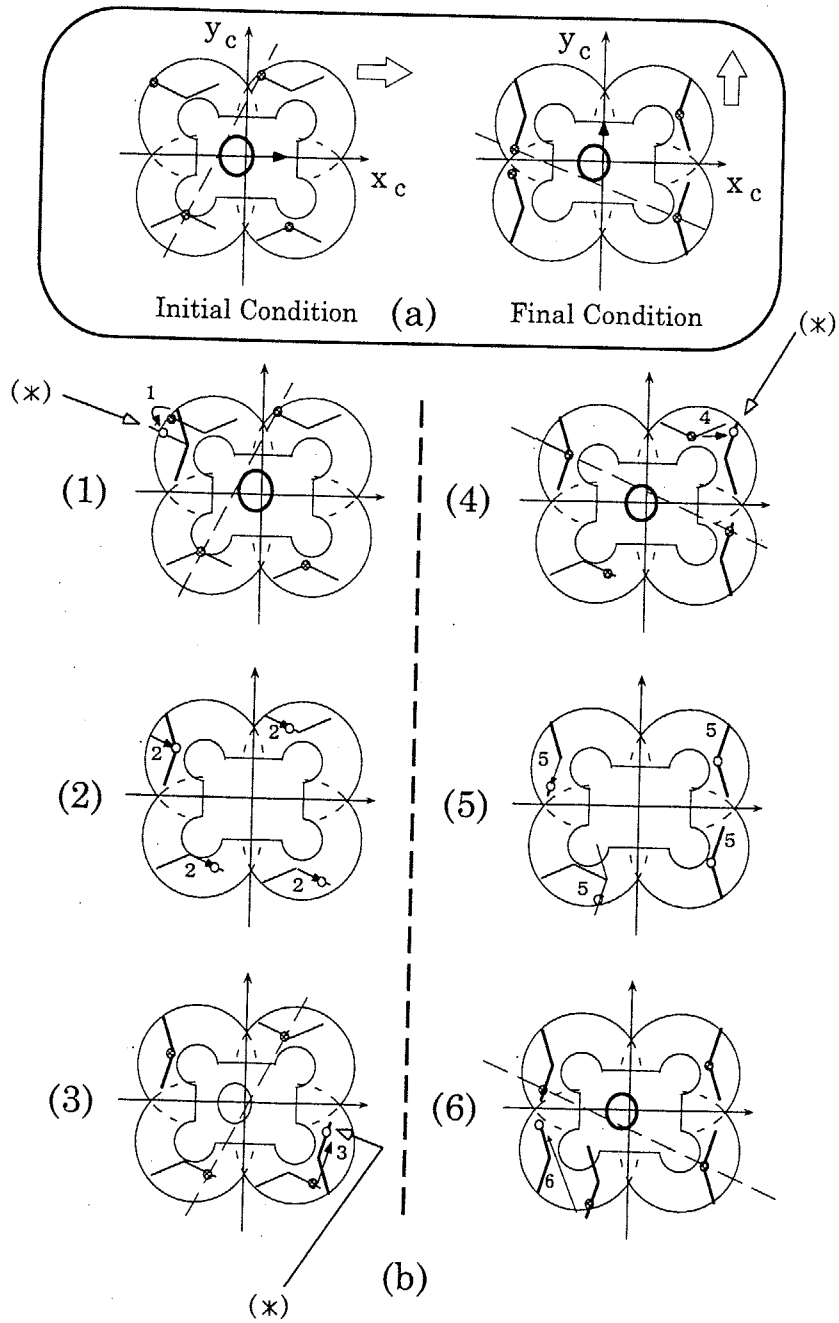


Fig.3-13 (a): The initial condition and the final condition.  
 (b): Sequence of Intermittent Trajectory Following Gait.

いくと考え、各周期の始めに示される目標方向に追従する基準歩容への収束から、終わりに示される目標方向に追従すべき基準歩容への収束状態に、*NE*安定余裕を可能な限り大きく維持しながら切り換えるものである。目標方向切り換えのための具体的な動作は、4歩の踏み換えと2回の重心移動（合計6回のプロセス）からなる。そのため、まず脚可動範囲を無視し、一周期4歩の遊脚位置を選択するに当たっては、前半2歩は方向転換前の進行方向における基準歩容の*NE*安定余裕を維持できる位置に遊脚を接地し、後半2歩は方向転換後の基準歩容の*NE*安定余裕を維持できる位置に遊脚を接地するものとし、最後に脚可動範囲を考慮して可能な遊脚接地位置を選択するというのが「間歇型追従歩容」である。

「間歇型追従歩容」の実施例を Fig.3-13 に示す。Fig.3-13 は最大傾斜線に沿って歩行中、Fig.3-13(a) のように移動方向を遷移する歩行であるが、Fig.3-13(b) の6段階のシーケンスで間歇型の進行方向追従が実現している。なお、このような「間歇型追従歩容」では、脚可動範囲の制限があるため基準間歇クロール歩容時に比べて*NE*安定余裕が減少している。これは第1段階から第2段階と第5段階から第6段階にかけて脚可動範囲境界線からはみ出る脚を内部にとどめる操作(\*)で生じたものである。

## 第4章 ワイヤによる牽引補助

第3章で誘導された間歇クロール歩容で4足歩行機械が単独歩行できる最大傾斜度には、転倒・滑落の点で限界がある。本章では、4足歩行機械が単独では歩行できないような急斜面において、ワイヤによる牽引補助を行うことで十分な安定性を保持しながら歩行できるシステムを提案する。それは壁面移動時と異なる手法であり、急斜面特有の牽引補助を行うことで4足歩行機械は水平面と全く同じNE安定余裕を保持しながら間歇クロール歩容を遂行できることを述べる。

### 4.1 基本概念

ロボットや運搬機械をワイヤで牽引補助することは従来まで壁面移動作業で使われてきた。その主な目的は、壁面からの滑落防止と移動する壁面での位置決めであり、ワイヤの手繰りだし量は移動体の目標位置と現在位置との偏差に応じて定める位置制御をもとに決定されていた。このような簡素なシステムで対応できた理由は、壁面では移動体に働くワイヤ牽引力の方向と重力方向とが同じ鉛直方向であるため、移動体に重力成分は残らず転倒が生じにくいからであった。その反面、壁面への押し付け力を出すには吸着装置の装備などが必要とされていた。

それに対して急斜面での移動作業においては、ワイヤ牽引力の方向と重力方向とが異なるため重力成分は残存することになる。このような環境を利用して、移動体につけられたワイヤの牽引力を制御することで Fig.4-1 に示すように牽引力ベクトルと重力ベクトルとの合成ベクトルを傾斜面に対して垂直にすることが可能となる。このようにして生成された合成ベクトルを新たな重力と仮定すれば、牽引されている移動体が歩行機械である場合、あたかも水平面を歩行しているような仮想水平面を形成されることと同等であり、この場合の4足歩行機械の歩容制御としては、水平面と同じ間歇クロール歩容で歩行することで急斜面においても水平面と全く同じNE安定余裕を維持できることになる。

### 4.2 牽引システムの構成

4.1 で示した基本概念に基づいて考えると、急斜面を単純に上下する作業を行う場合には Fig.4-1 に示す1本のワイヤで十分であり、この場合ワイヤ牽引器(以後、「ウインチ」と呼ぶ)が生成すべき力は、歩行機械の重量が $W$ 、傾斜面の最大傾斜角が $\theta$ であれば

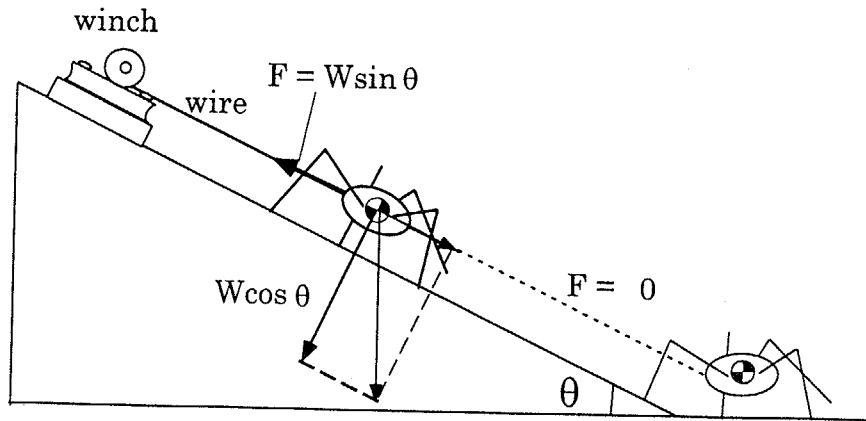


Fig.4-1 Basic principle of wire towing system.

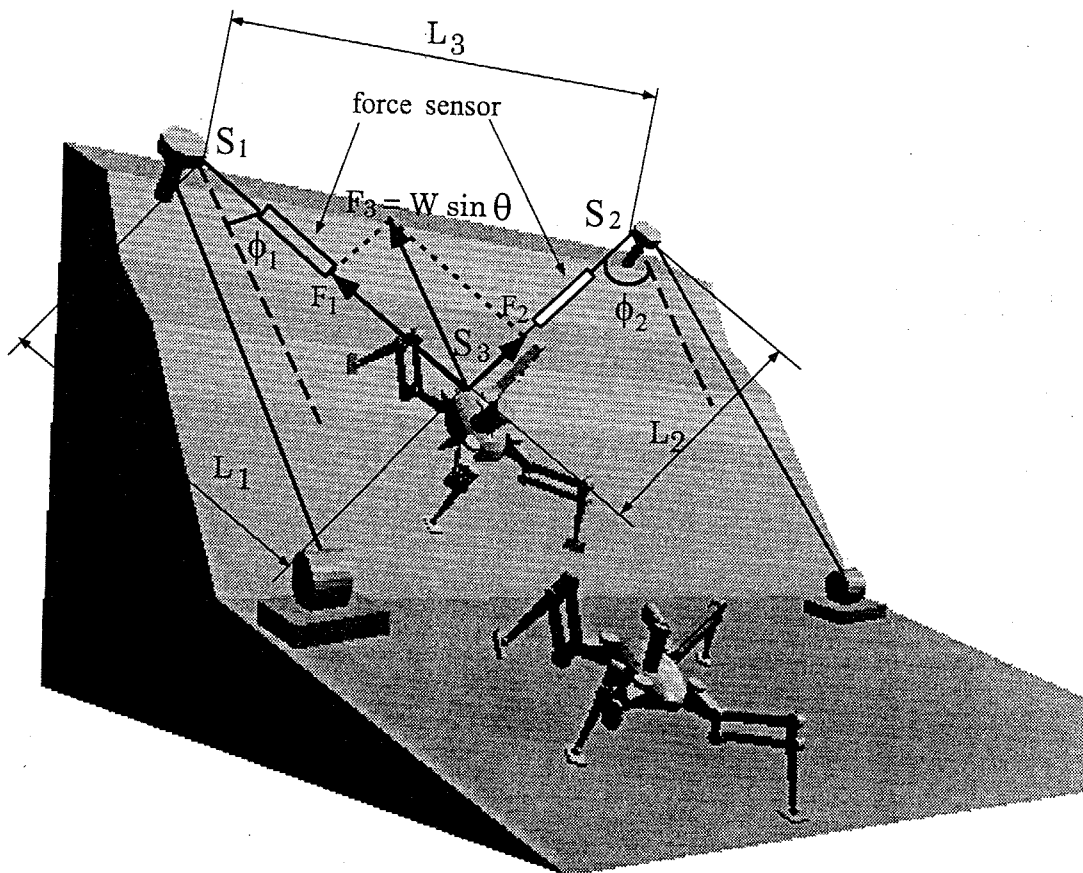


Fig.4-2 Applied towing system, extended to omni-directional movement for walking robot pulled by a pair of two wires.



$W \sin \theta$ になる。Fig.4-1 右側のように水平面で作業する場合には、ワイヤに牽引力があると邪魔であるためこのときには牽引力をゼロに設定する。実際には、かなり小さい値に牽引力を設定し、一応牽引力が運動の邪魔にならない程度にすることが望ましい。

比較的広い範囲で上下左右に間歇型追従歩容を用いて歩行する場合には、Fig.4-2 のように歩行機械をサポートする2本のワイヤが、それぞれ斜面上部のプーリを介して斜面下部に固定されたウインチで牽引されるような2自由度のシステムを構成する必要がある。その際、2本のワイヤ牽引力の合力が最大傾斜線に沿って  $W \sin \theta$  になるように牽引すると、歩行機械はこの2つのウインチの間にある限り安定な歩行が保証される。合力から各々のワイヤの目標牽引力を算出するにはプーリ  $S_1, S_2$  から歩行機械との結合点  $S_3$  までのワイヤの長さを算出するか、もしくは  $S_1, S_2$  におけるワイヤの手繰りだし角度を計測する必要がある。

このときの左右のワイヤ牽引器の牽引力  $F_1, F_2$  は以下のように定めればよい。ワイヤの長さ情報、または手繰り出し角度情報からワイヤの各方向が  $\phi_1, \phi_2$  であるとわかったとき、最大傾斜線方向に  $W \sin \theta$  の合成牽引力を生成するには Fig.4-3 のベクトル関係が成立すればよい。

$$\frac{W \sin \theta}{\sin(\phi_1 + \phi_2)} = \frac{F_2}{\sin \phi_1} = \frac{F_1}{\sin \phi_2} \quad (9)$$

これよりワイヤ牽引器の牽引力  $F_1, F_2$  は、次式のように求まる。

$$F_1 = \frac{\sin \phi_2}{\sin(\phi_1 + \phi_2)} W \sin \theta \quad (10)$$

$$F_2 = \frac{\sin \phi_1}{\sin(\phi_1 + \phi_2)} W \sin \theta \quad (11)$$

これらは、歩行機械の重量  $W$ 、最大傾斜度  $\theta$  を予め与え、手繰りだし角度  $\phi_1, \phi_2$  が計測された時の目標牽引力に相当する。

以上のように、急斜面を1本のワイヤのみを用いた場合の目標牽引力は  $W \sin \theta$  で一定であるのに対して、急斜面を全方向に歩行するために2本用いた場合の目標牽引力は上に誘導したように歩行機械の移動地点によって異なるため、手繰りだし角度  $\phi_1, \phi_2$  の計測とその情報に基づく目標牽引力の算出、およびそれに追従するためのワイヤの手繰りだし量の決定をリアルタイムで行なうサーボ系を構成しなければならない。

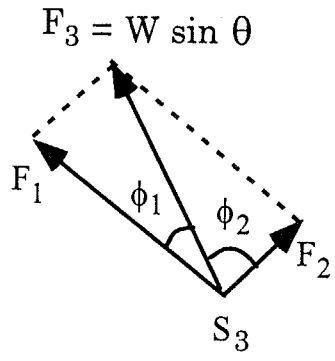


Fig.4-3 Relationship among three forces pulled by wires.

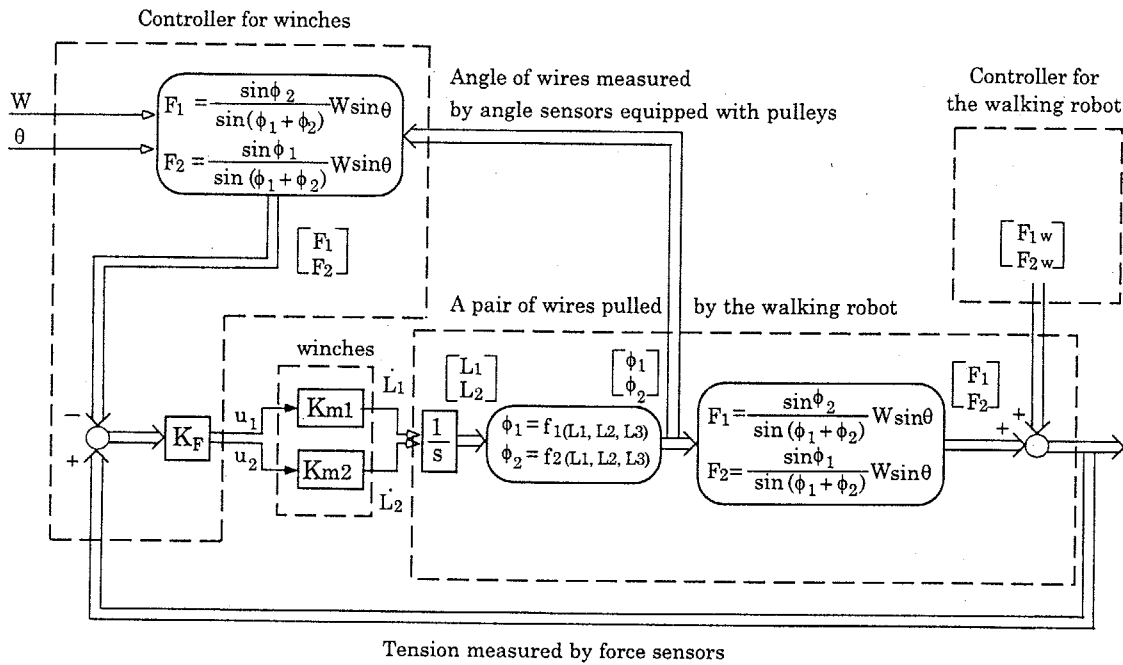


Fig.4-4 Signal flow to pull wires based on force control.

従って、この目標牽引力に追従するような閉ループ系を構成するにはそれぞれのワイヤにかかる力の実測値と目標牽引力との偏差に比例した速度でウインチを駆動すればよく、その制御系を Fig.4-4 に示す。ウインチをこのように制御することによって、歩行機械の目標位置や目標姿勢をウインチに伝達する必要がないため、牽引補助システムが歩行機械の制御系から独立した系を構成でき、歩行機械に非常事態が生じて制御不能となっても牽引補助システムで操作することが可能となるのである。なお、実験に用いた駆動系及びセンサ類の記述は 6.3 で行う。

## 第5章 機械モデルの開発

傾斜面の歩行を実現させるには従来までの4足歩行機械とは異なる傾斜面特有の移動機構が不可欠となる。本章ではそれらに焦点をあて、高出力脚駆動機構、安定性向上のための脚伸縮機構、対地適応型足裏機構、機械モデルの制御系の構成について論ずることとする。

### 5.1 高出力脚駆動機構の開発

#### 5.1.1 基本設計方針

歩行機械における駆動機構は、軽量かつ高出力、また高度なエネルギー効率といった特性が実現できるように設計することが望ましいが、これらすべてを満足する設計は極めて困難である。従って従来までの歩行機械は、Fig.5-1に示すようにそれぞれ移動する環境に応じて異なる設計方針に基づいて開発されてきた。それらは次の2つの概念である。平地での歩行を目的とする歩行機械においては、高いエネルギー効率で移動することが第一の目的であることから、GDAと呼ぶ設計概念での脚設計を行った[32]。この概念は、歩行の基本運動が重力場と直交する方向への出力エネルギーゼロの仕事であるため、アクチュエータに負のパワー作動状態を生成しないようにすることでエネルギー効率を向上しようとするものである。また、壁面移動を目的とする歩行機械においては、移動のためには重力に反して仕事をしなければならないため、エネルギー効率よりは出力パワー/重量比を向上することが最も重要であり、そのような観点から干渉駆動と呼ぶ設計概念での脚設計を行った[33]。この概念は、最もパワーを必要とする垂直上昇運動を行う時に、必要とするパワーが装備しているアクチュエータ群全体から出来るだけ分散して生成するように機構、運動を構成し、全体として軽量化を計ろうとするものである。

これらに対して傾斜面での作業を行う歩行機械の脚機構の設計は、平地でのエネルギー効率重視型の立場と、壁面での出力パワー重視型の立場の両者を複合するものでなければならないが[34]、同時に急斜面での作業機特有の機能性を重視したものでなければならない。それは、凹凸の激しい地形にも対応できる高度の対地適応機能を有する脚機構と、高い負荷重量特性である。試作したモデル TITAN VII では、これらの新たな機能性を将来の油圧駆動型実用機で実現することを想定し、傾斜面特有の機構として直動型干渉駆動機構の導入を行うこととする。

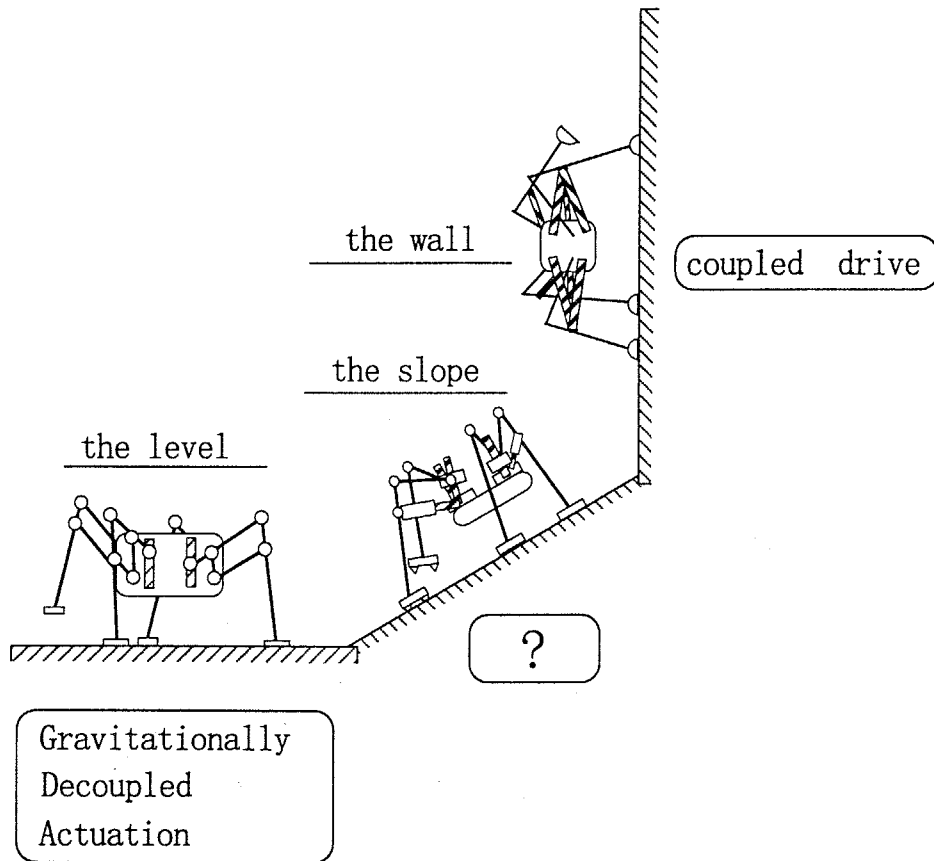


Fig.5-1 Basic design concepts of walking robots, which varies with the environment.

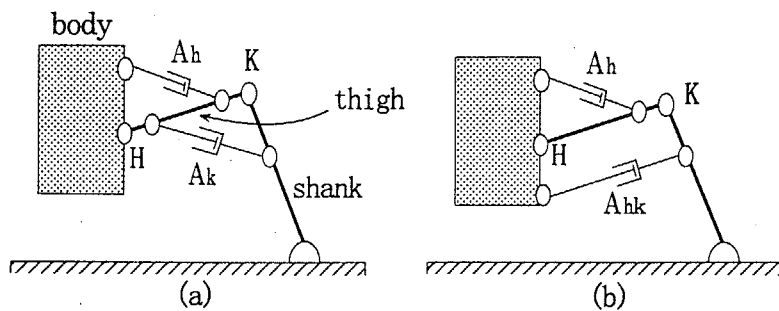


Fig.5-2 Prismatic actuator distribution.

## 5.1.2 干渉駆動型直動機構の導入

開発した TITAN VII では、将来油圧駆動機構へ発展することを目指して、脚の腰関節および膝関節の駆動には直動アクチュエータを導入した。このような機構を構成する通常の考え方は、Fig.5-2(a) の様に腰関節 (H) と膝関節 (K) に独立の直動駆動系  $A_h, A_k$  を装備するものであろう。現在使用されている建機はほとんどすべてがこの構成を採用している。それに対し、我々は Fig.5-2(b) の様に、直動駆動系  $A_h$  は (a) と同様に腰関節を駆動するが、直動駆動系  $A_{hk}$  は胴体部と脛 (shank) 節の間を駆動する構成を TITAN VII に導入した。このような構成では、直動駆動系  $A_{hk}$  は膝関節と腰関節の両者にトルクを生成する。そのため、この運動だけでは関節角度は一意には決まらない。しかし、腰関節の角度が直動駆動系  $A_h$  によって決められていれば、 $A_{hk}$  は膝関節の角度を決定できる。このような駆動系構成は、駆動力が干渉するため制御が複雑化するが、直動駆動系で生成する力がうまく干渉し、「干渉駆動」の効果 [34] を発揮するため、大きな支持力を生成できる構成となっている。もちろん、Fig.5-2(b) の機構では直動駆動系  $A_{hk}$  は比較的長いストロークを必要とするが実用的にはほとんど障害とされないと考えられる。

上記の効果に加えて、膝関節回りに生成するトルクを考えた時、Fig.5-2(a) の  $A_k$  と Fig.5-2(b) の  $A_{hk}$  両者の直動アクチュエータが同じ駆動力を発生したとしても、Fig.5-2(b) の方が大きいトルクを生成できるという長所も存在する。これより、Fig.5-2(b) の駆動機構の有効性は著しく高いといえる。(なお、本機構は全く新しい機構というわけではなく、以前鉱山掘削用の機械として使われていたことを、ミュンヘンのドイツ博物館が記録しているようである。)

TITAN VII の実際の駆動系は Fig.5-3 に示すようになっている。ここで完全な平行リンクでないだけは、低重心で歩行する際に多く使う脚可動範囲で  $A_h, A_{hk}$  の可操作性がなるべく直角に近く交わるように設計したためである。また、実際の直動駆動系  $A_h$  は、Fig.5-3 の様に脚回転軸に沿うように立てた機構配置としているが、これは脚を振り回すときの慣性モーメントを軽減するためである。また、胴体座標系  $z$  軸回りに関しては、アクチュエータ  $A_\theta$  によって駆動されるタイミングベルトを介して脚全体を振り回すことで、 $xy$  平面内における脚可動範囲を大きくとることが可能となっている。将来的には、タイミングベルトとプーリ部をラックとピニオンに置き換えることで同じく油圧シリンダによる位置決め駆動ができるものと考えている。

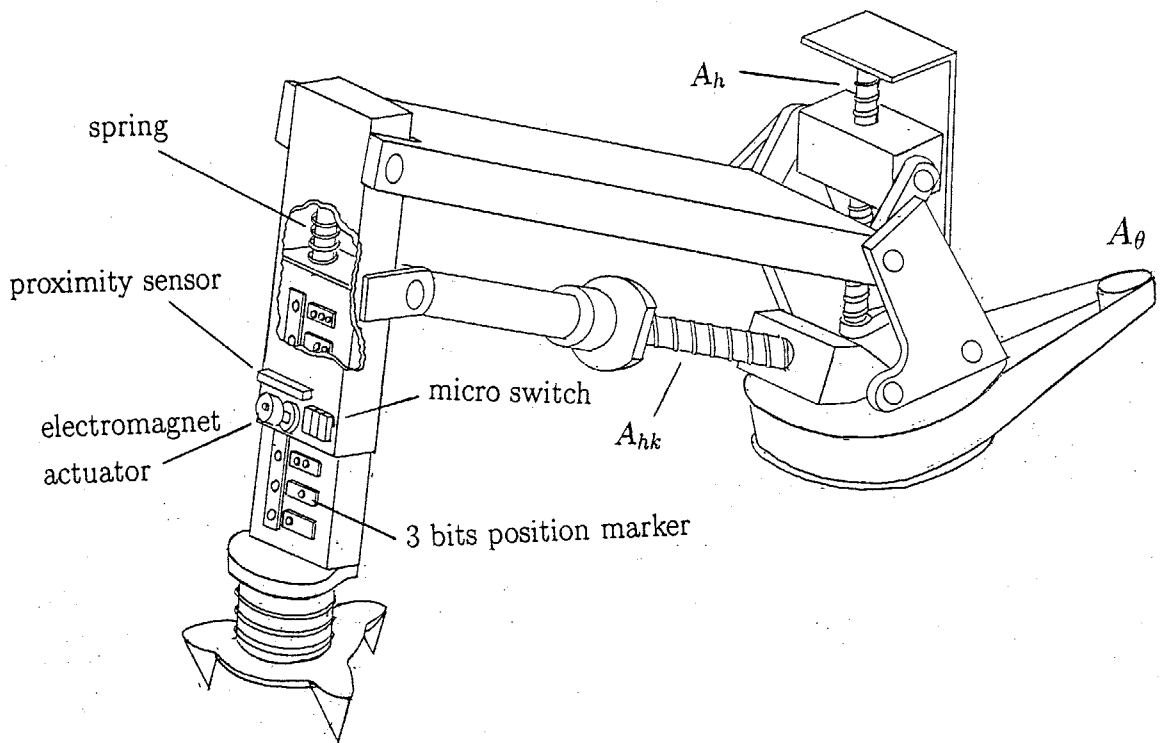


Fig.5-3 Overall view of the leg mechanism of TITAN VII.

## 5.2 臍節の伸縮機構

### 5.2.1 伸縮の効果

傾斜面で静止した状態で様々な外乱を受ける作業を行なう時、支持脚接地点に対して最も安定な位置へ重心を移動させ、出来る限り転倒しにくい姿勢を保っておくことが望ましい。例えば傾斜面を歩行して Fig.5-4(a) に示すような脚配置を有した時、作業時における最適な姿勢は、第2章で示した結果により傾斜面上下に対して *NE* 安定余裕を等しくする Fig.5-4(b) の位置へ重心を移動させた姿勢であることは明らかである。しかし、従来多く見られた前後対称な脚可動範囲を有する4足歩行機械を用いて Fig.5-4(b) の条件を満足する姿勢を形成することは、脚可動範囲を逸脱する姿勢であるため、実際には不可能であることがほとんどである。そこで、本研究では傾斜面の最大傾斜角に応じて脚の長さを自在に変化させる脚機構を提案する。このような脚伸縮機構を用いることで、Fig.5-4(b) の条件と全く同じ安定性を Fig.5-4(c) のような斜面上側の臍節を伸ばし反対に斜面上側の臍節を縮ませる姿勢によって実現できるのである。TITAN VII で用いた脚伸縮機構は具体的には以下のようなものである。

### 5.2.2 臍節モデル

臍節は歩行中振り回されるものであるため、出来る限り軽量に構成することを念頭において、第1次モデルにおいては受動的に脚の伸縮が実現できる機構を採用した。

具体的な機構は、Fig.5-3 に示すようにバネと自重で常時伸展しようとしている伸展臍節をソレノイドで駆動するピンで留めておくだけのものである。このピンは負動作構造であり、普段はソレノイドが OFF でバネ力でピンを押しつけるようになっている (Fig.5-5)。臍節の長さを変えるときには、まず足先を地面に着け、ソレノイドを ON 状態にして、腿節を上下に運動させる。そうすると、腿節の動きでピンに働いている摩擦力は一瞬必ずゼロになるため、ピンは解除され臍節は伸縮を始める。臍節が望みの長さまで伸縮したら、ソレノイドを OFF にしてピンを押しつけてロックし伸縮を停止する。TITAN VII では、ピンをロックできる位置は離散的とし、その位置は3つのリミットスイッチの ON, OFF 状態で判別するようにしている。臍節は 220[mm] のストローク変化が出来るようになっている。

このような特徴を有する第1次モデルは軽量に実現できるものの、脚が本来持っている運動自由度を利用して臍節の伸縮を行う受動機構であるため、脚を浮かした状態では伸縮することが不可能である。最大傾斜度が比較的小さい傾斜面であればこのような機



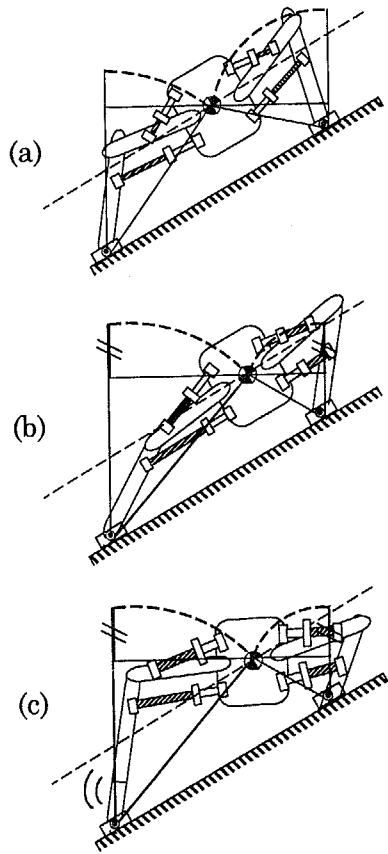


Fig.5-4 Effect of extensible legs.

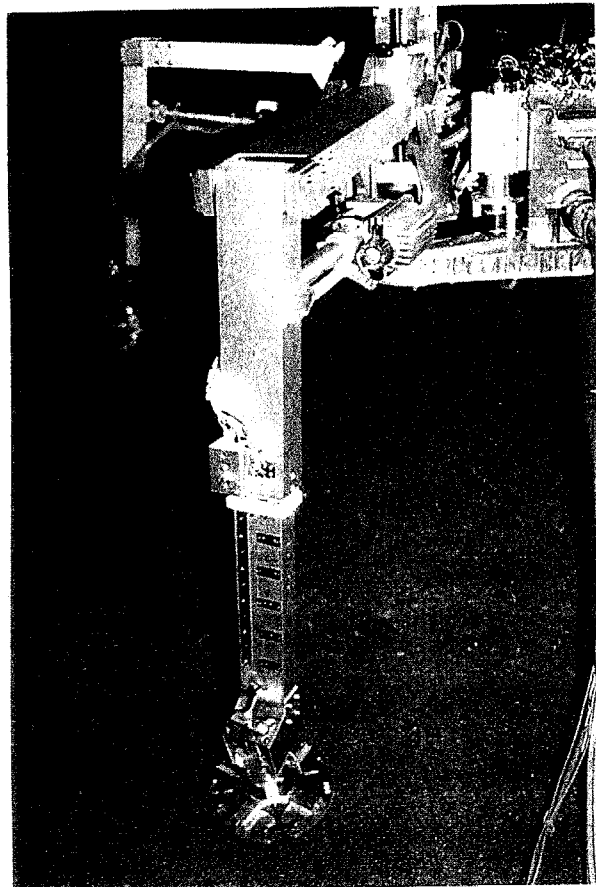


Fig.5-5 The first model of the passively extensible shank link.

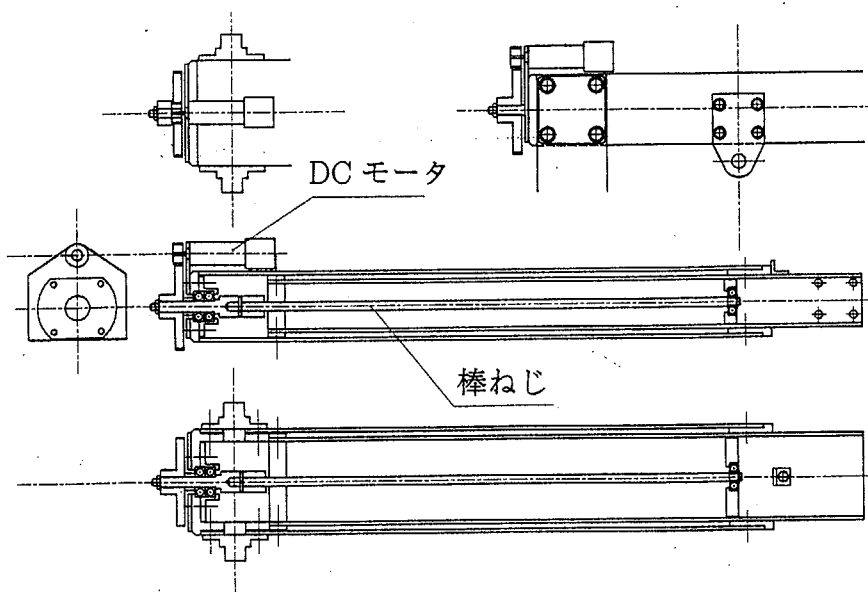


Fig.5-6 The second model of the actively extensible shank link.

構で十分対応できるが、傾斜度が増加するにつれて斜面上側の脛節を変化させる時に安定性を保持しながら斜面下側へ重心移動することが困難となる。このような状況にも対応するため、第2次モデルにおいては、能動的に伸縮できる機構を導入した (Fig.5-6)。脛節に働く支持力はすべて棒ねじで支持するため、新たに装備するためのアクチュエータは脚伸縮を可能とする出力パワーを有するもので十分であり第1次モデルとほぼ同じ重量で実現できるのである。

## 5.3 対地適応型足先機構

### 5.3.1 足先機構の基本設計概念

不整地における安定歩行の実現には、歩容や脚機構の設計だけでなく、接地面の状況を把握し接地状況を変化させる足先機構の設計も極めて重要である。特に、1.2.2の不整地分類表で示した (Terrain A), (Terrain B), (Terrain C) を歩行する際の安定性は足先機構の特性に大きく依存するため、ここでは安定歩行実現のために要求される足先の機構およびセンサの条件を明確にする。なお、ここでは理解のしやすさから足先機構を足裏部と足首部とに分類して考えたうえで、足先全体に求められる特性の必要条件を列挙する。

- (1) 足裏の形状は不整地に適応するように自在に変形し、支持力を足裏全体に均等に配分する必要がある。
- (2) 傾斜面において滑落防止措置として、足裏に爪を装備して接地面に食い込んだ爪にかかる垂直抗力によってクーロン摩擦力以上の支持力を得られるようにする必要がある。
- (3) 足裏と足首とのジョイント部は回転3自由度を有し、その回転中心はくじくことがないようにできるだけ低くする必要がある。
- (4) 歩行中の衝撃力を和らげるために、足首は足裏に対してコンプライアンスを有する必要がある。
- (5) 遊脚モードにおいて、足裏が地面あるいは障害物に接触したことを認識するための接触センサを足裏もしくは足首に装着する必要がある。遊脚中は脚の運動量が大きいいため、障害物との接触はセンサ変移のみで受け、衝撃力が直接脚に伝達されない構造が望ましい。
- (6) 支持脚モードにおいて、支持脚を力制御をするためには足首にかかる負荷を計測するための力センサを装着する必要がある。

(7) これらは、実際の不整地で長時間にわたって使用できるように、軽量でかつ頑丈に作る必要がある。

(1)~(3) は足裏機構によって実現でき、(4)~(6) は足首機構およびセンサシステムによって実現できる条件である。よって不整地歩行を目的とする TITAN VII の足先機構は、これらの必要条件を同時満たす機械モデルを以下のように実現している。

### 5.3.2 足先第1次モデル

足先第1次モデルの試作にあたっては Fig.5-7 に示す機構を採用している。(1) と (3) の条件を簡易機構で満たすように足裏と足首をボールジョイントを用いて連結し、足裏が受動的に回転3自由度の動きが可能となるように構成されている。また条件(2)の対策としては、足裏に3つの爪を装備することで静定条件を満足する接地状態を形成し滑落を回避できるようになっている。凹凸のある地面に対する対応は、ボールジョイントの根元とリンク先端とをベローズを用いて連結しコンプライアンスを有する構造になっている。また、このベローズの内部に光センサを装備することで力計測機構 [36] としても機能することが可能となる。

### 5.3.3 足裏状態の安定性

足先第1次モデルを TITAN VII に装備して最大傾斜角 $\theta = 15^\circ$ の傾斜面における歩行実験を行なった結果、支持脚状態の足裏平面が2つの接地点を結ぶ直線回り回転して安定な接地状態を維持できない状態、すなわち「挫く」現象が斜面下側支持脚にみられた。支持脚を「挫く」ことは滑落防止のための支持力を得られず、安定な歩行を続行することが不可能となる。

そこで、「挫く」現象を Fig.5-8 の図を参考に分析しその対応策について論ずることにする。足裏の3点支持状態で支持力が分配され挫く理由は、(a) に示すように足首から足裏にかかる支持力の作用線ベクトル  $F_3$  が傾くと、接地面との交点  $P_3$  が接地点  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  を結ぶ三角形外部に出てしまうため、足裏が回転し挫いてしまうのである。これを回避するには、もちろん足裏を大きくし接地点を結ぶ三角形を大きくすることも考えられるが、必要以上に足裏を大きくすることは凹凸面での安定な接地位置の選択を困難にしたり、脚重量が増加するといった不都合を生じる。また、爪を低くすることで確かに挫きにくくはなるが接地面への食い込み量が減少し滑落が生じやすくなる。このように考えてくると、足裏サイズ、爪の高さを変えずに挫きにくい足裏構造にするには接地

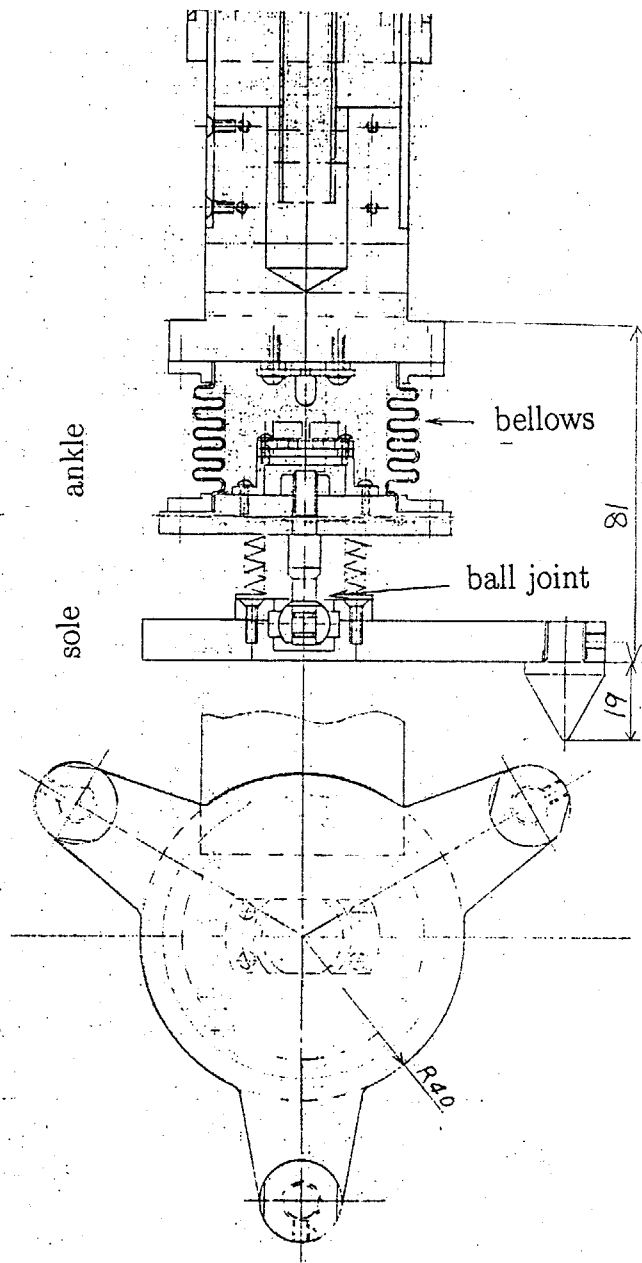


Fig.5-7 First model of the foot mechanism of TITAN VII.  
 The sole is connected with the ankle by a ball joint.

点を増やすことが最適と思われる (Fig.5-8(b)). しかし、剛性のある足裏一平面にたとえ 4 点以上の爪を装備しても不整地においてすべての爪が接地できるとは限らない. そこで、不整地においても 4 点以上の接地点を形成しなおかつ各爪への支持力を均一化する足裏機構を次に提案する.

#### 5.3.4 足先第 2 次モデル ～ロッカー・ボギー・ソール～

提案する対地適応型足裏機構は連結作動機構 [37] を用いた Fig.5-9 に示すような機構である. 以後、このような足裏機構を「ロッカー・ボギー・ソール (rocker-bogie sole)」と称することにする. 複数の揺動アームから構成される「ロッカー・ボギー・ソール」は Fig5-9 に示すように、rocker arm A と rocker arm B がそれぞれのアームの midpoint において回転自在となって支持され、それらの支持点においてさらにもう 1 つの rocker arm C と連結されている. rocker arm C もその midpoint において回転自在となって支持され、その支持点は足首と連結されている. それゆえ、Fig5-9 のような不整地においても足裏のすべての接地点において均一な支持力を生成することができるのである.

試作した第 2 次モデルは「ローカー・ボギー・ソール」を 3 次元に拡張したものである (Fig.5-10). 足裏全体は足首をスライドする shaft S によって支持されており、shaft S は足首に対して回転自在であるとともに足裏との連結部がユニバーサルジョイントを構成しているため、足裏は足首に対して回転 3 自由度を有する. shaft A はユニバーサルジョイントの 1 部であり、Fig5-9 の rocker arm C に相当する部分である. shaft A に連結されている plate A と plate B がユニバーサルジョイントのもう 1 つの部分であり、rocker arm A と rocker arm B に相当し、これらの先にさらに 4 枚の回転自在な足裏が連結されている (Fig.5-10). 実際の不整地への適応性は、Fig.5-11(b) に示すように第 1 次モデルの Fig.5-11(a) と比較しても優れていることが分かる. なお、4 枚の足裏は互いにばねで連結されているため、足裏が接地してない状態では 4 枚が一平面上に形成され接地時には常に爪を有する足裏が地面に接触する構造になっている.

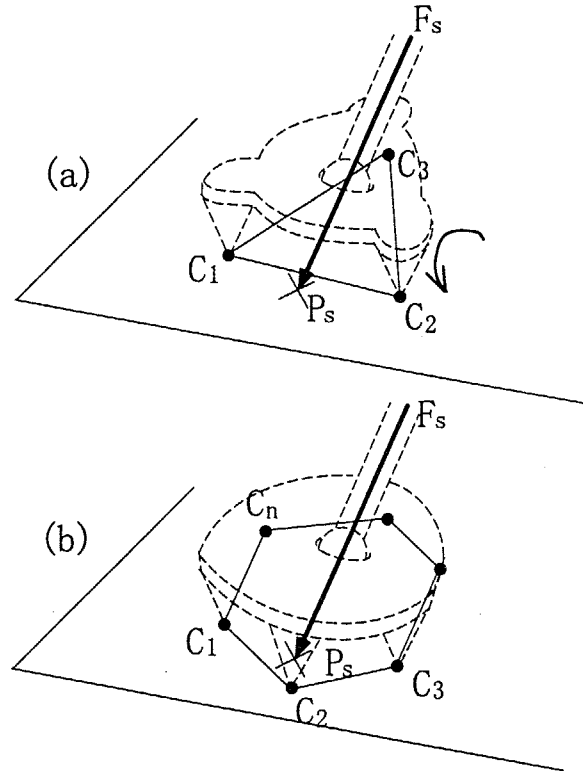


Fig.5-8 Geometric analysis of the sprain of the ankle.

- (a) The sole of three contact points can satisfy statically determinate condition, but stability margin is small.
- (b) The sole of more than four contact points becomes statically indeterminate, but on the flat, stability margin is large.

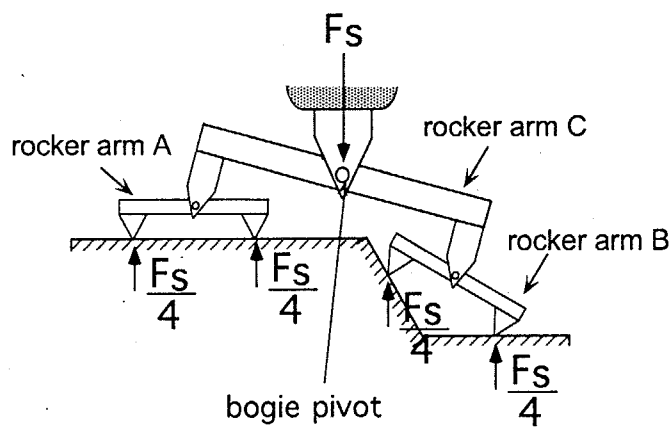


Fig.5-9 Basic principle of Rocker-Bogie Sole.

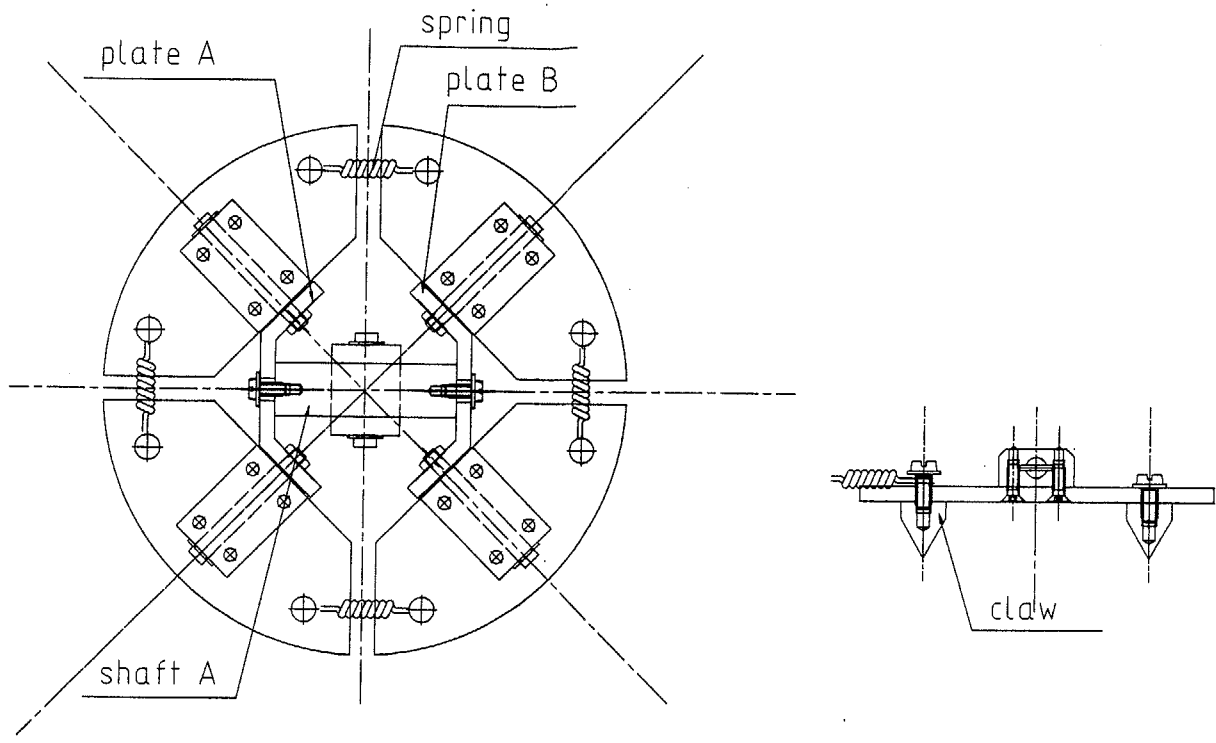


Fig.5-10 Rocker-Bogie Sole extended to 3-D.



Fig.5-11 Whole view of Rocker-Bogie Sole equipped with TITAN VII.

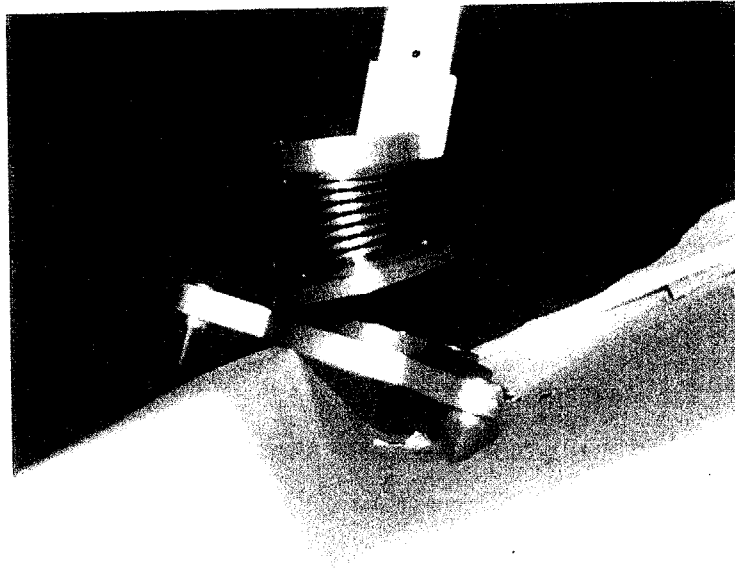


Fig.5-12(a) First sole mechanism with three claws, which tends to sprain on such a rugged terrain.

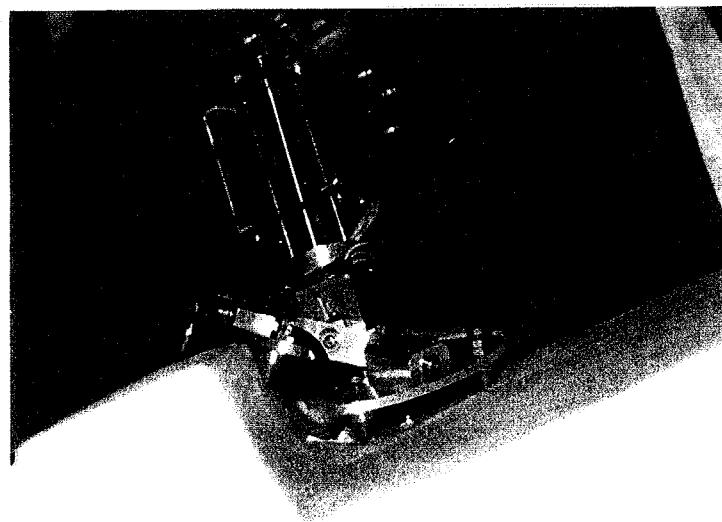


Fig.5-12(b) Rocker-Bogie Sole which can come into contact with a rugged terrain at more than three points.



### 5.3.5 足先第2次モデル ～不整地認識型足首センサシステム～

TITAN VIIの足先へ搭載したセンサ機能は、遊脚中の全方向の障害物接触認知センサと支持脚中の支持力計測センサである。なお、これらのセンサはすべて足首に搭載している。なぜなら、足裏に装備すると着地時の衝撃力が直接センサで受けるため耐久性の点から望ましくない点、さらに脚リンクに固定した足首に接触センサを装備することで障害物の存在する方向を正確に認識出来る点、これら2点を考慮したからである。

ここで、Fig.5-13を用いてセンサの動作機能を個々に説明していく。まず、足裏が地面に接触したとき足首に対して足裏は上方に移動し、足裏を支える shaft S は supporting hole H に沿ってユニバーサルジョイントが intermediate plate I と接触するまで上方にスライドする。shaft S の変移量はポテンショメータによって計測されるため、足裏からの小さい接触力を容易に認識することができる。

次に、地面に接触した足裏が支持脚モードに変わり大きな支持力を足裏が受けると、shaft S はつけ根のユニバーサルジョイントが intermediate plate I を押し上げながらさらに上方にスライドし、この際2本の outer shaft S がばねの反力を受けるためコンプライアンスを有する挙動となる。従ってこの状態で計測される shaft S の変移量は足裏が受ける支持力値に相当するのである。このように shaft S の変移は足裏の地面への接触センサと同時に力センサとしての役割も兼ねており、TITAN VI で用いた非線形ばね [38] と同じ機能を有する。

また、足裏が横方向から受ける接触に対しては、shaft S が傾くことによって intermediate plate I の下部に装備した4個のマイクロスイッチのいずれかが ON 状態となることで認識することが可能である。なお、足裏が受ける横方向の衝撃力に対してもコンプライアンスを有するように shaft S は弾性体によって支持されている。

## 5.4 機械モデルの全体構成

TITAN VIIの外観を Fig5-14 に示す。ITAN VIIの4脚の長さは腿節が303[mm]、脛節が446～666[mm]であり、1脚の鉛直方向の回転軸を縦横500[mm]、400[mm]の間隔で1枚のハニカム板上に配置している。全重量は54[kgf]('97年11月現在)で、電力は外部から供給し、12個のモータドライバ(TITECH DRIVER)に与えられる位置指令を486DX2のCPUを有するパソコン(NEC製9821Bp)を用いて制御している。駆動するモータは最高出力190[W](最大効率時は60[W])の日邦電機製のDCモータであり、各関節の減速比はTable 5-1に示す設計を行なっている。

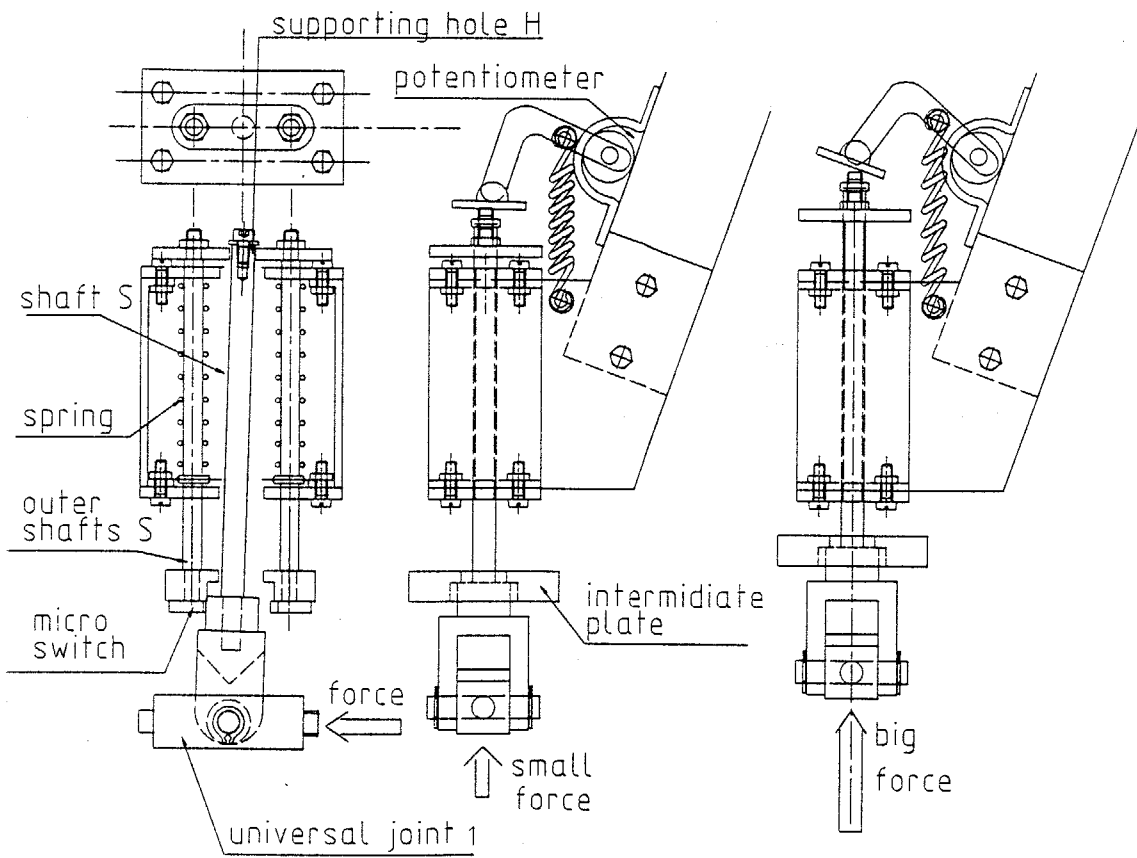


Fig.5-13 Rocker-Bogie Sole sensor system.

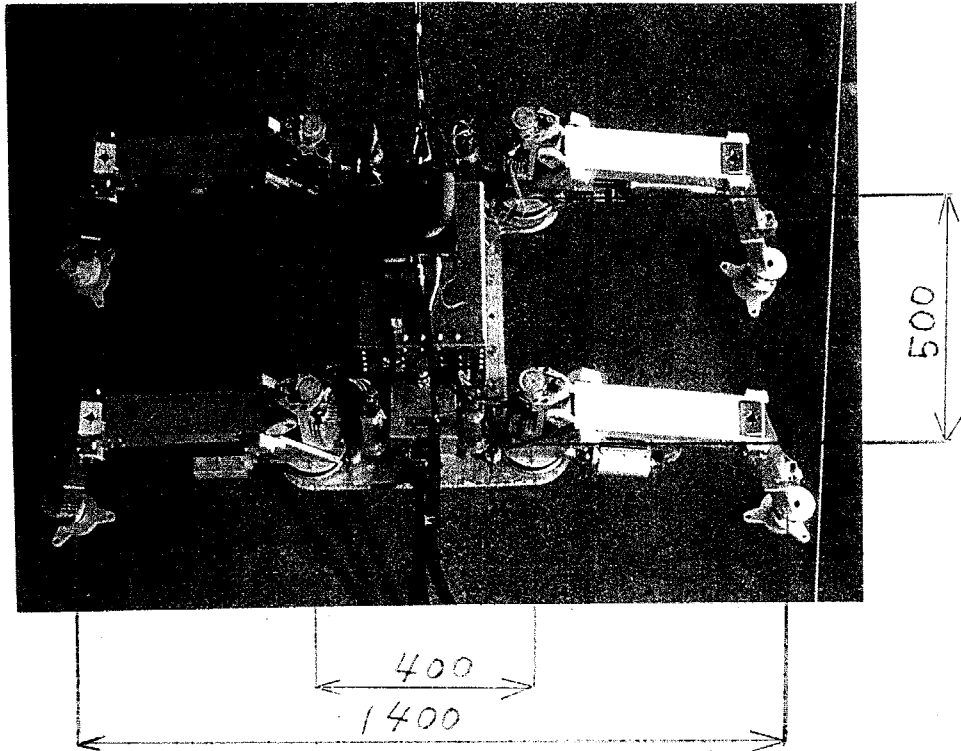


Fig.5-14 (a) Overall view of TITAN VII from above.

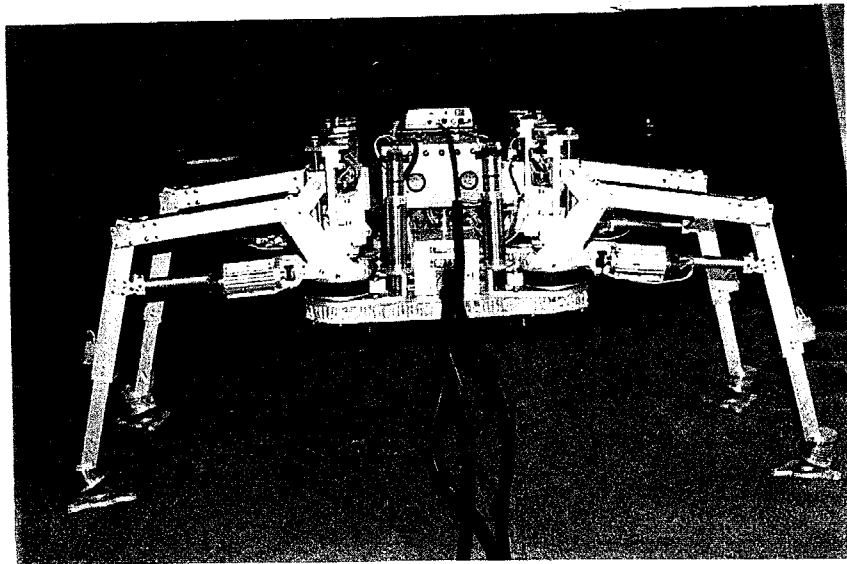


Fig.5-14 (b) Overall view of TITAN VII from back.

items \ actuator	A <sub>h</sub>	A <sub>hk</sub>	A <sub>θ</sub>
stroke	120 [mm]	130 [mm]	200 °
rated speed	at ball screw 18 [mm/s]	at ball screw 18 [mm/s]	at big pulley 0.2 [rad/s]
rated force	at ball screw 75 [kgf]	at ball screw 75 [kgf]	at big pulley 6.5 [kgf m]
reduction ratio at gear head	10	10	400
DC motor	maximum power 190 [W]		

Table.5-1 Leg specification of TITAN VII.

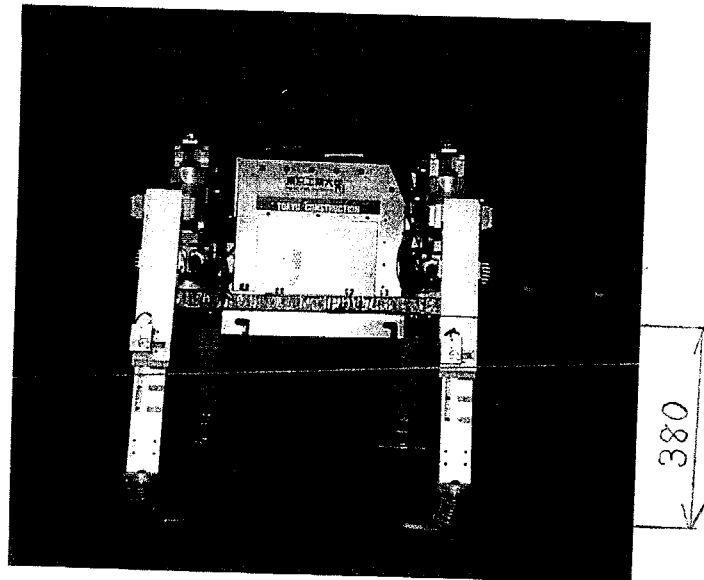


Fig.5-14 (c) Overall view of TITAN VII from side.

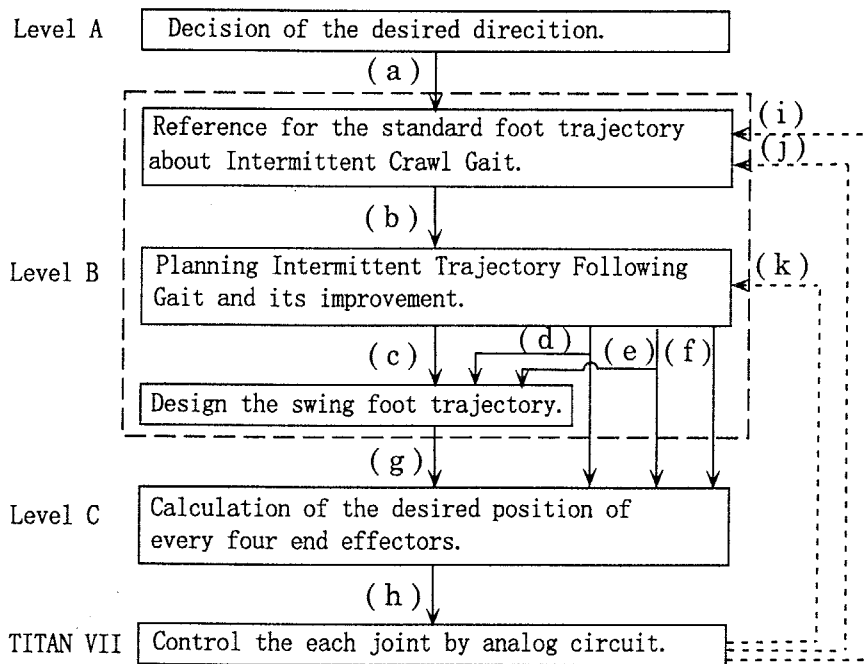
## 5.5 制御システムの構成

歩行機械の制御システムは、大別するとレベル A～レベル C の3つの階層に分類すると望ましいことが分かっている [12]. このうち、レベル A は人間オペレータに相当し地勢や作業目的に応じて移動戦略を生成し側行角 $\alpha$ を決定する系である. 本研究で目標とする傾斜面作業型4足歩行機械においては、このレベルはすべてオペレータの判断に委ねることになっているため、研究対象外としている.

レベル B は知能的歩容制御系であり、具体的には前もってオフラインで誘導されている基準間歇クロール歩容に関するデータベースをもとに間歇型追従歩容の歩容計画を司る系である. Level A で決定された側行角 $\alpha$ 、現状ではオペレータによって与えられるが将来的には姿勢センサで自動認識を行なう予定の最大傾斜角 $\theta$ と最大傾斜線方位角 $\xi$ 、これら3変数から基準形を決定する. 基準形を決定することで遊脚の順序、重心移動量、遊脚着地点の3つの制御量が3.4節に示したアルゴリズムに従って定まってくるのである. また、遊脚着地点を定めることにより同時にサーボ系に与えるための遊脚復帰軌道の目標値生成を行なう役目もこの系が果たしている. なお将来的には、レンジファインダによって着地不可能な位置の認識、あるいは障害物を避けるための遊脚高さの調整など、間歇型追従歩容を修正するアルゴリズムがこの系に加わる予定である.

最下位のレベル C は、生物でいえば脳幹・脊髄系での反射的運動調整に相当する制御を行なう系である. 本研究では、時々刻々の脚関節の目標角度の算出と足先接触および力センサの状態認識を行ない、非常状態には対処できる動作を生成している.

以上の階層構造を有する制御システムの具体的なフローを Fig.5-15 に示す. また、制御中の動作に関しては、Level A に相当するオペレータからの側行角 $\alpha$ の入力および制御系で計算される Level B が間歇クロール歩容における1脚の遊脚中につき1回行なわれ、その出力結果が次の遊脚もしくは重心移動時においてサンプリング周期毎に割り込まれる Level C の出力に反映される (Fig.5-16).



- Signal transmitted to the next flow.  
 ---> Signal planned to be used in the future.

(a)	側行角 $\alpha$
(b)	基準歩容のデータ
(c)	現在の足先位置
(d)	遊脚する足の選定
(e)	重心移動位置
(f)	遊脚の着地位置
(g)	遊脚の軌道
(h)	各関節の目標角度
(i)	最大傾斜角 $\theta$
(j)	最大傾斜線方位角 $\xi$
(k)	足裏接触センサ

Fig.5-15 Signal flow chart to control TITAN VII.

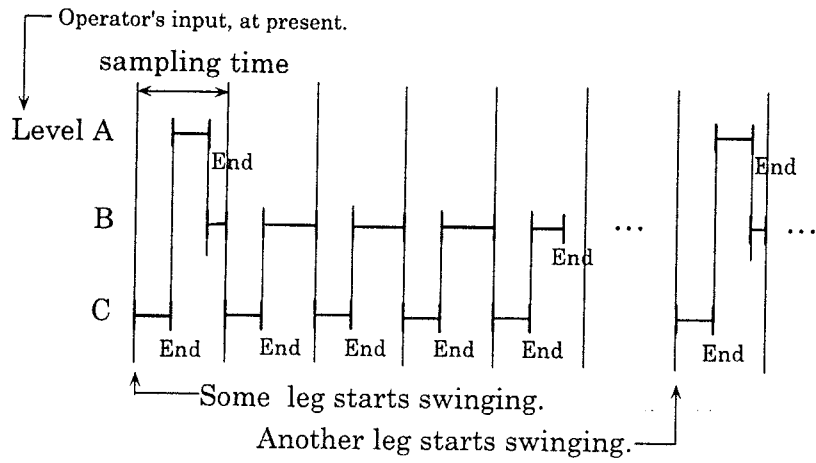


Fig.5-16 Timing chart to control TITAN VII.

## 第6章 実験

前章までに論じた間歇クロール歩容, 間歇型追従歩容, ワイヤによる牽引補助の有効性を検証するため, 機械モデル TITAN VII を用いた歩行実験を行なう. ここでは, 基準間歇クロール歩容の生成結果の提示と, 生成された歩容による緩斜面と急斜面における歩行の実現を試みる.

### 6.1 基準間歇クロール歩容の生成結果

3.3節で提案した基準歩容の誘導を基に開発したソフトウェア「SICNOS」(Standard Intermitten Crawl gait の Software) を用いて生成した基準歩容の結果を述べることにする. ただし, 想定している歩行は重心から  $h = 410[\text{mm}]$  離れた接地面上で支持脚を駆動するものとしているため, TITAN VII の各脚の脚可動範囲は Fig.6-1(a) のような扇型図形を形成している. この制約条件のもとで生成された基準間歇クロール歩容は (i)~(iii) の特徴を有することが判明した.

(i) 基準間歇クロール歩容における安定性と歩行速度の関係を Fig.6-2 に示す. ただし, このときの最大傾斜度は  $\theta = 0^\circ$  で, 側行角は  $\alpha = 0^\circ$  を保っている. 実際には, 図の縦軸は各  $NE$  安定余裕における最大ストローク長  $\lambda^*$  を示しているが, この値は一周期の間に目標方向へ重心が進む距離と一致するため, 実質上平均歩行速度に比例すると解釈できる. また, 「SICNOS」は本来, 初期状態の  $NE$  安定余裕として過度に大きい値を設定し, その  $NE$  安定余裕を満たす脚軌道が見つかるまで徐々に  $NE$  安定余裕を小さく設定し直し, 初めて見つかった時点で脚軌道候補が複数存在したならばストローク長が最長の軌道を基準歩容として選択する, というものであった. Fig.6-2 は, そのアルゴリズムにさらに「最大ストローク長  $\lambda^*$  がある値以上を満たすまで  $NE$  安定余裕を小さく設定し直す», というプロセスを付加して得られた結果である. 従って縦軸の値は, 横軸の各  $NE$  安定余裕を保有する数ある脚軌道のうち最大のストローク長を示しており, ある  $\lambda^*$  より大股の歩行を望むのであれば,  $NE$  安定余裕を減らさざるを得ないという結論になる. すなわち,  $NE$  安定余裕と歩行速度とはトレード・オフの関係が存在する. なお,  $S_{NE} = 29$  から  $30$  へ増加する歩行をするために  $\lambda^*$  を  $609$  から  $347$  へ大きく減らす必要があるのは, 扇型図形特有の性質のためである. Fig.6-1(b) の点  $R_a$  は  $S_{NE} = 29$  の基準歩容の折り返し点であるが,  $S_{NE} = 30$  に増やすために点  $R_a$  をさらに胴体内側方向へ引き寄せ



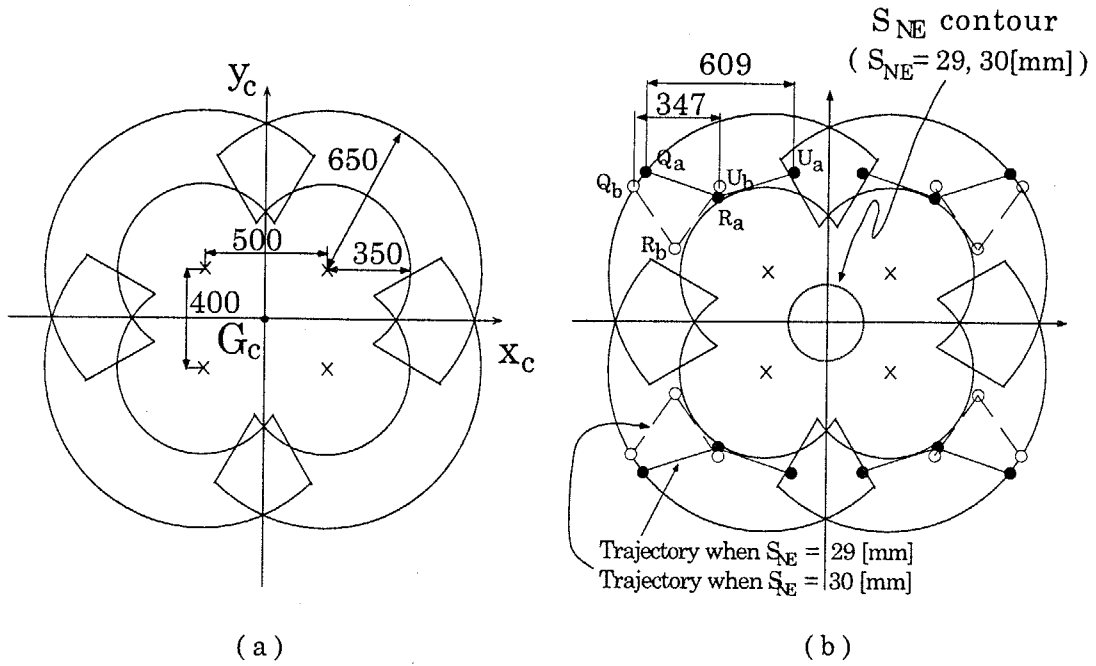


Fig.6-1 (a) Range of each leg for TITAN VII when its height equals to 410[mm].  
 (b) Comparison for standard foot trajectories between  $S_{NE} = 29$ [mm] case and  $S_{NE} = 30$ [mm] case.

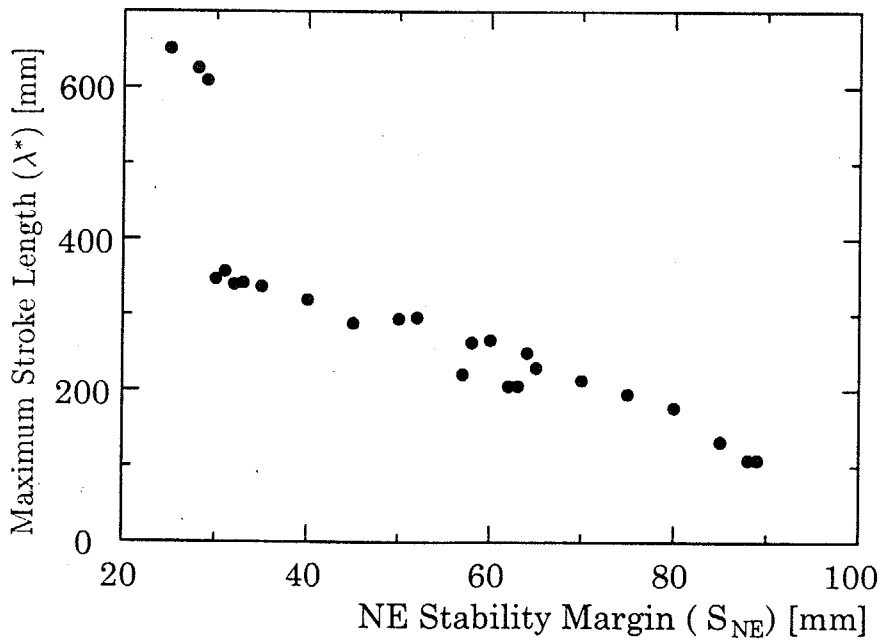


Fig.6-2 Relationship between NE Stability Margin and maximum stroke when  $\theta = 0$  and  $\alpha = 0$ .

Mark	leg 1	leg 2	leg 3	leg 4
•	$f$	$r$	$\bar{r}$	$\bar{f}$
▽	$\bar{f}$	$f$	$r$	$\bar{r}$

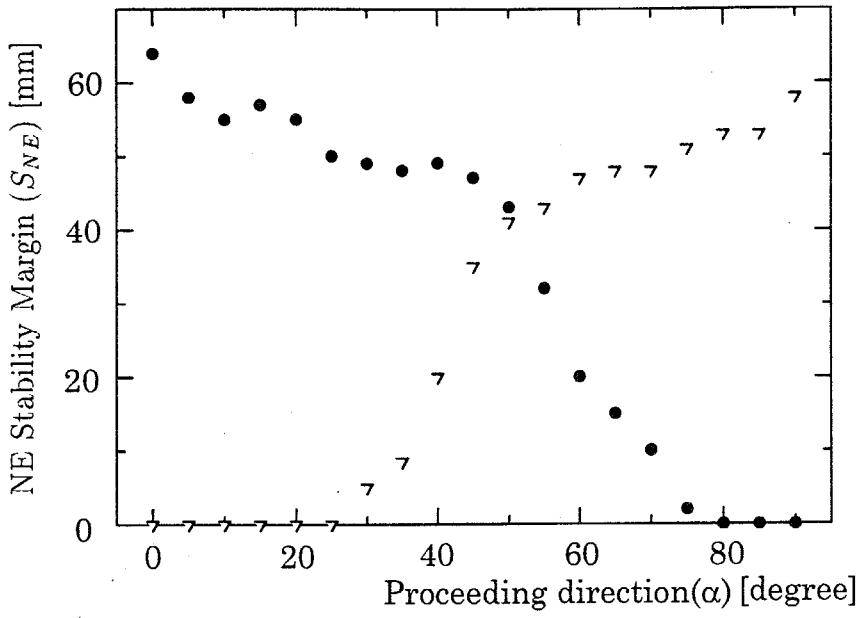


Fig.6-3 Relationship between proceeding direction and NE Stability Margin when  $\theta = 0$  and  $\lambda^* \geq 250$ [mm].

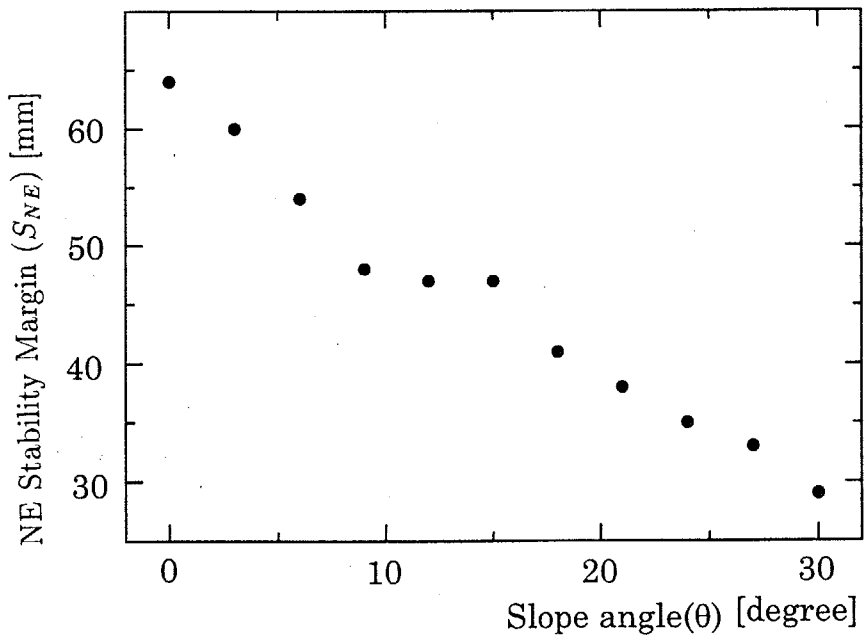


Fig.6-4 Relationship between slope angle and NE Stability Margin when  $\alpha = 0$  and  $\lambda^* \geq 250$ [mm].

るだけの脚可動範囲の余裕は存在しない。そこで、 $\overline{Q_a U_a}$ を短くして引き寄せ量を増やそうとすると  $U_a$ が  $G_c$ から離れた分だけ  $NE$ 安定余裕は新たに減ってしまうため、さらに大きく胴体内側方向へ引き寄せる必要がある。これらを繰り返した結果得られた脚軌道が、ストローク長を大幅に減らした  $VQ_b R_b U_b$  というわけである。このような扇型脚可動範囲の性質は Fig.6-2~4 の不連続なデータも誘発していると思われる。

(ii) 基準間歇クロール歩容における側行角 ( $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ ) と安定性との関係を Fig.6-3 に示す。ただし、このときの最大傾斜度は  $\theta = 0^\circ$  で、最大ストローク長  $\lambda^* \geq 250[\text{mm}]$  という条件を保っている。leg 1 =  $f$ , leg 2 =  $r$ , leg 3 =  $\bar{r}$ , leg 4 =  $\bar{f}$  のように割り振った場合は、側行角の増加とともに  $NE$ 安定余裕はほぼ単調に減少し、側行角  $\alpha = 80^\circ$  以上の歩行を安定に実現できない傾向を示している。それに対して、leg 1 =  $\bar{f}$ , leg 2 =  $f$ , leg 3 =  $r$ , leg 4 =  $\bar{r}$  のように割り振った場合は、全く逆の傾向をたどり側行角の増加とともに  $NE$ 安定余裕がほぼ単調に増加していることが分かる。従って  $\alpha = 50^\circ$  を境に leg1~4 の割り振りを改めることによって常に  $S_{NE} \geq 40[\text{mm}]$  の  $NE$ 安定余裕を維持することが可能となるのである。なお、側行角  $\alpha = 45^\circ$  に関して対象性を有していない理由は脚の配置位置が  $x_c$  軸方向に長いことに起因している。

(iii) 基準間歇クロール歩容における最大傾斜角と安定性との関係を Fig.6-4 に示す。ただし、このときの側行角は  $\alpha = 0^\circ$  で、最大ストローク長  $\lambda^* \geq 250[\text{mm}]$  という条件を保っている。Fig.6-4 の結果より、最大傾斜度の増加に伴い  $NE$ 安定余裕が減少する傾向が一目瞭然である。この結果と (i) の結果とを融合すると、最大傾斜度の増加による安定性の減少を押えるにはストローク長を徐々に短くすればいいという発想も生まれる。ところで、 $\theta = 30^\circ$  において  $S_{NE} = 30$  近くを有しているが、実際の歩行実験では足裏と人工芝で貼られた接地面との間にすべりが生じ、TITAN VII による安定な単独歩行を確認した最大傾斜度は現在までのところ  $\theta = 15^\circ$  である。なお、ここまでは膈節のリンク長を  $560[\text{mm}]$  に一定に保持した場合の結果であったが、 $\theta = 15^\circ$  において後ろ足を  $680[\text{mm}]$ 、前足を  $480[\text{mm}]$  にすることで重心が相対的に傾斜面上側に移動する効果によって  $S_{NE}$  は 47 から 56 へ増加することが明らかとなった。

## 6.2 緩斜面の歩行実験

「SICNOS」によって計算された基準歩容のデータをもとに、TITAN VII を用いて緩斜面を歩行する実験 (Fig.6-5) を行なった。実験は最大傾斜度  $15^\circ$  の凹凸のない傾斜面で行い、間歇クロール歩容で重心の平均移動速度を  $46 \sim 52[\text{mm/s}]$  に維持しながら、胴体

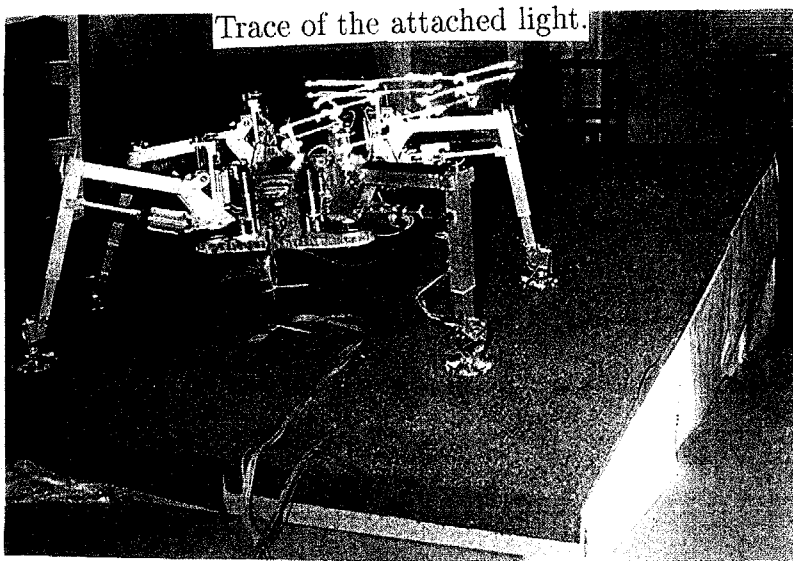


Fig.6-5 Trace of the body motion of Intermittent Trajectory Following Gait when TITAN VII walks on the 15 degree slope. The motion trace is visualized by the light.

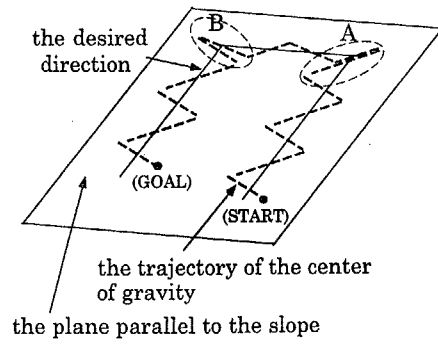


Fig.6-6 Top view of the desired trajectory of Intermittent Trajectory Following Gait.

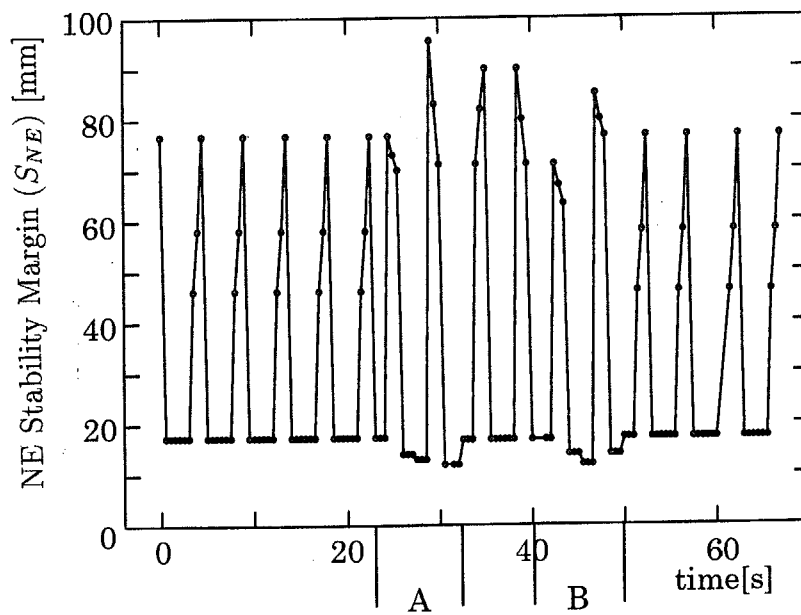


Fig.6-7 The transfer of NE stability margin in the experiment of Fig.6-5.

の目標進行方向を Fig.6-6 の実線で示したコの字形軌道を辿らした。この時、目標軌道が直線部では間歇クロール歩容、また目標軌道の屈曲部では間歇型追従歩容を自動的に選択させるようにした。その結果、実際の歩行機械の重心の辿るべき目標軌道は破線で示したジグザグ軌道となるが、実際の歩行運動は Fig.6-5 に示すように胴体上部に添えつけたライトによる軌道で示されるような運動となった。この時の間歇クロール歩容に関しては、最大傾斜線方向移動時は最大ストローク長 $\lambda^*=475[\text{mm}]$ 、最大傾斜線に対して直角方向移動時は $\lambda^*=410[\text{mm}]$ の基準歩容を用いた。なお、指令値のサンプリングタイムは $10[\text{ms}]$ であった。移動面の凹凸などの影響で若干のずれがあるが、実際に指令値を追従する運動によって安定な姿勢を保持して傾斜面の全方向移動が実現できた。なお、この際のNE安定余裕の時間変化は Fig.6-7 に示すような結果となり、間歇型進行方向追従歩容を採用することで方向転換時(AとB)にNE安定余裕が若干低下するものの、安定な歩行をしていることが分かる。

### 6.3 急斜面の歩行実験

ワイヤの牽引補助を用いた TITAN VII の歩行実験は Fig.6-8 に示す環境で行なった。まず最初に、牽引補助の実験に用いたシステムの構成を述べる。実験を行なった斜面は最大傾斜度 $\theta = 30^\circ$ 、最大傾斜線方向の移動可能距離は $5000[\text{mm}]$ 、プーリ間距離 $2300[\text{mm}]$ であり、その下側に定格出力 $400[\text{W}]$ のACサーボモータで駆動されるウインチを左右1台ずつ設置した。ウインチから手繰り出されるワイヤは、斜面上部に接地面と平行になるように固定されたプーリを經由し TITAN VII 前方で結合されている。プーリのワイヤ吐きだし口には手繰りだし角度 $\phi_1, \phi_2$ を計測するための角度センサ (Fig.6-9) を取り付けている。その構造はバネで引かれるリンクの先端をワイヤが常に接触するように配置し、そのリンクの微小な角度変位を4節リンクを用いて拡大したうえで、その角度を回転型ポテンシオメータで計るといった簡易で耐久性のあるものとした。ただし、ワイヤが接触するリンクの角度変位とポテンシオ変位角とは線形でないため、補正する必要がある。TITAN VII 前方と結合する直前のワイヤ途中には牽引力( $F_1, F_2$ )を計測するための力センサ (Fig.6-10) が取り付けてあり、その構造はバネの変位をリニアポテンシオで計測できるようになっており、ワイヤの手繰り出し量に偏差が生じても歩行機械に無理な内力が働かないようになっている。これらのセンサからの情報を TITAN VII 制御用とは別のパソコンに入力し、Fig.4-4 の制御系によって AC サーボモータを駆動している。牽引補助の精度を調べる実験は、Fig.6-8 に示すように歩行機械を台車に乗せた総重

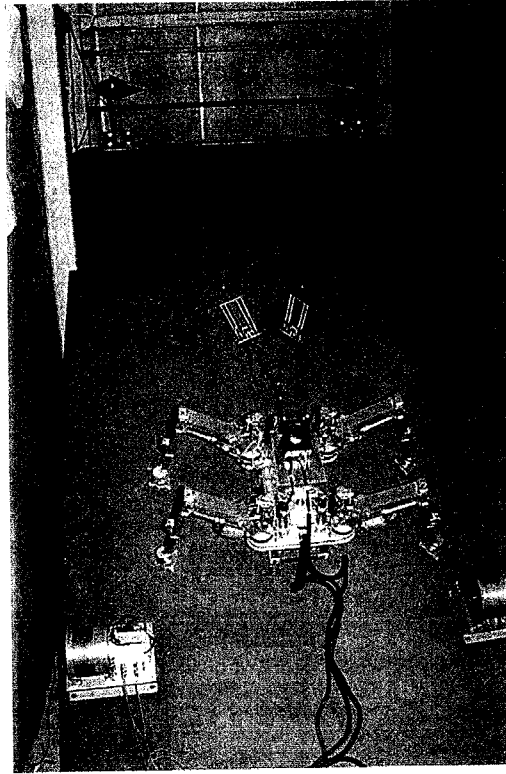


Fig.6-8 Overall view of wire towing system, equipped with 30 degree slope.

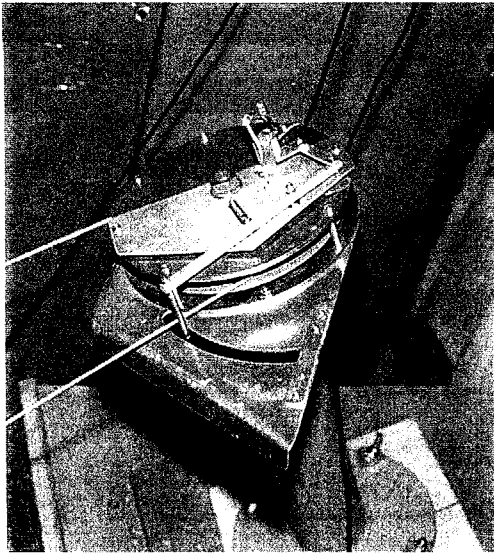


Fig.6-9 Angle sensor to measure  $\phi_1$ . This sensor consists of a pair of quadric crank chain and a spring.

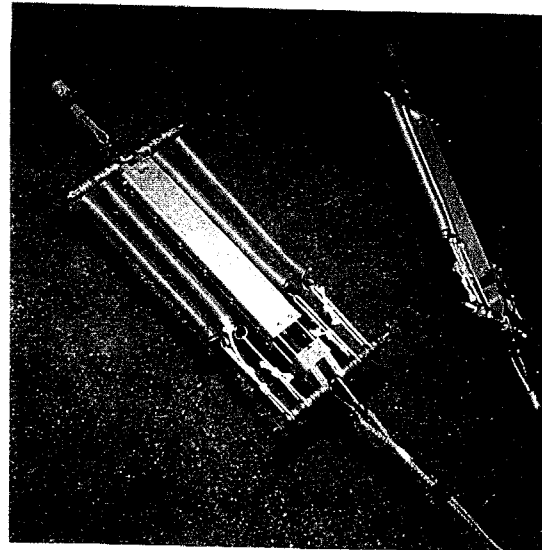


Fig.6-10 Force sensors to measure  $F_1$  and  $F_2$ . These sensors consist of a linear potentiometer and springs.

← Force pulled by a wire ← Ideal resultant force at this position. ← Real resultant force

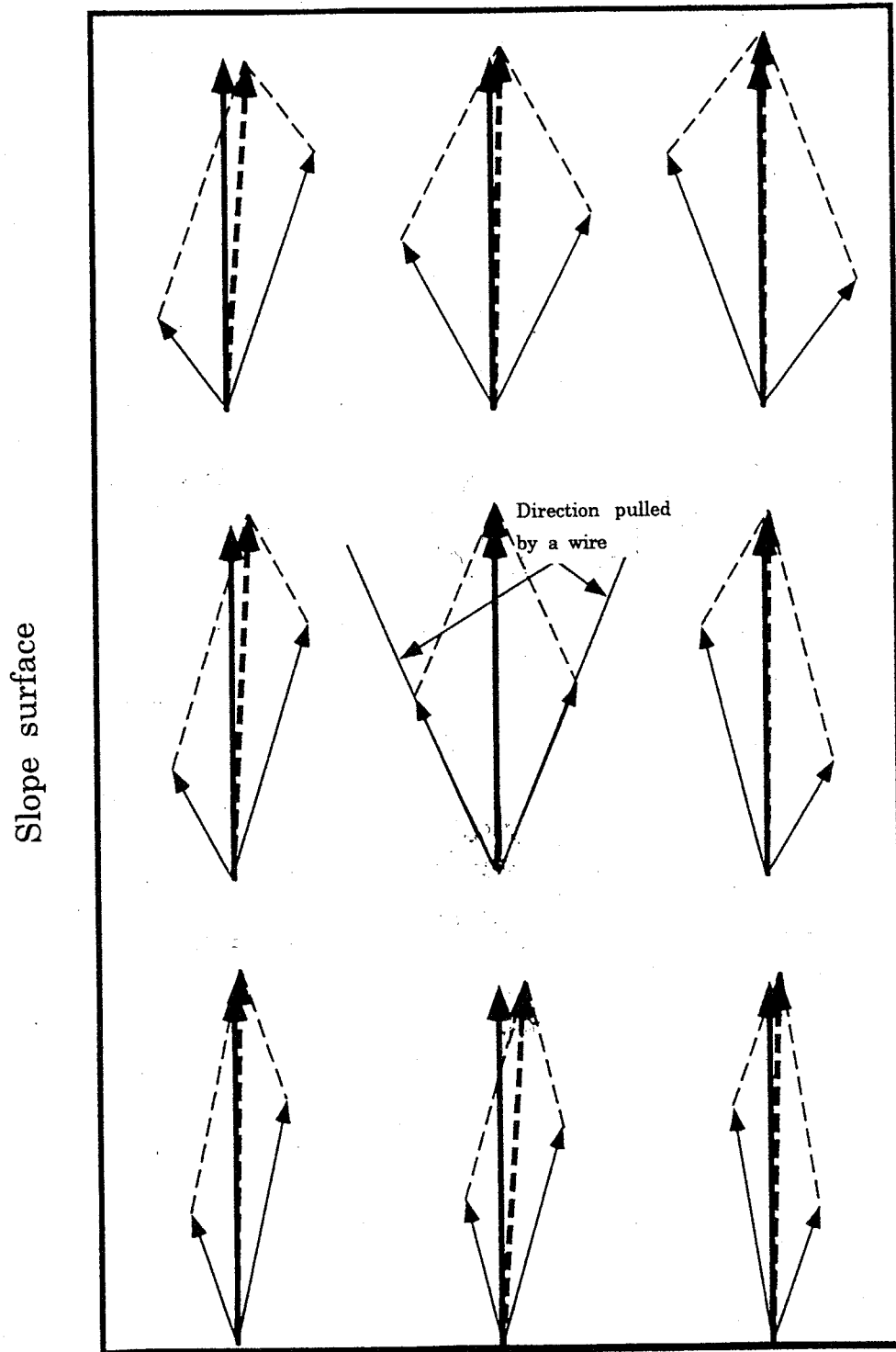


Fig.6-11 Experimental result of wire towing system.

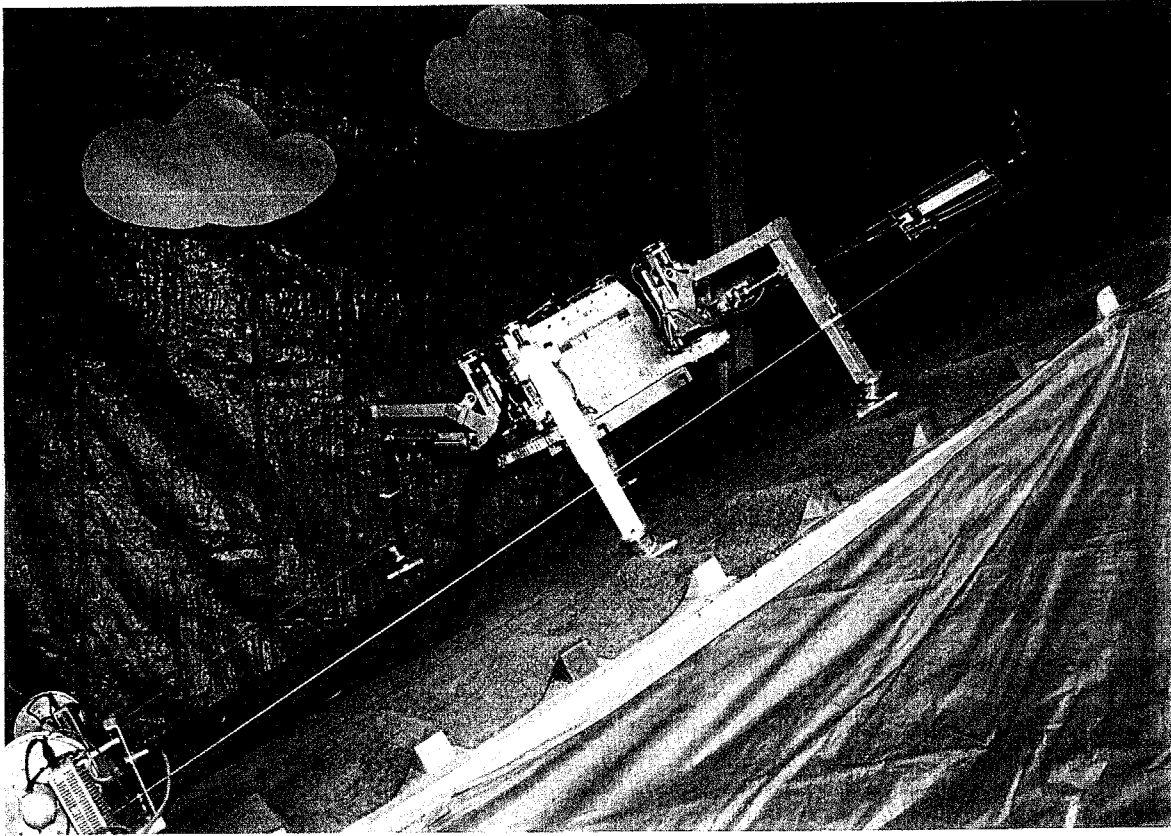


Fig.6-12 TITAN VII, walking around 30 degree slope pulled by a pair of wires.





Fig.6-13 Whole view of 70 degree slope.  
Two pulleys are set on its top  
and TITAN VII is balanced with  
a pair of two wires.

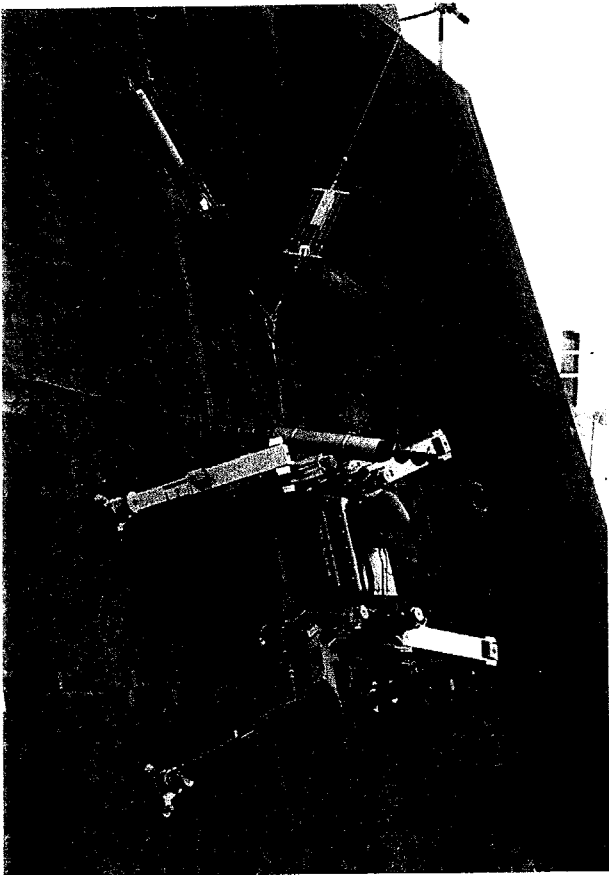


Fig.6-14 Imitation of boring action  
on 70 degree slope. TITAN VII helps  
the drill to bore by putting its  
body close to the slope.

量 60[kgf] の移動物体を斜面のあらゆる位置に移動したとき 2 つの力センサによって計測される合力、および各位置において理想的に牽引すべき合力とを比較することを行なった。その結果を Fig.6-11 に示す。ワイヤ手繰りだし角度  $\phi_1$   $\phi_2$  の計測誤差に起因する両者の合力の誤差が生じているものの、実際には各位置において移動物体を静止させることが可能であった。また、実験者が移動物体を別方向へ押し引きする外力に対して追従する手繰りだし制御が確認できた。

以上のような牽引補助システムの作動を確認した上で、TITAN VII から台車を抜き取り歩行実験を行なった。歩行に用いた基準間歇クロール歩容は、 $\theta = 0^\circ$  における  $\alpha = 0^\circ$  と  $\alpha = 90^\circ$  のそれぞれの側行角へ移動する際に  $S_{NE} \geq 23[\text{mm}]$  を有する基準形のもとに、最大傾斜線方向→水平方向→最大傾斜線方向という目標方向へ追従する間歇型追従歩容であった。このような歩容により平均移動速度 60~75[mm/s] で  $30^\circ$  の傾斜面を安定に歩行できることが確認できた (Fig.6-12)。

さらに、このような牽引補助システムの汎用性を検証するために、表面をコンクリートで覆われた最大傾斜度  $\theta = 70^\circ$  の一定斜度を有する急斜面で TITAN VII を用いた歩行実験を行なった。実験環境は Fig.6-13 に示す最大傾斜線方向の移動可能距離 5000[mm]、プーリ間距離 4500[mm] の凹凸のない傾斜面である。牽引補助システムの目標牽引力設定過程において最大傾斜度の変更を行なうだけで TITAN VII は  $30^\circ$  における歩行実験時と全く同じ歩容を安定に遂行することができた (表紙)。

さらに、急斜面で牽引補助システムを用いた 4 足歩行機械はこのような単なる移動運搬作業にとどまらず、4 脚接地状態に胴体の 6 自由度運動を生かしたマニピュレータの機能としても使用することができる。たとえば、オーガを装着した胴体の上下運動によって硬い岩板の掘削作業を援助することもでき (Fig.6-14)、高出力脚機構を有効活用した 4 足歩行機械による新たな自動化作業が可能となってくる。

## 第7章 結論と今後の課題

### 7.1 結論

本論文では、4足歩行機械を土木建設作業現場等の傾斜面における作業型移動機械として実用化することを想定し、機構と制御の両面から追究を行なった。この研究を始めにあたって、複雑な地形を有する実際の傾斜面を単純な特徴を有する不整地タイプの複合形態とみなした上で、各タイプにおける技術動向を検討した結果、一定斜度の傾斜面における4足歩行機械の最適な歩容について十分な検討が行なわれてこなかったことが明らかになった。そこで、4足歩行機械が任意斜度の傾斜面を歩行する際、安定性を最大化するための歩容生成に主眼をおき研究を行なった。

第2章では、不整地における歩行機械の静的安定性評価基準について総合的な比較検討を行い、簡易実験の結果に基づいて転倒に至りにくい姿勢としては、Kleinらによって提案された「エネルギー安定余裕」を最大にするものであることを確認した。しかし、一般の歩行機械の安定性の評価基準としてはエネルギーの次元をそのまま用いることは不適切であることを指摘し、新たに「正規化エネルギー安定余裕(あるいはNE安定余裕)  $S_{NE}$ 」を提案した。さらに、NE安定余裕を歩容計画に利用するために必要な「 $S_{NE}$ 等高線」の作成方法を示し、その特徴を論じた。

第3章では、4足歩行機械を作業型移動機械として実用化することを想定した安定性の高い歩容の提案を行った。提案した歩容は、第2章で提案したNE安定余裕が3脚支持状態で最大化できる位置へ4脚支持状態のうちに重心を移動させる、「間歇クロール歩容」と呼ぶ歩容であり、従来のクロール歩容と比べて著しく安定性を高く保ち得ることが明らかとなった。間歇クロール歩容の脚軌道は胴体座標系からみるとV字形を形成し、歩行環境や目標方向に応じてV字形を変化させることで安定性が変わるため、安定性と移動速度の点から最も効率の良い基準形のあることを示し、そのような基準間歇クロール歩容の誘導を行った。さらに、任意方向への方向転換をするため、基準間歇クロール歩容を組み合わせた「間歇型追従歩容」の導入を行った。

第4章では、急斜面における4足歩行機械の移動作業を想定したワイヤによる牽引補助の導入を行った。斜面上部から歩行機械を牽引するワイヤ手繰り出し量の制御手法としては、牽引力ベクトルと歩行機械の重力ベクトルとの合成ベクトルを常に斜面に対して垂直にするように力制御することで、歩行機械からみて水平面と同じような重力場を形成することが可能であることを示した。これにより、水平面歩行時と同様のNE安定

余裕を維持して間歇クロール歩容を遂行できるわけで、このような牽引力を2本のワイヤの合力によって生成すれば歩行機械は全方向への移動が可能となり、急斜面においても間歇型追従歩容ができる原理を示した。

第5章では、傾斜面歩行特有の機構を有する機械モデル TITAN VII について論じた。脚駆動機構については、凹凸の激しい地形に対応する対地適応機能と高い負荷重量特性を将来油圧駆動型実用機で実現することを想定し、直動型干渉駆動機構の導入を行なった。また、機構的な安定性増加を図り、脚伸縮機構の導入も行なった。実際の不整地歩行を想定すると足先を挫きにくい機構が必要なことを指摘した上で、その対処策として対地適応型足裏機構「ロッカー・ボギー・ソール」の提案を行なった。

第6章では、第2章から第4章までの理論を第5章で論じた TITAN VII によって検証するための歩行実験を述べた。第3章で提案した誘導原理によって生成された間歇クロール歩容には、安定性と歩行速度にトレード・オフの関係があること、側行角によって安定性が異なること、最大傾斜度の増加とともに安定性が減少すること、脚伸縮機構の導入で安定性が増加することなどの特性があることを明らかにした。また、最大傾斜度15°の緩斜面の実機モデルを用いた単独歩行実験、および最大傾斜度30°と70°の急斜面におけるワイヤ牽引補助との協調歩行実験により、上記理論の有効性を検証することができた。さらに、胴体にオーガを装着したボーリング作業のデモンストレーションを行ない、歩行機械胴体の自由度を利用した硬い岩板などの掘削援助作業の提案を行なった。

## 7.2 今後の課題

本論文で得られた知見の他に、4足歩行機械が傾斜面における作業型移動機械として実用化するために最小限必要と思われる技術を、1.2.2で分類した各不整地環境に即してのべる。

(Terrain A)においては、遊脚が着地する瞬間に足裏が接触地形に即した姿勢で接地することが望ましいため、単なる受動機構でなく、着地する瞬間だけ能動的に足裏姿勢の制御をする簡便な機構が必要と思われる。また、支持脚時に挫くことがないように足裏に対する足首の回転中心が地面下方に存在するような機構が望ましい。

(Terrain B)においては、従来までに提案されてきた姿勢制御と融合した様々な支持脚力制御手法が、支持脚中に突然地形変化する土砂面においても適用可能かどうかを確認し、さらに必要であれば新たな凹凸吸収型容の生成が求められるであろう。

(Terrain C)においては、接地不可能な環境を認識するための情報処理系の開発、およ

び不整地を認識したうえで歩行を連続的に遂行できるように、数歩先の接地点を予測した事前計画型歩容の生成と、さらにそれでも認識不可能だった不整地を足先接触センサで認識し、接地点の最終補正を行なうその場探索型歩容との融合などが必要と思われる。

(Terrain D)においては、傾斜度の変化する傾斜面を歩行する際、変化する傾斜度の認識方法と、遷移状態においても十分な安定性を確保するための歩容生成が早急に求められる。さらに、移動性能向上のために傾斜面における旋回歩容の基準形の確立と、並進歩行と旋回歩容間の遷移も必要であろう。

(Terrain E)においては、実際の急斜面は傾斜度が変わるため、その変化分を歩容で吸収するかワイヤの牽引力で吸収するか、その判断基準の確立が必要と思われる。

## 謝辞

本論文の研究と執筆を行なうにあたり、全面的に御指導いただいた、東京工業大学工学部機械宇宙学科 広瀬茂男教授に謹んで感謝の意を表します。そして、本研究をあたたく見守ってくださり御指導頂いた 米田完助教授に深く感謝いたします。また、本研究について数々の有益なアドバイスを頂いた狼教授、倉爪亮助手、福島文彦助手、松永三朗助手に謹んで御礼申し上げます。

また、本研究を共同遂行して頂いた五月女剛君（現 川崎重工）、石川哲君（修士2年）、河内和彦君（修士1年）、土居隆宏君（修士1年）に深く感謝します。

また、本研究の機械モデル開発にあたり、多大な御協力を頂いた東京精機株式会社に謹んで御礼申し上げます。さらに、本研究の遂行にあたり全面的に御協力を頂いた東急建設株式会社に謹んで御礼申し上げます。

最後に、様々な御協力、御討論をして頂いた広瀬・米田研の皆様方に感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] R.B.McGhee, "Control of legged locomotion systems," Proc.Joint Automatic Control Conference,San Francisco, 205-215(1977)
- [2] 広瀬真人, 竹中透, 他, "人間型ロボット,"日本ロボット学会誌 Vol.15, No.7, 983-985(1997)
- [3] C.A.Klein,R.L.Briggs,"Use of Active Compliance in the Control of Legged Vehicles",IEEE, Trans SMC, Vol. SMC-10, No.7, 393(1983)
- [4] 金子, 谷江, 堀内, "路面の変形を考慮した多足歩行機械の一制御 -交互3点支持歩行を中心に-",日本ロボット学会誌, 4-3, 231-240(1986)
- [5] D.M.Gorinevsky, A.Yu.Shneider,"Force Control in Locomotion of Legged Vehicles over Rigid and Soft Surface", Int.J.Robotics Resarch,Vol.9,No.2, 4-23(1990)
- [6] D.E.Orin, S.Y.Oh,"Control of force distribution in robotic mechanisms containing closed kinematic chains", Trans. of the ASME J. of Dynamic systems, measurement and control, Vol.102, 134-141(1981)
- [7] C.A.Klein, K.W.Olson, D.R.Pugh, "Use of force and attitude sensors for locomotion of a legged vehicle over irregular terrain", Int.J. Robotics Research, Vol.2, No.2, 3-17(1983)
- [8] 米田, 飯山, 広瀬, "4足歩行機械の知能的歩容決定に関する研究 その2 1 力情報を用いた歩容制御", 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集,575-578(1992)
- [9] Bares J., Hebert M., Kanade T.,"Ambler: An Autonomous Rover for Planetary Exploration",IEEE Computer, C-22,No.6,18-26(1989)
- [10] McDonald, Gurpen, "Building walking gaits for irregular terrain from basis controllers", Proc. Int. Conf. Robotics and Automation (1997)
- [11] 藤江, 細田, 他, "4脚歩行機構の開発 (1) 冗長自由度機構の運動制御開発方式の検討", 第6回数日本ロボット学会学術講演会講演予稿集,321-324(1988)
- [12] 広瀬, 福田, 菊池,"4足歩行機械の制御システム", 日本ロボット学会誌,Vol.3,No.4,304-323(1985)
- [13] 高西, 他, "非平坦路上における上体補償型2足歩行", 第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 691-694(1989)

- [14] 安達, 小谷内, 中村, 中野, "脚に設置された力センサを用いた4脚歩行ロボットの適応歩容", 日本ロボット学会誌, Vol.9 No.6, 707-717(1991)
- [15] 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, 25-4, 455-461(1989)
- [16] W.Lee, D.E.Orin, "The Kinematics of Motion Planning for Multilegged Vehicles Over Uneven Terrain", IEEE J. of Robotics and Automation, Vol.4-2, 204-212(1988)
- [17] Red Whittaker, David Wettergreen, John Bares, "Configuration of a Walking Robot for Volcano Exploration", Proceedings of ICRA'93, 487-492(1993)
- [18] Murali Krishna, John Bares, Ed Mutschler, "Tethering System Design for Dante II", Proceedings of the 1997 IEEE, Robotics and Automation, 1100-1105(1997)
- [19] Video of the Workshop, "New Approaches on Dynamic Walking and Climbing Machines", ICAR'97(1997)
- [20] K.Yoneda, K.Suzuki, Y.Kanayama, "Gait Planning For Versatile Motion of A Six Legged Robot", IEEE'94 Robotics and Automation, 1338-1343(1994)
- [21] 広瀬, 井上, 米田, "ウイスカセンサとその複数信号の伝達", 日本ロボット学会誌, Vol.6 No.2, 13-20(1988)
- [22] M.Vukobratovic, J.Stepanenko, "On the Stability of Authoromorphic Systems", Mathematical Biosciences, Vol.15, 1-37(1972)
- [23] 高西, "上体の運動によりモーメントを補償する2足歩行ロボット", 日本ロボット学会誌, Vol.11 No.3, 348-353(1993)
- [22] M.Vukobratovic, J.Stepanenko, "On the Stability of Authoromorphic Systems", Mathematical Biosciences, Vol.15, 1-37(1972)
- [24] McGhee, R.B. and Frank, A.A., "On the Stability Properties of Quadruped Creeping Gaits," Math. Biosciences, 3 331/351(1968)
- [25] 米田, 広瀬, "歩行機械の転倒安定性", 日本ロボット学会誌, 517/522(1996)
- [26] 広瀬, 岩崎, 梅谷, "歩行機械の静的安定性評価基準", 第21回自動計測制御連合講演会, 253/254(1978)
- [27] E.G.Papadopoulos and D.A.Rey, "A New Measure of Tipover Stability Margin for Mobile Manipulators," IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3111/3116 (1996)



- [28] DOMINIC A. MESSURI, CHARLES A. KLEIN, "Automatic Body Regulation for Maintaining Stability of a Legged Vehicle During Rough-Terrain Locomotion," IEEE JOURNAL OF ROBOTICS AND AUTOMATION, vol.RA-1, No.3, SEPTEMBER (1985)
- [29] A.Ghasempoor and N.Sepehri, "A Measure of Machine Stability for Moving Base Manipulators," IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2249/2254(1995)
- [30] 広瀬, 米田, "4足歩行機械の静動融合歩容とその連続軌道生成," 日本ロボット学会誌, Vol.9 No.3 267/275(1991)
- [31] 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, vol.4, No.4, 364/372 (1986)
- [32] 広瀬, 梅谷, "歩行機械の脚形態と移動特性," バイオメカニズム 5, 東京大学出版, 242-250 (1980)
- [33] 広瀬, 佐藤, "多自由ロボットの干渉駆動," 日本ロボット学会誌, vol.7, No.2, 128-135 (1989)
- [34] K.Arikawa, S.Hirose, "Study of Walking Robot for 3 Dimensional Terrain," '95 IEEE Robotics and Automation, 703-708 (1995)
- [35] 広瀬, 馬, "ワイヤ干渉型駆動多関節マニピュレータの開発," 計測自動制御学会論文集, vol.26, No.11, 1291-1298 (1990)
- [36] 広瀬, 米田, "光学式変位センサと力センサ," 日本ロボット学会誌, vol.9, No.7, 910-911 (1992)
- [37] 広瀬, "連結差動機構とその応用," 設計製図, 362-366 (1986)
- [38] 広瀬, 米田, 他, "直動型4脚歩行機械 TITAN VI の開発," 日本ロボット学会誌, 445-452 (1991)

## 業績一覧

### 印刷論文

- [1] S.Hirose, H.Tsukagoshi, K.Yoneda, "TITAN VII:Quadruped Walking and Manipulating Robot on a Steep Slope," Proceedings of the 1997 IEEE ICRA, 494/500(1997)
- [2] H.Tsukagoshi, S.Hirose, K.Yoneda, "Maneuvering Operations of the Quadruped Walking Robot on the Steep Slope," Advanced Robotics published by Robotics Society of Japan(1997)(掲載決定)
- [2]' 塚越, 広瀬, "間歇クロール歩容の提案とその生成原理," 日本ロボット学会 (投稿中)
- [3] 広瀬, 塚越, 米田, "不整地における歩行機械の静的安定性評価基準," 日本ロボット学会 (投稿中)

### 口頭発表

- [1] 広瀬, 米田, 塚越, "斜面を登る4足歩行機械の安全性の評価," 第12回ロボット学会学術講演会予稿集, 1231-1232(1994)
- [2] 広瀬, 米田, 塚越, "4足歩行機械の間歇クロール歩容の提案," 第13回ロボット学会学術講演会予稿集, 225-226(1995)
- [3] 広瀬, 米田, 塚越, "斜面歩行のための4足歩行機械の開発," 第13回ロボット学会学術講演会予稿集, 1149-1150(1995)
- [4] 塚越, 広瀬, 米田, "4足歩行機械の緩斜面全方向移動," 第1回重点領域研究「知能ロボットシンポジウム」予稿集, 153-156(1996)
- [5] H.Tsukagoshi, S.Hirose, K.Yoneda: "Maneuvering Operations of the Quadruped Walking Robot on the Steep Slope," Proceedings of IROS'96, 863-869(1996)
- [6] 広瀬, 米田, 塚越, "急斜面不整地移動のための4足歩行機械のメカニズム," 第2回重点領域研究「知能ロボットシンポジウム」予稿集, 157-160(1997)
- [7] 広瀬, 米田, 塚越, 河内, "ワイヤ補助装置を用いた4足歩行機械の急斜面移動," ロボティクス・メカトロニクス講演会'97講演論文集, 23-24(1997)
- [8] 広瀬, 米田, 塚越, "傾斜面移動用4足歩行機械 TITAN VII の脚機構設計," ロボティクス・メカトロニクス講演会'97講演論文集, 281-282(1997)

- [9] H.Tsukagoshi, S.Hirose, K.Yoneda: " The Quadruped Walking Robot on A Steep Construction Site Supported by Wires, " Proceedings of ICAR'97 Workshop II, 31-37(1997)
- [10] 塚越, 広瀬, 米田, " 歩行機械の新しい安定性評価法と歩容生成に関する考察," 第15回ロボット学会学術講演会予稿集, 105-106 (1997)
- [11] 広瀬, 米田, 塚越, " 4足歩行機械の不整地環境適応歩容の研究," 第3回重点領域研究「知能ロボットシンポジウム」予稿集,(1998 1月発表予定)

#### 展示会

- [1] '97国際ロボット展, 会場:東京ビッグサイト, 期間:1997年10月28日～31日, 東急建設(株)のブースにて