

(26)

## 協調制御を必要としない歩行機械に関する研究

(機械技術研究所) 金子 真・阿部 稔・谷江和雄・館 暲

### 1. はじめに

脚を使って移動する機械を総括して、脚式移動機械という。この脚式移動機械は2足歩行機械<sup>1)</sup>、ホッピング機械<sup>2)</sup>、走行機械<sup>3)</sup>のように重心の垂直投影点が一瞬でも支持面からはずれるような動安定脚式移動機械と、4足以上の走行機械<sup>4)~6)</sup>のように、常に支持面内に重心の垂直投影点が入っているような静安定脚式移動機械に分類できるが、ここでは静安定を前提とした4足以上の多足歩行機械（以下単に歩行機械と呼ぶ）に着目することにする。

さて、不整地を対象にした歩行機械の移動動作は、複雑ではあるが、おおむね2つの動作の組合せから成っていると理解することができる。1つは、地表面の凹凸に合わせて、遊脚を位置決めする動作で、ここでは対地適応動作と呼ぶことにする。もう1つの動作は、立脚相にある脚を同期させて胴体を前に押し出す動作で、ここでは推進動作と呼ぶことにする。このうち対地適応動作は、遊脚をそれぞれ独立に駆動して、任意の地表面に足先を位置決めするもので、それほど複雑な制御を必要としない。例えば、各脚に3自由度を備えた歩行機械の場合、その制御は3自由度マニピュレータの手先の位置決めと全く同じになる。ところが、推進動作における制御は、地面と胴体の間にいくつかの閉リンクを含んだ多自由度系の協調制御問題に帰着するため、複数のマニピュレータによる対象物の運搬の場合<sup>7)</sup>と同様、一般にその制御はきわめて複雑になる。この推進動作における協調制御を少しでも軽減するため、Sutherlandらは、立脚相にある何本かの足は、胴体の動きに応じて、受動的に動けるように設計している<sup>8)</sup>。また広瀬らは3次元パンタグラフ機構を導入して、足の重力方向の運動と水平方向の運動を完全に

分離する重力方向分離駆動方式（GDA方式）により、協調制御の簡略化を計っている<sup>9)</sup>。しかしながら、このように動力系、脚系に工夫をこらしても、基本的に推進動作にアクチュエータ間の協調制御が必要であることに変わりはない。

本研究では、このような制御上の問題に対処するため、対地適応動作を実現する自由度と、推進動作を実現する自由度を完全に分離し、しかも推進動作を1自由度で実現できるような歩行機械（以後このような歩行機械を自由度無干渉歩行機械と呼ぶことにする）に着目している。はじめに、自由度無干渉歩行機械の基本概念について示し、次に歩行機械の自由度について詳細に吟味している。さらに、生物の歩行動作の考察に基づき、自由度無干渉形でかつ固定された歩行パターンを有する6足歩行機械（MELWALK）を導入し、そのシステム構成および基本動作実験について詳細に調べ、その特徴を明らかにしている。

### 2. 自由度無干渉形歩行機械の基本概念

自由度という言葉は、その状況に応じていろいろな意味を表わすが、はじめにその意味を明確にしておくことにする。

節（機構を構成する剛体）と節を連結する関節部のことを対偶（kinematic pair）という。対偶の自由度（degrees of freedom of a kinematic pair）は、節間が全く拘束されていないとき6となり、節間が剛的に拘束されていると0になる。一般に対偶の自由度 $f$ と拘束数 $u$ との間には常に（1）式が成立する。

$$f+u=6 \quad (1)$$

また対偶の自由度は、アクチュエータが対応している能動自由度（active degrees of freedom）とアクチュエータの対応していない受動自由度（passive deg-

rees of freedom) に分類できる。

次に、 $N$  個の節が、各対偶で拘束を受けながら連結されている状態を想定する。この場合、任意の 1 個の代表節に固定された座標系からみると、機構の自由度 (degrees of freedom of a mechanism) は、(2) 式で与えられる<sup>9)</sup>。ただし  $J$  はジョイント数

$$F_K = -6(J - N + 1) + \sum_{i=1}^J f_i \quad (2)$$

(2) 式のカッコ内は機構に存在する閉ループの数を表わしている。6 自由度マニピュレータのように、機構に閉ループがない場合、 $F_K = \sum f_i = 6$  となり、機構の自由度と対偶の自由度の総和、および能動自由度の総和はいずれも等しくなるが、図 1 の歩行機械のように、胴体と地面の間に 3 つの独立な閉ループ (loop 4 = loop 1 + loop 2 + loop 3) となるため、実際に独立な閉ループの数は 3 となる) が存在すると、機構の自由度  $F_K = -6 \times 3 + 6 \times 4 = 6$ 、対偶の自由度の総和  $\sum f_i = 24$ 、能動自由度の総和  $F_a = 3 \times 4 = 12$  からわかるように、着目する自由度によってとりうる値は異なる。

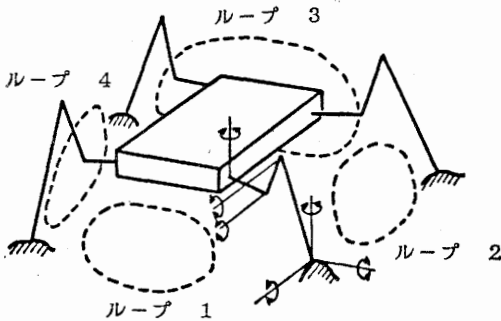


図 1 各足に 3 つの能動自由度を有する 4 足歩行機械。

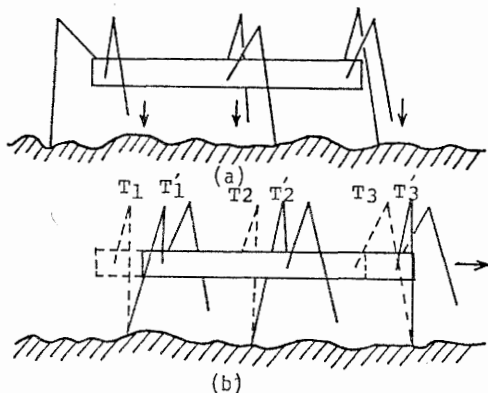


図 2 対地適応動作と推進動作。

したがって、歩行機械の場合、自由度という言葉の使い方に十分注意しなければならない。以下、必要に応じて“自由度”の前に修飾語を付けることにする。

ここで、各足に 3 つの能動自由度を有する歩行機械の歩行動作について考えてみることにする。図 2(a) は対地適応動作で、3 本の遊脚が地表面に位置決めされつつある状態である。また図 2(b) は推進動作で、立脚相にある脚を協調制御して、胴体を前方に押し出している状態である。この場合、対地適応動作と推進動作は、いずれも脚の能動自由度を使って実現される。したがって図 2(b) の推進動作中、実に  $9(=3 \times 3)$  個のアクチュエータを協調して制御しなければならない。オハイオ州立大学の 6 足歩行機械<sup>11)</sup>の歩行動作が、平面においてもぎこちないのは、主にこのような理由によるものと筆者らは推察している。ただし、3 次元パンタグラフ機構<sup>9)</sup>を脚部に使用すれば、推進動作中、実質的には  $6(=3 \times 2)$  個のアクチュエータによる協調制御となり、その制御性は改善されるものの、閉リンク系の協調制御問題から開放されるわけではない。

一方、対地適応動作と推進動作が、別々の能動自由度で実現され、しかも推進動作が、必要最小限の 1 能動自由度で実現されれば、歩行機械の制御はきわめて容易になることが推察される。そこで図 3 のような歩行機械を考えてみる。点  $T_1 \sim T_6$  の胴体に対する運動軌跡は  $f_b$  に示されているように、あらかじめ固定されているものとする。したがって、仮に点  $T_1 \sim T_6$  に同一長さの足を固定してしまうと、この歩行機械は平面であれず、1 能動自由度  $f_b$  により、交互 3 点支持歩行が実現できる。ところで、このような歩行モデル

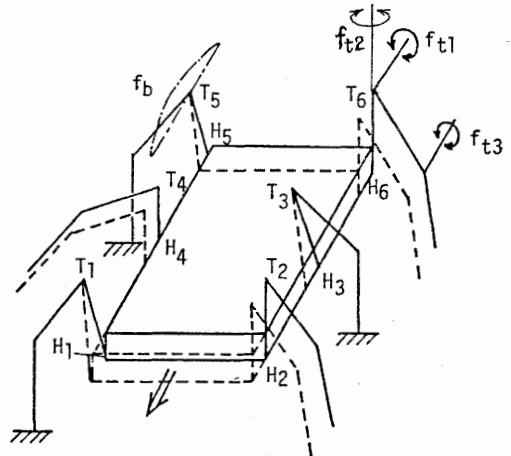


図 3 自由度無干渉形歩行機械の概念図。

の点  $T_1 \sim T_6$  に同一長さの足を固定するのではなく、図3のように、点  $T_1 \sim T_6$  を固定点として足先の位置が自由に選択できるような能動自由度  $f_{t1}, f_{t2}, f_{t3}$  を備えた足を付加することを考える。この場合、対地適応動作は、能動自由度  $f_{t1}, f_{t2}, f_{t3}$  により、図2(a)と全く同じように実現することができ、推進動作は  $f_b$  により、わずか1能動自由度で実現できる。したがって、図2のタイプの歩行機械に比べ、能動自由度の総和は推進用の  $f_b$  の分だけ多くなるが、制御系は閉リンク系の協調制御問題から開放される。つまり、対地適応動作と推進動作を実現する能動自由度は、その目的の動作に対しては、すべて独立に制御できることになる。これが自由度無干渉形歩行機械の基本的な考え方である。ただし、姿勢復帰動作を行う場合、一般には、脚の各能動自由度を独立に制御することはできないが、静安定を前提とした歩行機械の場合、基本的に姿勢がくずれることがないため、この動作の実行頻度はそれほど多くない。

### 3. 自由度考察

マニピュレータの場合、2章でも述べたように、自由度からくるイメージはきわめてはっきりしている。例えば6自由度マニピュレータであれば、その手先は可動範囲内において、任意の位置で任意の姿勢をとることができるし、6以下になるとそれらの機能は、順

次失われていく。ところで、歩行機械の場合、最低限の機能を実現するのに必要かつ十分な能動自由度はいくつになり、そこにどのようなモデルが存在するのだろうか。もちろん最低限の機能をどのように定義するかによってモデルも変わってくることはいうまでもない。自由度に関する考察は、歩行機械の研究を進めるうえでの基本ともいえるが、従来の研究において歩行機能と自由度の関係について深く検討が加えられたことは、筆者らの研究<sup>10),12)</sup>を除き知見しない。ここでは、筆者らの研究の一部を示すとともに、最小能動自由度モデルと自由度無干渉歩行機械との対応について吟味する。

はじめに、不整地歩行を前提とした歩行機械の具備すべき最低限の機能を以下のように定義する<sup>10)</sup>。

- (i) 2次元の歩行ができる。
- (ii) 胴体を水平に保持することができる。
- (iii) 足の可動範囲内では、胴体の絶対高さをできるだけ一定に保持することができる。

一般に、足数が少なくなるほど、能動自由度も少なくなるのが期待できるため、静安定歩行が実現できる最小の足数である4足を想定する。この場合、前記(i)~(iii)の機能を満足する歩行機械の必要かつ十分な能動自由度は6になり、図4のような歩行モデルが対応する(詳細については文献10)参照)。この歩行モデルは、上下方向にスライド可能な4本の足(4能動自由度)と、前脚と後脚とを連結するスライド可

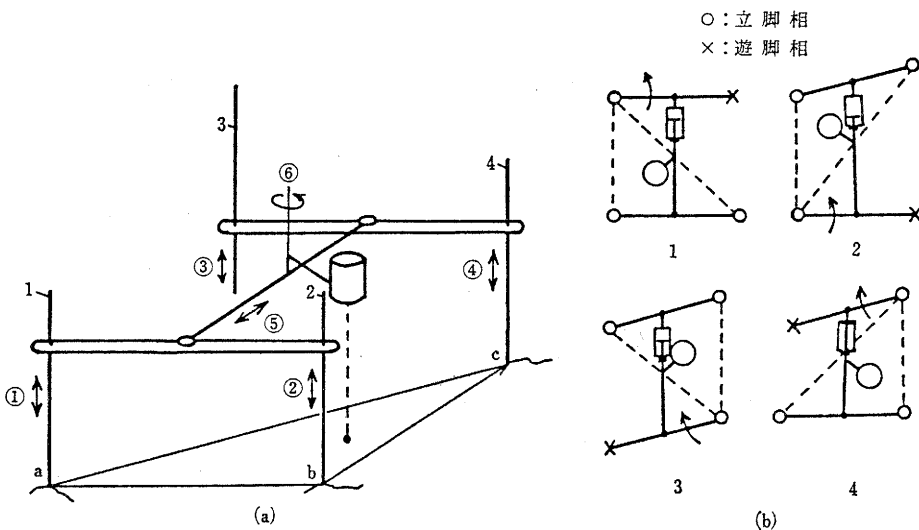


図4 最小能動自由度モデルとその歩行動作。

能な胴体（1 能動自由度）、および重心移動用の回転おもり（1 能動自由度）の計 6 つの能動自由度と、前脚と胴体、および後脚と胴体の各連結点において、回転に関する受動自由度を有する。各足に 3 つの能動自由度を備えた 4 足歩行機械の場合、4 足では 12 能動自由度になることを考慮すると、ここで示したモデルは、歩行機械としての最低限の機能は保持しつつ、能動自由度を実に半分も減らしたことになる。この歩行モデルは 4 足であるため、1 本の足しか遊脚相にすることはできない。したがって、対地適応動作というのは、実際には 1 本の遊脚相の足を地表面に位置決めすることに対応している。また、推進動作というのは、3 脚支持の状態で胴体を伸縮させることに対応している。しかも、脚の伸縮と胴体の伸縮の能動自由度は全く干渉しないので、このモデルは自由度無干渉形歩行機械の最小能動自由度モデルでもある。

#### 4. 生物の歩行考察に基づく 6 足歩行機械 (MELWALK MARK-III) の構成

人間や動物の歩行動作を考えてみた場合、本来それは随意動作とされているが、定常歩行に限ってみると、その動作パターンは固定化されており、障害物に出くわしたときだけ、一時的にそれを回避しうるパターンを発生して、それに対応する歩行に切り換わる程度で、全体的にみれば、自律動作と考えられる。したがって、基本的な足の動作パターンに、不整地に適応するための付加的な動作が加わって、脚による不整地歩行は実現されていると理解することもできる。

このような考え方を、自由度無干渉形歩行機械に応用するため、筆者らは、擬似直線機構を脚部に利用して基本となる歩容（足どり）をハードウェアで実現し、足の伸縮自由度で不整地面に適応することができるような 6 足歩行機械 (MELWALK) の開発を進めている<sup>13)</sup>。ここで 6 足を選定した理由は、(i) 基本となる歩行パターンを生成する際、昆虫の代表的歩容の 1 つである交互 3 点支持歩行が採用できるため、機構の大幅な単純化が期待できる、(ii) 静歩行の範囲では、4 足に比べ原理的に高速歩行が実現できる、などである。

##### 4.1 推進機構

ウマ、イヌ、ダチョウなどの動物の静止足先軌跡（胴体の 1 点に固定した点からみた足先の運動軌跡）

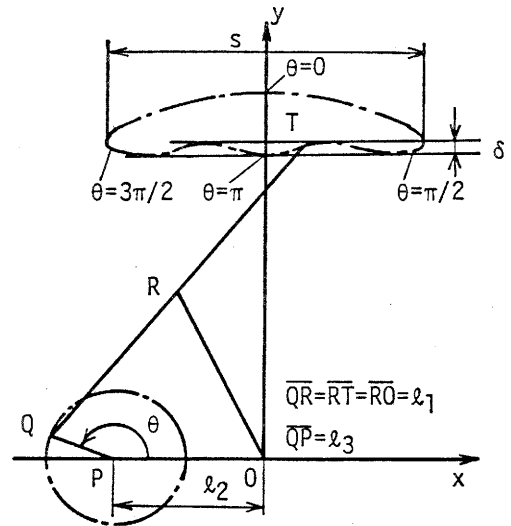


図 5 チェビシェフの 4 節リンク機構とその座標系。

は、一部に直線を含む閉軌道を描くことが知られている<sup>14)</sup>。この擬似直線部が真の直線に近いほど、歩行機械にとっては、推進動作中、胴体の上下動がなくなるため、歩行機械のエネルギー効率が向上するという意味において望ましい。つまり、擬似直線部が真の直線に近いほど、より厳密な意味において GDA 方式の脚機構が完成する。しかし、簡単なリンク機構により、厳密な直線を含んだ軌跡を得ることは、一般に困難であるため、実用的には直線のかわりに擬似直線であっても、GDA 方式の効果は十分期待できる。このような観点から、いくつかのリンク機構に対して、直線度（擬似直線区間の最大凹凸高さ  $\delta$ /ストローク  $s$  として定義する）および擬似直線区間について、計算機シミュレーションを行った。その結果、図 5 で示されるようなチェビシェフの 4 節リンク機構で、直線度 0.001、擬似直線区間の位相は  $180^\circ$  ときわめてすぐれたリンクパラメータが存在することが判明した。したがってこのリンク 3 組をペアにして、位相を  $180^\circ$  ずらして駆動することにより、基本となる歩行パターンを生成することができる。なお、胴体の推進用には 50 WDC モータが使用されている。

##### 4.2 対地適応機構

図 6 に、対地適応機構を含んだ脚機構について示す。胴体側に固定されている足の上下駆動用 30 WDC モータの動力は、プーリとタイミングベルトにより減速ギヤボックス（図では略）に伝達される。さらにギヤ

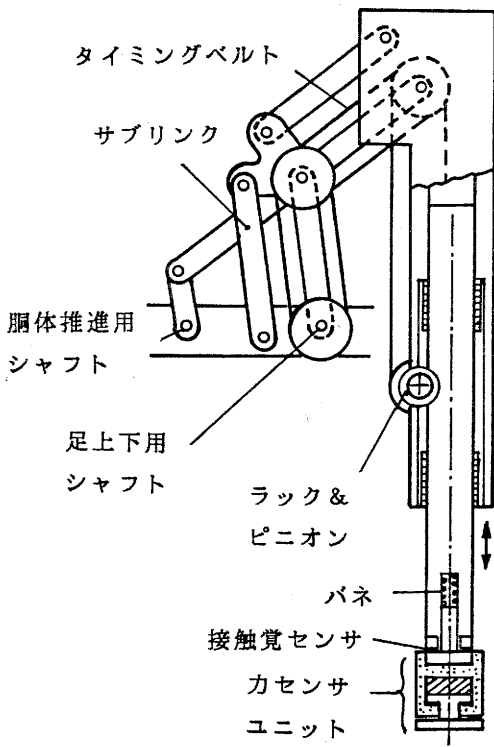


図6 脚機構。

ボックス内でウォームホイール、ピニオンを介してラックに伝達され、足の上下動を実現している。足の上下駆動用のDCモータを脚部にはなく、胴体部に取付けた理由は、脚部の軽量化を計り、エネルギー消費を少なくするためである。また、ウォーム、ウォームホイールを採用した理由は、DCモータの出力零で自重を支持するためである。つまりGDA方式の利点を生かすためである。また、図6のような動力伝達機構を採用すれば、平行四辺形機構の原理により、脚をどの位相にもっていても(図5の $\theta$ がいかなる値をとろうとも)、プーリの絶対系からみた回転量は零となるため、推進用DCモータと足の上下駆動用のDCモータとの干渉は全くなく、両者を独立に制御することができる。

### 4.3 方向変換機構

本節では、3章で定義した機能(i)を実現するため、方向変換機構について吟味する。歩行機械の場合、進行方向を変えるのに大きく2通りの方法が考えられる。1つは、脚の能動自由度を使って方向を変える方

法で、もう1つは胴体を2板の基板で構成し、両者の相対的な回転動作を利用して方向を変える方法である。2章の図2、図3で示した歩行機械は前者に相当する。この場合、方向変換を実現するためには、各脚の協調制御を必要とするため、図3の例のように、たとえ推進動作が1能動自由度で実現できても、方向変換動作まで含めた全体の制御アルゴリズムは依然として複雑になる。そこで本研究では、原理的に1能動自由度で実現できる後者の方法を採用する。この場合、解決しなければならない技術的な問題点としては、いかにして各基板間での推進用動力伝達を行うかという点であるが、この問題点は、スプラインジョイントの両端にユニバーサルジョイントを連結することにより解決している。この機構を採用したことにより、MELWALK MARK-IIIは、支持脚変換位相を除き、推進動作と方向変換動作を、同時にしかも協調制御を必要としないで実行できるようになっている。なお、方向変換用には、50WDCモータが使用され、2枚の基板は中央の垂直軸まわりに、相対的に $\pm 18^\circ$ 回転できるように構成されている。

### 4.4 トータルシステム構成

写真1にMELWALK MARK-IIIの概観を示す。この歩行機械は、対地適応動作、推進動作だけでなく、方向変換動作、姿勢復帰動作まで含めて協調制御を全く必要としない。つまりより広い意味での自由度無干

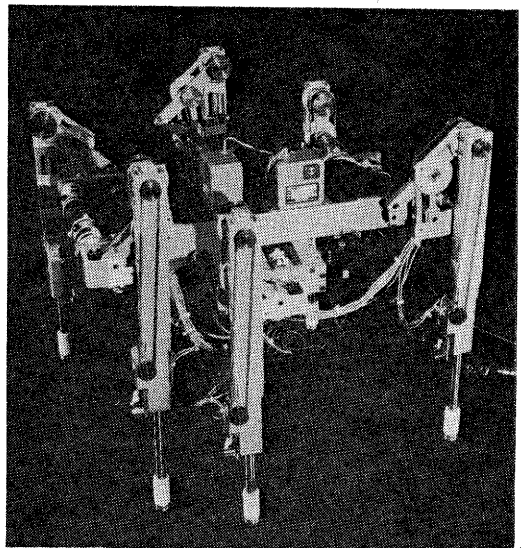


写真1 MELWALK MARK-IIIの概観。

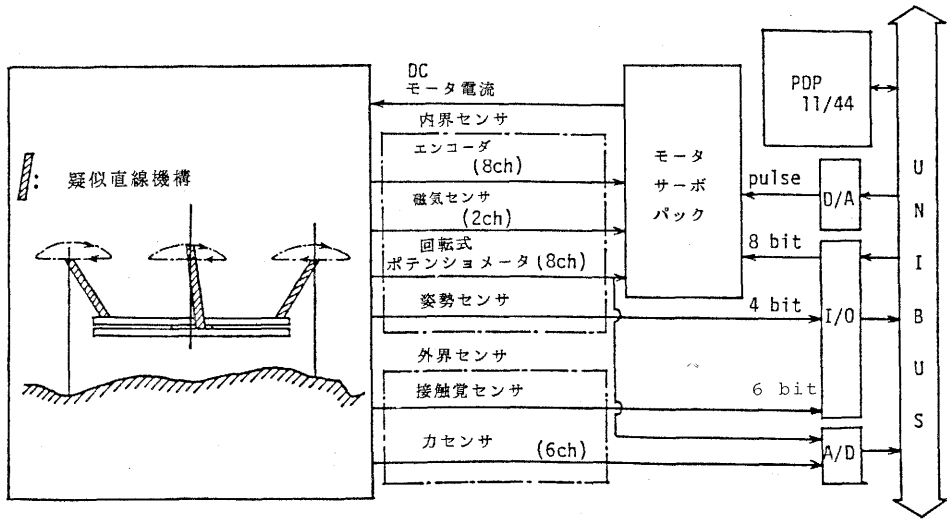


図7 全体的な制御系.

渉形歩行機械と見なすことができる。したがって、この歩行機械が各足に3つの能動自由度を有する従来の歩行機械に比べ、きわめて簡単な制御アルゴリズムにより歩行動作を実現できることは、容易に想像できる。図7は、この歩行機械の全体的な制御系を示したものである。本歩行機械は、全部で8個のDCモータを有しているが、これらは計算機(DEC社製PDP 11/44)からのパルスで駆動される。すなわち計算機からは各チャンネル同時に駆動用パルス(8ch)とモータ回転方向指令用ON, OFF信号(8×1bit)がモータサーボパック内に転送される。ここでエンコーダからのフィードバック信号の積分値とパルス指令値の積分値との差に対応した電流がDCモータに供給される仕組みになっている。したがって単位時間当りの指令パルス内で速度が決定され、パルス数の積分値で位置の指令ができるように構成されている。

## 5. 基礎実験

### 5.1 推進動作

図5において  $l_1=100$  mm,  $l_2=78$  mm,  $l_3=35$  mm とした1自由度歩行モデル(MELWALK MARK-I)を使って、写真2に示されるように、推進動作の確認実験を行っている。この実験では、歩行機械の胴体の代表点と脚の代表点(図5の点Tの位置に相当)に発光ダイオード(LED)を取り付け、それらの軌跡を記録している。写真2の胴体に取り付けられた発光ダイオードの軌跡により、胴体は水平運動に非常に近い動きをしていることがわかる。なお本歩行機械の場合、胴体の上下動は、理論上0.1mm以下になっている。また脚の代表点の軌跡は連続した山形波形となっ

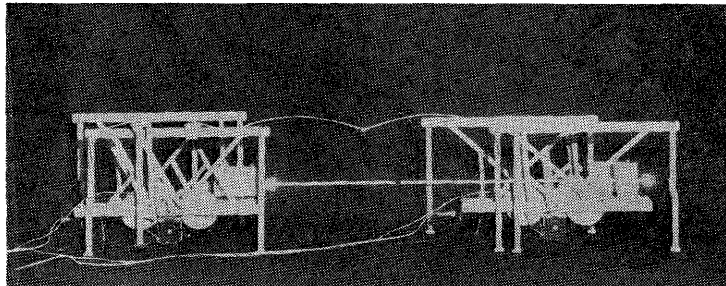


写真2 推進動作 (MARK-I).

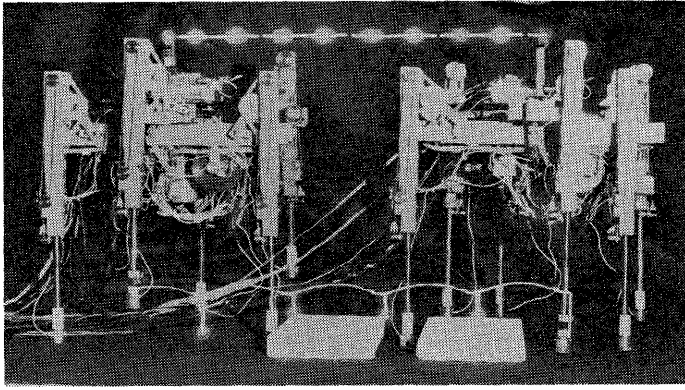


写真3 対地適応動作 (MARK-III).

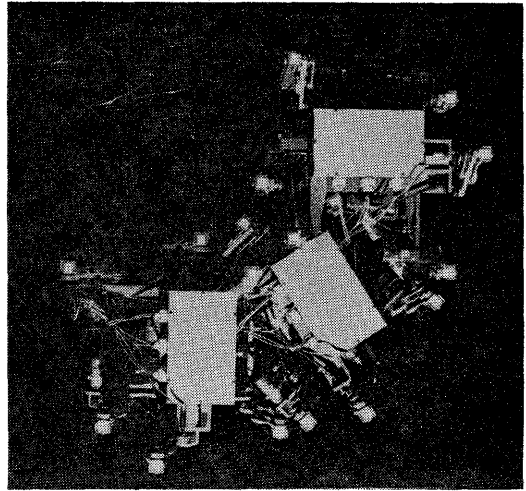
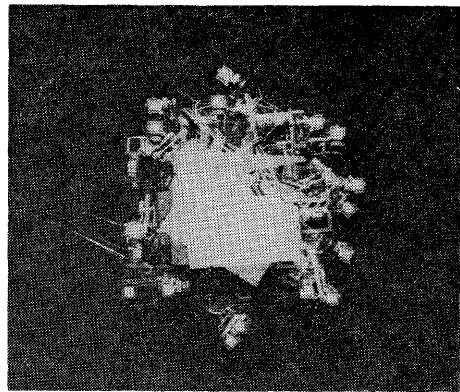
ている。図5の足先軌跡は、胴体に固定された点から足先を見たものであるのに対し、写真2の軌跡は絶対系に固定された点から足先をみたものである。なお最大歩行速度は、MARK-Iで0.3 m/s、MARK-IIIで0.1 m/sである。

## 5.2 対地適応動作

写真3は、足先の接触覚センサ（タッチセンサ）のON、OFF情報をもとに足の長さを調節することにより、対地適応動作を実現したものである。この場合、障害物検出センサを使用していないため、遊脚にするとき、各脚は常に最大限持ち上げるという制御アルゴリズムを採用している。なお、実験では1歩に要する時間は約12秒であった。このように凹凸面での歩行が極端に遅くなるのは、現在のところ、足の伸縮機構にウォーム、ウォームホイールを使用しているためである。理想的には各足の伸縮駆動機構に変速機を使って、胴体を持ち上げるときには減速比を大きくして力を出し、脚を遊脚にするときには減速比を小さくして速度をかせぐ方法が望ましい。

## 5.3 方向変換動作

写真4、写真5はそれぞれ回転半径 $r=0.8\text{m}$ で $90^\circ$ 方向を変えた場合、およびその場で足踏みしながら $90^\circ$ 方向を変えた場合の連続写真である。いずれの実験においても $90^\circ$ 方向を変えるのに約23秒要している。各足に3つの能動自由度を有する4足歩行機械の場合、 $35^\circ$ 方向を変えるのに14秒かかったという報告<sup>10)</sup>がある。これは $90^\circ$ 方向変換に換算すると約36秒となる。方向変換動作は一般には、脚間、脚-胴体間の干渉を考慮して、脚運動軌跡を生成する必要があるが、歩

写真4 方向変換動作 (回転半径  $r=0.8\text{m}$ ).写真5 方向変換動作 (回転半径  $r=0.0\text{m}$ ).

行機械が特に不得意とする動作の1つであるが、協調制御を必要としない本歩行機械の場合、その動作速度は、計算機の計算時間というよりも、アクチュエータ系の動作速度によって決まってしまう。上記の方向変

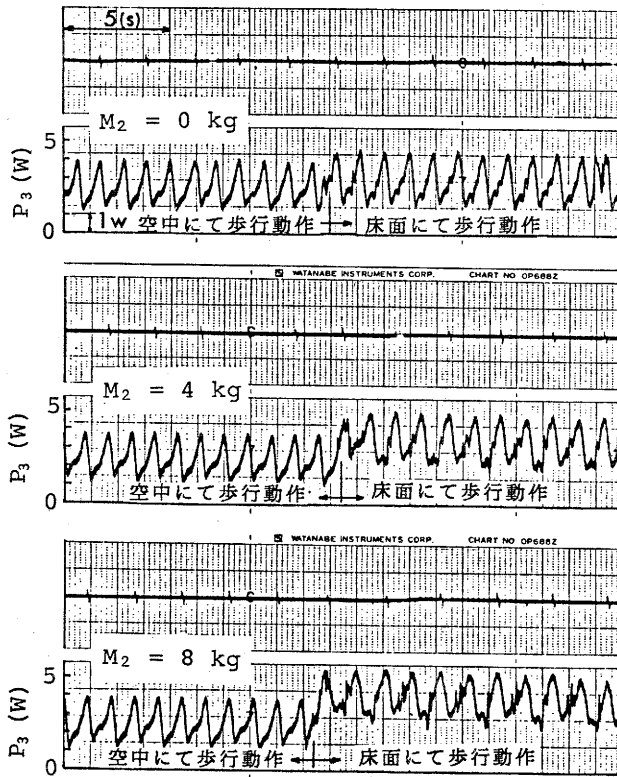


図 8 推進用 DC モータのパワー波形.

換動作の所要時間は、モータサーボバックが 50 kHz のパルスまで受け入れられるのに対し、パルス発生器が最大 10 kHz までのパルスしか生成できないというハードウェア上の制約によるものである。

#### 5.4 モータ消費パワーの測定

図 8 は、MELWALK MARK-I の推進用 DC モータ消費パワーの時間的変化を示したものである。ここに  $M_2$  は MARK-I に搭載された付加質量である。また周期的に発生しているパルスは、フォトインタラプタと遮閉板により構成された位相検出器からの出力で  $\theta=0$  に対応している。実験モデルの歩行速度は  $M_2$  にもよるが、ほぼ 0.14 m/s である。図 8 より、パワーの波形には直流成分と交流成分があることがわかる。また付加質量を増やした場合、交流成分はほとんど変化しないが直流成分は大幅に増加する。したがって、直流成分は主にピンジョイント部における摩擦損失によるものと推察する。また交流成分は、立脚、遊脚の繰返しの際に生じる速度変化およびポテンシャルエネルギーの変化に起因するものと推察する。

#### 6. エネルギー効率に関する考察

歩行機械に限らず、一般に移動機械がどれくらい効率よく移動できるかということの評価するのに移動仕事率  $\epsilon$  (specific resistance) を用いる方法がある。これは単位重量の物体を単位長さ移動させるのに必要なエネルギーとして (3) 式で定義される<sup>17)</sup>。

$$\epsilon = \frac{\bar{P}}{Mg\bar{U}_m} \quad (3)$$

ただし、 $\bar{P}$ 、 $M$ 、 $\bar{U}_m$  はそれぞれ 1 サイクルの平均消費パワー、移動体の全質量 (歩行機械本体の質量  $M_1$  + 搭載質量  $M_2$ )、および重心の平均移動速度である。したがって通常の効率の概念とは異なり、移動仕事率は小さいほど移動機械として望ましいことになる。なお、(3) 式は次元解析の手法を用いても導入することができる<sup>18)</sup>。

図 9 は (3) 式を用いて算出された MARK-I の移動仕事率を従来の歩行機械の値とともに Gabrielle-von Karman 図上にプロットしたものである。



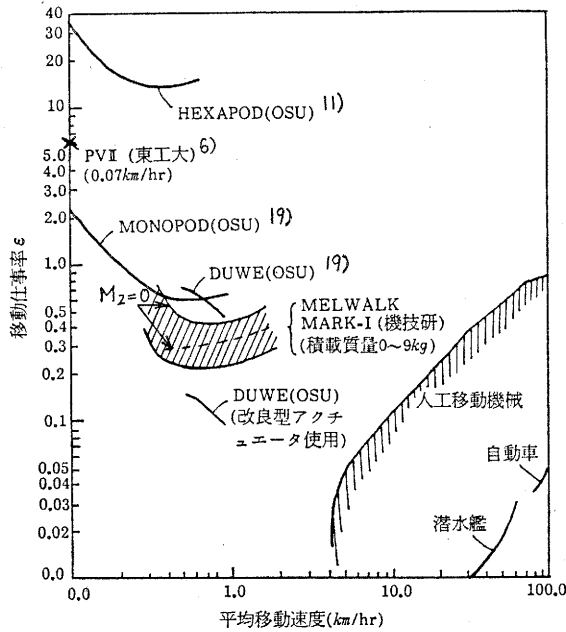


図 9 Gabrielle-von Karman 図.

MARK-I の測定データに対し、実線は DC モータに供給されるパワー  $\bar{P}_i$  を用いたものであり、破線は DC モータの効率まで考慮して、歩行機械に正味与えられるパワー  $\bar{P}_n$  を用いたものである。これより、多くの歩行機械の移動仕事率が低速で大きくなるのは、DC モータの効率が低速で著しく低下するためであり、歩行機械固有の特性ではないことが理解できる。また図 9 より、MARK-I はこれまでに開発された歩行機械の中では相対的にかなりすぐれた移動効率を示していることがわかる。

次に MELWALK タイプの歩行機械のエネルギー効率の観点からみた相似則について考察する。モータ消費エネルギー  $E$  に関与するものとして、(i) 脚、胴体の運動エネルギーの変化、(ii) ポテンシャルエネルギーの変化、および、(iii) ジョイント部の摩擦損失が考えられるが、解析の単純化を計るため、仮に (iii) の効果を無視することにする。

一方、(i)、(ii) のおおよその値は脚質量  $m_1$ 、胴体質量  $m_0$ 、代表速度  $U_0$ 、重力加速度  $g$ 、および歩行機械の代表寸法  $l$  で規定できる。したがって (4) 式の関係が成立する。

$$EK_1 m_1 K_2 m_0 K_3 U_0 K_4 g K_5 l K_6 = \text{無次元} \quad (4)$$

(4) 式より、(5) 式のように 3 つの無次元数を導入することができる。

$$\pi_1 = \frac{E}{m_1 g l}, \quad \pi_2 = \frac{U_0^2}{g l}, \quad \pi_3 = \frac{m_1}{m_0} \quad (5)$$

ここで  $\pi_1$  は実質的には、移動仕事率  $\epsilon$  に対応するものであるから、結局  $\epsilon$  は 2 つのパラメータに依存していることがわかる。一方  $U_0 \sim l\omega$  ( $\omega = \dot{\theta}$ ) と考えれば、最終的に (6) 式となる。

$$\epsilon = f(\hat{\omega}, \hat{m}) \quad (6)$$

$$\text{ただし、} \hat{\omega} = \omega \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad \hat{m} = \frac{m_1}{m_0}$$

したがって MELWALK タイプの歩行機械では  $\hat{\omega}$ 、 $\hat{m}$  を一致させておけば、理論上、同じ移動仕事率になる。

## 6. 結 論

- (1) 不整地面歩行を前提とした多足歩行機械の歩行動作は、大別して胴体の推進動作と対地適応動作に分類できる。しかも機構を工夫することにより、両動作に対して協調制御を全く必要としない歩行機械（自由度無干渉歩行機械）を構成することができる。
- (2) 自由度無干渉形歩行機械の歩容は一般に制限されるが、全能動自由度が減らせ、しかも各全能動自由度が独立に駆動できるため、その制御系はきわめて簡単になる。

- (3) 基本となる歩行パターンを有する無干渉歩行機械は、原理的に基本歩行動作を1つのアクチュエータで実現できるため、歩行速度の向上およびエネルギー効率の点では、各足に3能動自由度を有する従来形に比べ、優れている。
- (4) 基本となる歩行パターンを生成するうえで、チェビシェフの4節リンク機構の導入は、交互3点支持歩行を基本とする6歩行機械を構成するうえできわめて有効である。
- (5) MELWALKタイプの歩行機械の場合、移動仕事率は無次元角速度  $\dot{\omega}$  と質量比  $m$  により支配される。

最後に、本研究を遂行するにあたり、ロボティクス部遠隔制御課の西沢昭一郎主任研究官、および同部感覚機構課大野武房主任研究官には1号機、2号機の試作および3号機の改良に際し、多大なる協力を得ました。ここに深く謝意を表したいと思います。

#### 参考文献

- 1) H. Miura, I. Shimoyama; "Dynamic Walk of a Biped", *J. Robotics Res.*, 3-2 (1984・8), 60-74.
- 2) M. H. Raibert et al.; "Experiments in Balance with a 3D One-legged Hopping Machine", *J. Robotics Res.*, 3-2 (1984・8), 75-92.
- 3) M. H. Raibert et al.; "Dynamically Stable Legged Locomotion", *CMU-RI-TR-83-20* (1983), 49-76.
- 4) R. B. McGhee et al.; "Adaptive Locomotion of a Multi-legged Robot over Rough Terrain", *IEEE Trans. SMC*, 9-4 (1979), 176-182.
- 5) E. A. Devjanin et al.; "The Six-legged Walking Robot Capable of Terrain Adaptive", *Proc. of 4th Romansy.*, (1981), 375-384.
- 6) 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, 16-5 (1980・10), 133-139.
- 7) E. Nakano, S. Ozaki et al.; "Cooperational Control of the Anthropomorphic Manipulator MELARM", *Proc. of 4th ISIR*, (1974), 251.
- 8) I. E. Sutherland, M. K. Ullner; "Footprints in the Asphalt", *J. Robotics Res.*, 3-2 (1984・8), 29-36.
- 9) K. H. Hunt; *Kinematic Geometry of Mechanisms*, (1978), 33, Clarendon Press.
- 10) 金子, 阿部ほか; 多足歩行機械の自由度に関する基本的考察, 日本ロボット学会誌, 2-2 (1984・4), 58-66.
- 11) J. R. Buckett; "Design of an On-board Electronic Joint Control System for a Hexapod Vehicle", *M. S. thesis*, Ohio State University, Columbus, OH, (1977・3).
- 12) 金子, 館ほか; 多足歩行機械の自由度に関する基本的考察と最少能動自由度に関する研究, 機械技術研究所報, 39-2 (1985・3), 1-14.
- 13) 阿部, 金子ほか; 擬似直線機構を利用した6足歩行機械に関する基礎的研究, 計測自動制御学会論文集, 21-6 (1985・6), 86-93.
- 14) 渡部, 山崎; 歩行系の解析に関する研究, バイオメカニズム 6, (1984), 349-350, 東京大学出版会.
- 15) 阿部, 金子ほか; 擬似直線機構を用いた6足歩行機械(MELWALK)の研究(第1報, 脚機構の解析と MARK-I, II のハードウェア構成), 機械技術研究所所報(投稿中).
- 16) 広瀬, 菊地ほか; 4足歩行機械の基準巡回歩容, 日本ロボット学会誌, 2-6 (1984・12), 41-51.
- 17) G. Gabrielle, T. Karman; "What price speed", *Mechanical Engineering*, 72, No. 10 (1950).
- 18) 金子, 館ほか; エネルギー効率の観点からみた歩行機械の相似則に関する基礎的研究, 日本ロボット学会誌, 3-3 (1985・6).
- 19) T. Frank; "Dynamic Study of a Four-Bar Linkage Walking Machine Leg", *M. S. Thesis*, Ohio State University, Columbus, OH, (1982・7).

## STUDY ON WALKING MACHINES WITHOUT COOPERATIONAL CONTROL REQUIREMENT

Makoto KANEKO, Minoru ABE, Kazuo TANIE and Susumu TACHI

*Mechanical Engineering Laboratory*

Legged locomotion over irregular terrain is composed of body propelling motion and terrain

adapting motion. Although conventional walking machines with three active degrees of freedom (d.

o. f) for each leg can adapt their feet on irregular ground using flexible leg freedom, such machines generally require a tremendously complex control scheme for the body propelling motion, because cooperational control of leg freedoms in stance is required for a system with several closed kinematic chains between the body and the ground.

To cope with this problem, a walking machine with decoupled freedoms, described in this paper, is based on the idea that body propelling motion is realized by only one degree of freedom and can be perfectly decoupled from the freedoms for terrain adaptability. In this type walking machine, the control system is perfectly released from the control of closed kinematic chains. Therefore it can be expected that the control algorithm will become much easier than that of conventional walking machines having three active d.o.f. per each leg. First, the authors discuss such walking machines and make clear the quadruped walking model with minimum active d.o.f. through basic considerations of freedoms of walking machines. Next, according to observations of animal locomotion, a hexapod walking machine (MELWALK) with decoupled freedoms using an approximate straight line

mechanism is developed in order to realize faster and simpler walking machines than the quadruped one. As the foot pattern of this walking machine is limited to only one pattern, other kinds of freedoms are established to implement a body direction changing motion and a terrain adapting motion. Rotational freedom other than propulsion is added to implement the body direction changing motion, and extension and contraction freedom to the legs are also added to implement the terrain adapting motion. Although more than two active d.o.f. for each leg are desirable for terrain adaptability, the proposed walking machine has only one active d.o.f. for simplicity. Experiments are carried out to certify the body propelling motion, terrain adapting motion and body direction changing motion. It can be recognized from the trajectory of LED that the body proceeds along an approximate straight line close to an exact one. Body direction changing motion is implemented with relatively high speed. Furthermore in order to check energetic efficiency, the power consumed by DC motor is also measured using MELWALK MARK-I. Several features of the proposed hexapod walking machine are revealed through these experiments.