

〔原著論文〕

# エネルギー効率の観点からみた 歩行機械の相似性に関する基礎的研究

金子 真\* 館 暲\*  
谷 江 和 雄\* 阿 部 稔\*

本論文は、エネルギー効率の観点からみた歩行機械の相似性について論じている。

はじめに9つの物理量に対して次元解析を行うことにより、歩行機械のエネルギー効率を支配する5つの無次元数を導入している。次に、各無次元数がエネルギー効率に及ぼす影響について調べるため、 $n$ 脚歩行モデルを対象に、アクチュエータ配置に関する基本的な考察と計算機シミュレーションが行われている。このシミュレーションでは、特に脚系の慣性力に起因する床反力まで考慮されている。

シミュレーション結果と相似性についての基本的解釈は以下のようにまとめられる。(1) 同じ歩幅比であっても無次元胴体高さはエネルギー効率(移動仕事率)に大きく関与する。(2) 質量比はエネルギー効率(移動仕事率)に線形的に影響する。(3) 脚慣性力による床反力の効果は必ずしも無視できない。(4) 極端な低速歩行では、6脚歩行機械より4脚歩行機械の方が少ないエネルギーで移動できるが、高速になってくると逆に6脚歩行機械の方が少ないエネルギーで移動できる。(5) たとえ幾何学的に相似で質量比まで同じ2つの歩行機械を考えたとしても、両者のエネルギー効率は一般に等しくならず、理論的に両者が等しくなるのは限られた運転条件に限定される。

## 1. はじめに

歩行機械のエネルギー効率を評価する指標として移動仕事率<sup>1)</sup>(specific resistance)がある。これは移動体の単位重量分を単位の距離だけ動かすのに要するエネルギーを意味し、その物理的意味の明かさにより、人工移動機械だけでなく、動物生理学の分野においても使用されている無次元数である。この定義により、移動仕事率は消費エネルギーを無次元化したものであり、この値が小さければ小さいほど移動体としては好ましいことになる。したがって効率の概念とは多少異なるが、本研究においても歩行機械のエネルギー効率の評価指標として、移動仕事率を考えることにする。

移動仕事率を縦軸にとり、横軸に平均移動速度をとった座標系は、特に Gabrielle-von Karman Diagram<sup>2)</sup>として知られており、種々の人工移動機械のエネルギー効率を比較する際によく用いられている<sup>3,4)</sup>。歩行機械の移動仕事率を Gabrielle-von Karman Diagram 上にプロットする意義は、主に他の人工移動機械と比較して、歩行機械の移動仕事率がどのような点に位置づけられて

いるかということを直感的に知ることにあるが、横軸の平均移動速度が有次元であるため、相似則に関する考察はできない。

一方、歩行機械が大型化するにつれ、フルスケールモデルではなくて、幾何学的に相似性を保ったミニスケールモデルを使って移動仕事率を測定しようとする場合が考えられる。このような場合、ミニスケールモデルによって得られた移動仕事率を、そのままフルスケールモデルに対応させることができるのだろうか。もしできないとすれば、両者の間にどのような相似則が成立するのだろうか。従来の歩行機械の研究において、移動仕事率に関する実験的研究<sup>5)</sup>、数値シミュレーションに基づく考察<sup>6)</sup>は行われているものの、相似則の観点に立った研究はない。また動物生理学の分野で、無次元数を使って移動仕事率を整理した例<sup>7)</sup>はあるが、胴体高さ、デューティ比、脚/胴体質量比といった重要な無次元数が考慮されていないといった問題点を有している。

本論文では、このような問題に対応するため、はじめに膝関節のある2自由度脚を備えた歩行モデルを対象に、Buchingham の $\pi$ 定理と次元解析により、6つの独立な無次元数を導入している。さらに得られた無次元数をうまく組合せることにより、6つの無次元数は、移動仕

原稿受付 1984年12月19日

\* 機械技術研究所 ロボティクス部

事率  $\epsilon$ , 脚/胴体質量比  $m$ , 歩幅比  $s$ , 無次元胴体高さ  $h$ , 無次元速度  $\bar{u}$ , および1周期に対する立脚相の時間の割合を示すデューティ比  $\beta$  といった物理的に有意な形に変形できることを示している. またアクチュエータ配置により, 脚形態を2つのタイプに分類し, それぞれの脚について床面からの慣性反力まで考慮した歩行モデルを対象に, 数値シミュレーションを行い, 個々の無次元数が移動仕事率に及ぼす影響について考察し, 相似則という立場でいくつかの新しい知見を得ている.

2. 無次元数の導入

2.1 次元解析を行うための仮定

Fig.1 のような膝関節を有する歩行モデルを想定する. ここに  $h, l, s, m_1, m_2, \bar{u}$  はそれぞれ, 胴体高さ, 脚節長, 歩幅, 胴体質量, 1本の脚質量, 平均歩行速度である. 次に現象の本質を見失わない程度に問題を単純化して考えるため, 以下の仮定を設定する.

- (i) 関節部の摩擦損失は無視することにする.
- (ii) アクチュエータ系はエネルギー回生システムを持たないものとする.
- (iii) thigh (大腿) と shank (脛) の質量分布は一樣とする.

2.2 次元解析

Fig.1 のような歩行モデルに対して, アクチュエータの消費エネルギー  $E$ , 脚節長  $l$ , 歩幅  $s$ , 胴体高さ  $h$ , 胴体質量  $m_1$ , 脚質量  $m_2$ , 平均歩行速度  $\bar{u}$ , 重力加速度  $g$ , 歩行周期  $T_0$  の間に式 (1) のような関数関係が成立するものとする.

$$f(E, m_1, m_2, l, s, h, \bar{u}, g, T_0) = 0 \quad (1)$$

これらの物理量は  $h$  を除き文献 (6) のシミュレーションにおいて使用されたものと一致する. なお  $h$  については昆虫型 (insect type) 脚, 哺乳類型 (mammal type) 脚の程度を決めるためのパラメータであり, 消費エネルギー  $E$  に大きく関与する物理と考えられるため, ここではこれを含めて次元解析を行う. ところで, これらの物

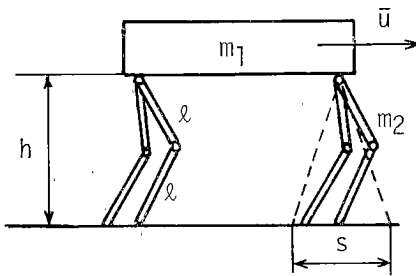


Fig.1 A legged walking model (Any number of leg is possible.)

理量以外にも歩行機械の胴体形状に関する物理量も当然消費エネルギー  $E$  に関与するが, ここではそれらの効果は上記の物理量に対し2次的と考え, 無視している. 式 (1) において  $m_1$  と  $m_2$  または  $l$  と  $s$  と  $h$  はいずれも同じ次元を有するが, 物理現象に及ぼす効果が異なると考えられるので, それぞれ1つに代表させることはできない. このような考え方は, 方向性次元解析の概念に基づいている. ところで Buckingham の  $\pi$  定理<sup>5)</sup>によると, 式 (1) は式 (2) と等価になる.

$$\phi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n) = 0 \quad (2)$$

また関数  $f$  を支配する物理量はいずれも, 質量  $[M]$ , 長さ  $[L]$ , 時間  $[T]$  の各単位の組合せで表わされるので,  $\pi_i$  は4個以下の物理量の組合せからなる無次元数となる. ところで  $[M], [L], [T]$  の各単位を行にとり, 式 (1) で選んだ物理量を列にとった次元マトリックス  $M$  から得られる3次の行列式の中には0でないものが存在するから,  $M$  のランクは3となる. したがって  $\pi$  ナンバーの数は物理量の数から単位数を引いた6となり, 6つの独立な無次元数が存在することになる. そこで,

$$E^{K_1} m_1^{K_2} m_2^{K_3} l^{K_4} s^{K_5} h^{K_6} \bar{u}^{K_7} g^{K_8} T_0^{K_9} = \text{non-dimension} \quad (3)$$

となり得ることを考慮して次元解析を行うと, 以下のようになり6つの無次元数を得ることができる.

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{E}{m_1 g l}, \quad \pi_2 = \frac{m_2}{m_1} \\ \pi_3 &= \frac{s}{l}, \quad \pi_4 = \frac{h}{l} \\ \pi_5 &= \frac{\bar{u}}{\sqrt{g l}}, \quad \pi_6 = T_0 \sqrt{\frac{g}{l}} \end{aligned}$$

2.3 修正無次元数とその物理的解釈

前節で求めた6つの無次元数は, そのままの形ではその物理的な意味が明確ではない. 一般に次元解析により得られる6つの独立な無次元数は, 考えられ得る唯一の形ではなくて, その一例にすぎない. 例えば,  $\pi_3$  の脚節長  $l$  のかわりに胴体高さ  $h$  をとることも考えられる. これは  $\pi_3$  のかわりに  $\pi_3/\pi_4$  を1つの独立な無次元数とみなしたことと等価である. このような置換が可能なる理由は, 独立な6個の無次元数にどのような係数をかけたり割ったりしようとも, その独立性は維持されるという考え方に基づいている. 本節では, 得られた無次元数に適切な係数をかけたり, 無次元数同士を組合せることにより, 物理的に有意な形に変形し, 合わせてその物理的意味についての解釈を行っている.

Fig.2 の修正無次元数はこのような考え方に基いて得られたものである. ただし  $n$  は脚数である. ここで移動仕事率を  $\epsilon$  とすると, 移動仕事率  $\epsilon$  は例えば  $\epsilon = E/(m_1 g B)$  と表わされる<sup>6)</sup>. ただし  $B$  は1周期中の胴体重

心移動量  $s/\beta$  であるから、 $\pi_1/(\pi_5 \cdot \pi_6)$  はこの  $\epsilon$  の定義と完全に一致する無次元数となる。また  $\pi_2$  は1本の脚質量を胴体質量で無次元化した質量比であるが、一般的に考えて  $\pi_2$  のかわりに全脚質量を胴体質量で無次元化した  $\hat{m}$  を採用する方が都合がよい。その理由は、脚系による消費エネルギーを評価するとき、 $\hat{m}$  をパラメータにとれば近似的に脚数に依存しなくなるからである。

一方、 $\pi_3, \pi_4, \pi_5$  では歩行機械の代表長さとして脚節長  $l$  がとられているが、それらに対応する修正無次元数、すなわち歩幅比  $\hat{s}$ 、無次元高さ  $\hat{h}$ 、無次元速度  $\hat{u}$  では、代表長さとして脚長  $2l$  を用いている。その理由は、脚節長  $l$  よりも脚長  $2l$  の方が歩行機械の代表長さとしてより直感的なイメージを与えるからである。なお無次元速度  $\hat{u}$  はフルード数<sup>9)</sup> (Froude number) と呼ばれる無次元数と本質的に一致し、その物理的な意味は重力に対する慣性力の割合を示すものである。このフルード数を歩行機械に対応させて考えると、重力  $m_1 g$  に対する立脚相の足先まわりの胴体の回転運動（胴体が足先を中心とし半径  $2l$  の円運動をすると考える）により、腰部に発生する遠心力  $m_1 \hat{u}^2 / (2l)$  の割合を意味している。したがってフルード数（または無次元速度  $\hat{u}$ ）が1に近づいてくると、少なくとも1脚は常に立脚相にあるという歩行動作が維持できなくなり、歩行から走行へと歩容形態が変化する。

このようにフルード数の変化に伴う歩容の変化は、R. M. Alexander によりすでに指摘されている<sup>7)</sup>。本研究で対象としているような静安定を前提とした歩行機械では、 $\hat{u}$  は1に比べて十分小さいという前提に立っている。最後に  $\pi_6$  のかわりに  $\pi_3/(\pi_5 \cdot \pi_6)$  を新たな無次元数とすることにより、歩行機械の歩容を支配する重要なパラ

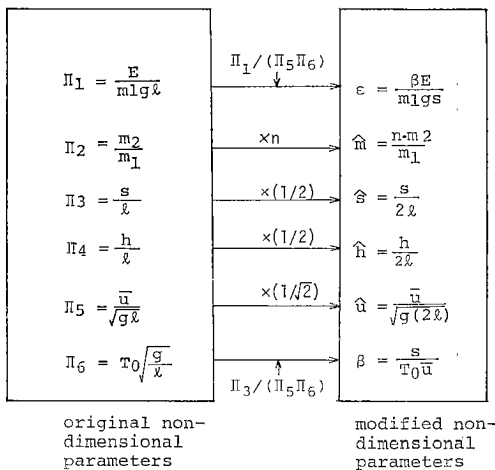


Fig. 2 Modified non-dimensional parameters

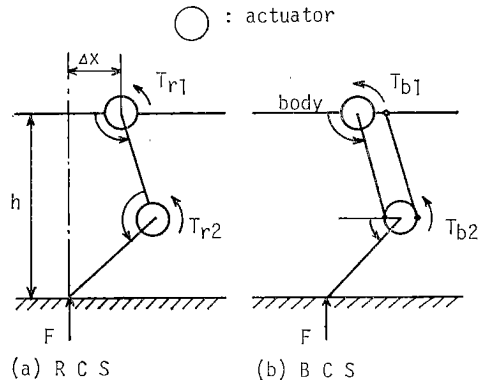


Fig. 3 Two types of actuator arrangement

メータであるデューティ比  $\beta$  (1周期に対して足が立脚相にある時間の割合) を導くことができる。デューティ比は遊脚の運動エネルギー、1サイクル中の胴体重心移動量の観点から移動仕事率に影響を及ぼすパラメータである。

したがって移動仕事率  $\epsilon$  は、5つの修正無次元数の関数として、式(4)のように表わすことができる。

$$\epsilon = \epsilon(\hat{m}, \hat{s}, \hat{h}, \hat{u}, \beta) \quad (4)$$

### 3. シミュレーション

本節では、個々の無次元数が移動仕事率にどのように影響を及ぼすかといった点について、2自由度脚を備えた  $n$  脚歩行モデルを対象にシミュレーションを行う。

移動仕事率のシミュレーションに関する研究としては、広瀬ら文献(6)による先駆的な研究があるが、本研究のシミュレーションでは以下の点を特に考慮している。

(i) 相似則の観点からして結果はすべて無次元表示する。

(ii) アクチュエータ配置の相違による移動仕事率への影響を考察する。

(iii) 歩行機械全体を自由体とみなした場合の力のつり合い、モーメントの近似的なつり合いを満足させるため、床面からの慣性反力による効果を考慮する。

(iv) 無次元高さ  $\hat{h}$  の影響について吟味する。

#### 3.1 アクチュエータ配置についての検討

歩行機械のアクチュエータ配置には Fig. 3 に示されるように大きく2つのタイプが考えられる。1つは Fig. 3 (a) のように thigh を動かすためのアクチュエータ出力軸が回転することにより shank 駆動用アクチュエータの固定方向も同じ量だけ回転するタイプで、ここでは相対系 (Relative Coordinate System: 略して RCS) 配置と呼ぶことにする。もう1つは、Fig. 3 (b) のように thigh 駆動用のアクチュエータ出力軸がどんなに回

転しても shank 駆動用のアクチュエータの固定方向は常に同じ方向を示すタイプで、ここでは胴体系 (Body Coordinate System: 略して BCS) 配置と呼ぶことにする。

動物をはじめとする生物の筋肉・骨格系、および多くの歩行機械の脚は RCS 型のアクチュエータ配置となっている。BCS 型のアクチュエータ配置は Fig. 3(b) の例からもわかるように、人工脚に限定される。なお、従来の研究において BCS 型のアクチュエータ配置に対して、その移動仕事率が吟味されたことはある<sup>9)</sup>が、RCS 型のアクチュエータ配置については未だ検討されていない。例えば脚質量を零とし、Fig. 3 のように、床反力として自重支持力  $F$  が作用する場合を想定してみる。RCS 配置の場合、腰関節に作用する回転モーメントの大きさは支持力  $F$  と  $\Delta x$  ( $\Delta x$  は支持点から腰関節までの水平方向距離) との積で表わされるが、BCS 配置の場合、腰関節に作用する回転モーメントの大きさはみかけ上、膝関節部に垂直力  $F$  が作用したかのようなモーメントとなる。したがって、アクチュエータ配置の相違は移動仕事率に決定的な影響を与えることが予想される。

### 3.2 解析上の仮定

Fig. 4 のような  $n$  脚歩行モデルとその座標系を考える。また解析上の単純化を図るため、以下の仮定を設定する。

(i) アクチュエータ特性は文献(6)に従い、式(5)で与えられるものとする。

$$P = \delta \langle P' \rangle = \begin{cases} P' & P' > 0 \\ 0 & P' \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

ただし、 $P'$  は各関節に発生するパワーで、 $P$  は各関節のアクチュエータによるパワー消費量である。

- (ii) 胴体は等速水平運動を行う。
- (iii) 遊脚相の足先は地面すれすれに復帰する。
- (iv) 脚数は偶数

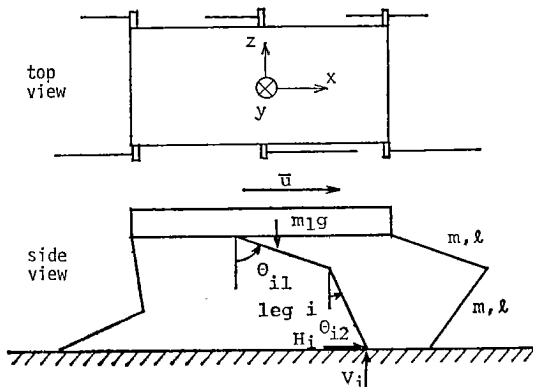


Fig. 4 A legged walking model and its coordinate system

- (v) 脚は胴体近傍を往復運動するものとする。
- (vi) 胴体は胴体高さに比べて十分長いものとする。
- (vii) 胴体の同一側面の立脚相の足にはすべて同じ大きさの床反力が作用する。

仮定 (i) は、アクチュエータが positive work 時にパワーを消費し、isometric, negative work 時にはパワーを消費しないということと等価である<sup>9)</sup>。また仮定 (ii), (iii) は胴体のポテンシャルエネルギーの変化、および脚系の重心上下動によるポテンシャルエネルギーに起因するアクチュエータの消費エネルギーを零または極力小さくした状態で、シミュレーションを行うということに対応し、いずれも解析の単純化を図るために設定した仮定である。一方、立脚相の脚数が4本以上になると、一般に床反力は一意に決まらなくなり、不静定問題になる (ただし水平反力については立脚相の足が3本から不静定になる)。仮定 (v), (vi), (vii) はこのような問題に対応するため、胴体の幾何学的形状パラメータを使うことなく、しかも歩行体全体として力のつり合い式および近似的なモーメントのつり合い式を満足させるための仮定で、詳細については3.4節で述べることにする。

### 3.3 関節モーメントの誘導

Fig. 4 のような歩行モデルに対して第  $i$  脚についての関節モーメントを誘導すると、床反力ベクトルを  $R_i$  として式 (6) のように定式化することができる。

$$A_i \ddot{\theta}_i + B_i \dot{\theta}_i^2 + C_i \sin \theta_i + D_i R_i = M_i \quad (6)$$

ただし、

$$\ddot{\theta}_i = [\ddot{\theta}_{i1}, \ddot{\theta}_{i2}]^t, \quad \dot{\theta}_i^2 = [\dot{\theta}_{i1}^2, \dot{\theta}_{i2}^2]^t$$

$$\sin \theta_i = [\sin \theta_{i1}, \sin \theta_{i2}]^t$$

$$R_i = \begin{cases} [H_i, V_i]^t & (\text{立脚相}) \\ [0, 0]^t & (\text{遊脚相}) \end{cases}$$

$$M_i = [M_{i1}, M_{i2}]^t$$

なお係数行列  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$ ,  $D_i$  はアクチュエータ配置に依存する。詳細については付録1参照。式 (6) において、胴体の等速水平運動を実現するような足先運動軌跡を仮定すると、各関節における角度  $\theta_i$ 、角速度  $\dot{\theta}_i$ 、角加速度  $\ddot{\theta}_i$  は一義的に定まる。また各係数行列は  $\theta_{ij}$  ( $i=1 \sim n, j=1, 2$ ) の関数となるため、床反力ベクトル  $R_i$  を除き、すべて既知量となる。

### 3.4 床反力の誘導

Fig. 5(a) のように第  $i$  脚に胴体より作用する力、慣性力をそれぞれ  $Fb_i = [Xb_i, Yb_i]^t$ ,  $X_i = [X_i, Y_i]^t$  とし、重力を  $G_i = [0, -2mg]^t$  とすると式 (7) が成立する。

$$Fb_i + X_i + G_i + R_i = 0 \quad (7)$$

次に、式 (7) に対し1番目の脚から  $n$  番目の脚までの和をとり、しかもそれらを  $x, y$  方向の各成分について書き表わすと式 (8), (9) となる。ただし力、モー

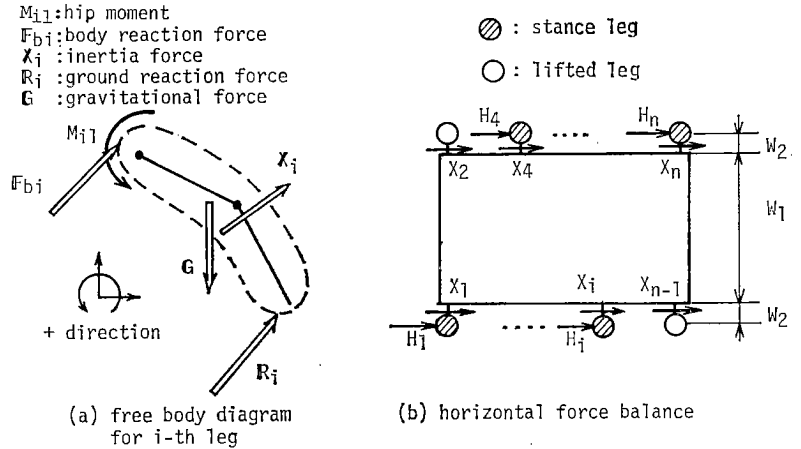


Fig. 5 Free body diagram of the model

メントの正の方向は Fig. 5 に示す。

$$\sum_{i=1}^n (Xb_i + X_i + H_i) = 0 \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n (Yb_i + Y_i + V_i - 2mg) = 0 \quad (9)$$

仮定 (ii) より、胴体は等速水平運動を行うので、式 (9) が成立する。

$$\sum_{i=1}^n Xb_i = 0, \quad \sum_{i=1}^n Yb_i = -m_1g \quad (10)$$

したがって式 (8), (9) は式 (11), (12) のように変形することができる。

$$\sum_{i=1}^n (X_i + H_i) = 0 \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n (Y_i + V_i) = (m_1 + 2mn)g \quad (12)$$

ただし  $X_i, Y_i$  は慣性力であるから足先の運動が規定されれば既知量となる。次に胴体の重心を原点とした各軸まわりのモーメントのつり合い式をたてると式 (13), (14), (15) となる。

$$\sum_{i=1}^n (H_i + X_i)z_i = 0 \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n (V_i + Y_i)x_i = 0 \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^n \{H_i h_i + X_i h_i + (V_i + Y_i)x_i\} = 0 \quad (15)$$

ただし、式 (15) は第一近似的な意味において成立する。また  $h_i$  は慣性力作用点の  $y$  座標である。式 (11)~(15) は非常にゆっくりした歩行では、 $H_i = 0, \sum V_i = (m_1 + 2mn)g, \sum V_i z_i = 0, \sum V_i x_i = 0$  となり、C. A. Klein 等が 6 足歩行機械の力制御において使用している式<sup>9)</sup> と厳密に一致する。ところで、静的安定を維持する最低の支持脚数に対応する 3 脚支持においても式 (11)~(15) は、6 つの未知数に大して 5 つの方程式しかないので一

般に各反力は一意に決まらず、不静定問題となる。このような不静定問題に対する一解法として解のノルムを最小にするという考え方に基づく擬似逆行列解法<sup>10)</sup> pseudoinverse method がある。ただし  $z_i$  は対称性および仮定 (v) により  $z_{2i} = W_1/2, z_{2i-1} = -W_1/2$  となるため、式 (13), (14) は実質的に  $W_1$  の大きさに依存しなくなるが、式 (15) に  $x$  方向の座標値  $x_i$  があるため、この方法を実際に使用するためには、歩行モデル胴体の幾何学的形状についての具体的な数値まで与えなければならない。そこで、はじめに式 (11), (13) に対して擬似逆行列解法を適用してみると、水平反力ベクトル  $\mathbf{H}$  として、式 (16) で水平反力が得られる。

$$\mathbf{H} = \mathbf{A}^t (\mathbf{A} \mathbf{A}^t)^{-1} \mathbf{b} \quad (16)$$

ただし、 $\mathbf{A}$  は式 (11), (13) から構成される係数行列であり、 $\mathbf{b} = (-\sum X_i, -\sum X_{2i} + \sum X_{2i-1})^t$  である。式 (11), (13) の形より式 (16) を実際に計算してみると、同一側面の立脚相の足には同じ大きさの水平反力が作用するという結果が得られる。式 (12), (14) について擬似逆行列解法を適用しても同じ結果となる。ところで式 (15) で最も大きな値となるのは、一般に胴体質量が関与する  $V_i$  であるが、胴体が十分長く (仮定 (vi)), しかも立脚相の足が胴体の前後にはほぼ均等に分布していれば、一般に同一側面の立脚相の足には同程度の大きさの垂直反力が作用することが予想される。つまり得られた擬似逆行列解は、たとえ式 (15) まで考慮して解を求めたとしても、両者の解の間にそれほど大きな差は生じないことが推察できる。したがって本研究のネライと問題の単純化とを考え合わせ、ここでは仮定 (vii) を設定している。

以上の考え方に基づいて、水平反力を定式化すると式 (17) となる。

$$\begin{cases} H_{2i} = -\sum_{t=1}^{n/2} X_{2t}/n_1 \\ H_{2i-1} = -\sum_{t=1}^{n/2} X_{2t-1}/n_2 \end{cases} \quad (17)$$

ただし  $n_1, n_2$  はそれぞれ偶数脚列側および奇数脚列側における立脚相の足数である。同様な考え方により、垂直反力は式 (18) となる。

$$\begin{cases} V_{2i} = \left\{ (m_1 + 2mn)g/2 - \sum_{t=1}^{n/2} Y_{2t} \right\} n_1 \\ V_{2i-1} = \left\{ (m_1 + 2mn)g/2 - \sum_{t=1}^{n/2} Y_{2t-1} \right\} n_2 \end{cases} \quad (18)$$

3.5 移動仕事率の誘導

本節では、3.4 節までで得られた関節モーメント  $M_{ij}$  を用いて、アクチュエータの消費パワーを算出し、移動仕事率を計算する式について誘導する。

はじめに RCS 型のアクチュエータ配置を想定する。第  $i$  脚の第  $j$  関節のアクチュエータの回転角速度を  $\dot{\alpha}_{ij}$  とすると、 $\dot{\alpha}_i = [\dot{\alpha}_{i1}, \dot{\alpha}_{i2}]^t$  は Fig.4 の  $\theta_i = [\theta_{i1}, \theta_{i2}]^t$  を使って式 (19) のように表わすことができる。

$$\dot{\alpha}_i = K\dot{\theta}_i \quad (19)$$

ただし、 $K$  については付録 2 参照。

したがって第  $i$  脚の第  $j$  関節のアクチュエータにより消費されるパワーおよび 1 サイクル中に全脚により消費されるエネルギー  $E$  はそれぞれ式 (20), (21) となる。

$$P_{ij} = \delta \langle M_{ij}, \dot{\alpha}_{ij} \rangle \quad (20)$$

$$E = \int_0^{T_0} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 P_{ij} dt \quad (21)$$

よって移動仕事率は文献(6)の定義に従うと、式(22)となる。

$$\epsilon = \frac{BE}{m_1 g s} \quad (22)$$

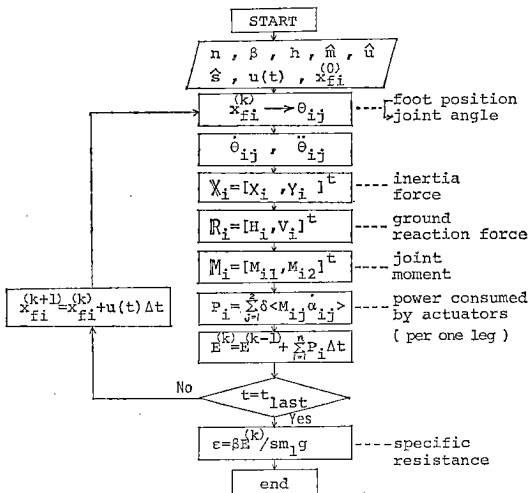


Fig. 6 Flow chart for simulation program

なお RCS 配置の関節モーメント  $M_{ij}$  のかわりに BCS の関節モーメント  $M_{ij}'$  を用い、 $K$  のかわりに  $K'$  (付録 2 参照) を用いれば BCS 配置に対応した移動仕事率を得ることができる。

3.6 数値計算

3.5 節までの計算手順は Fig.6 のようなフローチャートにまとめることができる。ただし、ここでは Fig.7 のような 3 種類の足先タイムチャートに対して数値計算を行っている。なお Fig.7 は胴体からみた足先の相対速度である。Fig.7 (a) は足先の速度変化が  $t = (1-\beta)T_0$  で不連続になる場合で、脚質量零 ( $\hat{m} = 0$ ) の場合を除き使用することはできない。なぜなら  $\hat{m} \neq 0$  の場合、 $t = (1-\beta)T_0$  で無限大の関節モーメントが発生するからである。Fig.7 (b) は  $\hat{m} \neq 0$  であっても物理的に矛盾のない最も単純なタイムチャートである。この場合、関節モーメントは不連続にはなるが無限大にはならない。さらに Fig.7 (c) は関節モーメントまで連続になるように考慮したものである。ここでは Fig.7(b), (c) のタイムチャートを特にタイプ (1), タイプ (2) と呼び  $\hat{m} \neq 0$  の場合の計算に使用することにする。なおタイプ (2) のタイムチャートは式 (23) で与えられる。

- (i)  $0 \leq t \leq (1-\beta)T_0$   

$$u = \frac{15}{8} \bar{u} \left\{ \frac{1}{1-\beta} \left( \frac{t}{T_1} - 1 \right)^4 - \frac{2}{1-\beta} \left( \frac{t}{T_1} - 1 \right)^2 + \frac{1}{1-\beta} - \frac{8}{15} \right\} \quad (23)$$
- (ii)  $(1-\beta)T_0 \leq t \leq T_0$   

$$u = -\bar{u}$$

ただし、 $T_1 = (1-\beta)T_0/2$

次に歩行モデルの歩幅  $s$  のとり方について定義する。

$\hat{h} < 0.5$  の場合、歩幅  $s$  は Fig.8(a) のように定義している。したがって足先の可動範囲は腰関節部を原点とした無次元座標系を用いて  $[\sqrt{\hat{h}-\hat{h}^2}, \sqrt{\hat{h}-\hat{h}^2} + \hat{s}]$  となり、 $\hat{s}_{max} = \sqrt{1-\hat{h}^2} - \sqrt{\hat{h}-\hat{h}^2}$  となる。また  $\hat{h} > 0.5$

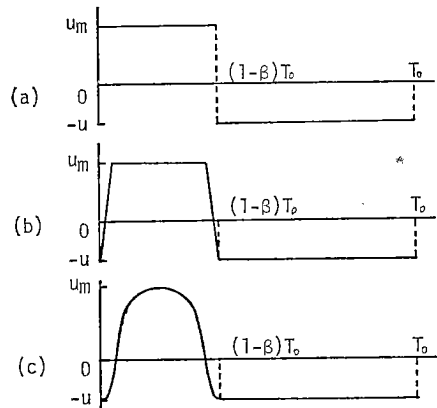


Fig. 7 Time chart for simulation

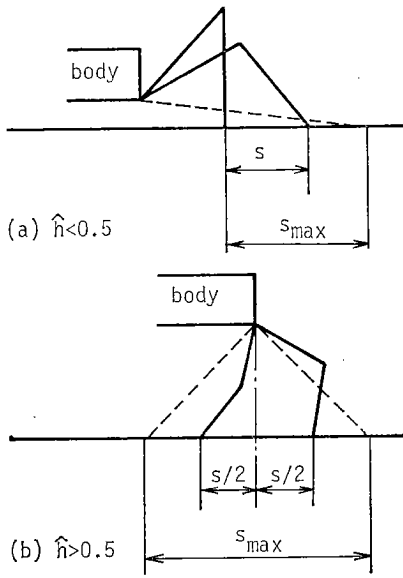
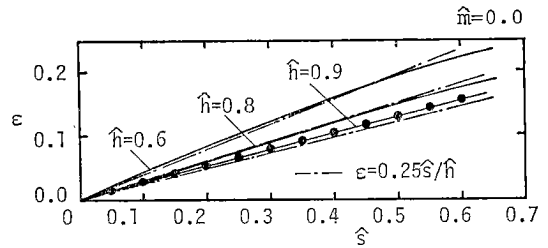


Fig. 8 Definition of movable limit for each leg

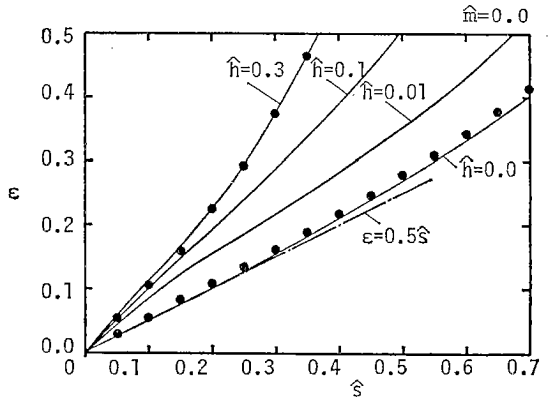
の場合は、Fig. 8(b)のように足先が腰関節を中心に往復運動するように定義している。したがって足先の可動範囲は  $[-s/2, s/2]$  となり、 $s_{max} = 2\sqrt{1-h^2}$  となる。

Fig. 9 にプログラムのチェックの意味を含めて脚質量零 ( $m=0$ ) の場合について計算した結果を示す。(a), (b) は RCS 型のアクチュエータ配置を対象にしたもので、(c) は BCS 型のアクチュエータ配置を対象にしたものである。Fig. 9 において実線は、被積分関数まで解析的に求めた解析解(積分を数値的に実行してもこのような解まで含めて一般に解析解と呼ばれている)であり、一点鎖線は歩幅が小さいと仮定して行った線形解析解である。これらについては付録 3 参照。また黒丸は Fig. 6 のフローチャートに基づいて計算された数値解である。ただし、この場合解析解と対応させるため、床反力はすべての立脚相の足に均等に分配されるという条件で計算している。いずれの結果を比較しても、全体的によく一致していることがわかる。

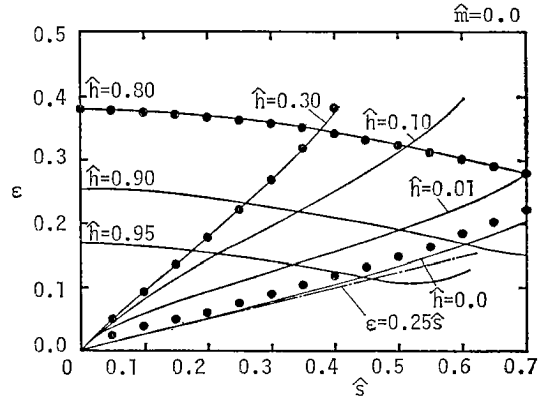
次に  $m=0$  の計算結果について吟味してみる。 $h-hat < 0.5$  の場合、移動仕事率  $\epsilon$  は歩幅比  $s$  にほぼ比例する。また移動仕事率は BCS よりも RCS の方が全体的に大きな値となり、 $h-hat \rightarrow 0$  でほぼ 2 倍となる。 $m=0$  の場合、腰関節および膝関節でなされる仕事は、符号が反対で大きさが等しくなることを考慮すると、 $h-hat \rightarrow 0$  でほぼ 2 倍異なる理由は、同一の膝関節モーメントに対し膝関節角度変化量が 2 倍異なるということに対応している。 $h-hat > 0.5$  の場合、RCS, BCS とともに  $h-hat \rightarrow 1$  に近づくほど移動仕事率は小さくなる。また RCS では  $\epsilon$  は  $s$  にほぼ比例して



(a) RCS



(b) RCS

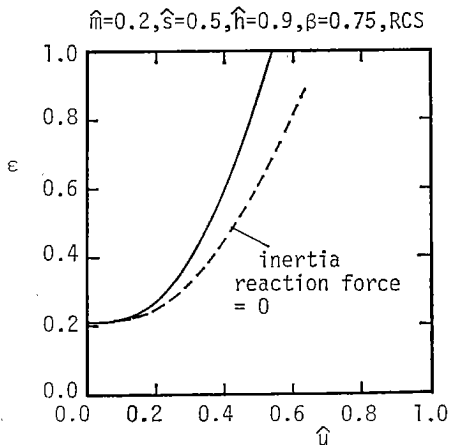


(c) BCS

Fig. 9 Specific resistance

いるのに対し、BCS では近似的に  $\epsilon = a - bs$  ( $a > 0, b > 0$ ) となる。この点についての物理的解釈については付録 4 において詳述している。なお BCS で  $h-hat \rightarrow 0$  としたモデルは文献 (6) の insect type に対応し、結果も両者で一致する。また脚質量が零で胴体の等速水平運動を仮定しているにもかかわらず、消費エネルギーが零とならないのは、アクチュエータのモデル化に起因するものである。この点についての詳細な説明は文献 (6) で行われているので、ここでは重複を避けることにする。

次に  $m \neq 0$  の場合について吟味する。無次元高さ  $h-hat$  が移動仕事率に及ぼす影響は  $m=0$  についておよそ把握

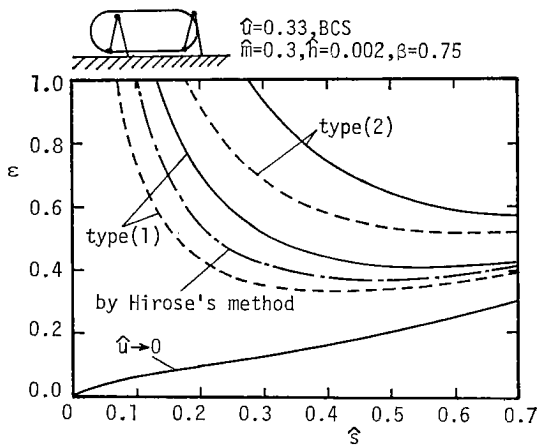


**Fig. 10** Specific resistance  
(non-dimensional type of Gabrielle-von Karman Diagram)

できるので、以下の計算では無次元高さ  $\hat{h}$  は insect type および mammal type の代表値として  $\hat{h}=0.002$  および  $\hat{h}=0.9$  に固定する。

**Fig.10** は慣性反力が移動仕事率に及ぼす影響について、type (1) のタイムチャートを用いて調べたものである。ただし、実線は慣性反力による影響を考慮したもので、破線はそれを無視したものである。これより慣性反力が移動仕事率に及ぼす影響は意外に大きいことがわかる。また Fig. 10 は Gabrielle-Von Karman Diagram の無次元形と理解することもできる。

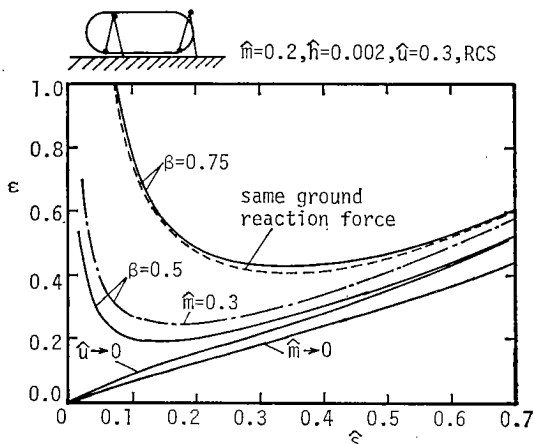
**Fig.11** は既存の計算結果と比較するため、文献 (6) のデータと一致させて計算したものである。ただし実線は慣性反力による影響を考慮したもので、破線はそれを無視したものである。また数値計算は type (1), (2)



**Fig. 11** Specific resistance  
(comparison between Hirose's method and our simulation)

のタイムチャートについて実行されている。type (2) のタイムチャートを使用した方が全体的に大きな値を示しているのは、なめらかな速度変化を実現させるため、実質的に type (1) のほぼ3倍の最大速度になっているためである。いずれにせよ、慣性反力を無視した type (1), (2) の計算結果 (破線) は文献 (6) の計算結果 (慣性反力無視) をうまくはさみ込むような形になっており、計算結果の妥当性を示唆している。

**Fig.12** はデューティ比の影響について、type(1) のタイムチャートを用いて吟味したものである。Fig. 12 によりデューティ化は移動仕事率に大きく影響することがわかる。ところで  $\beta=0.75$  および  $\beta=0.5$  は、それぞれ4脚歩行機械、6脚歩行機械が静的安定歩行を実現するときの下限値である。ここで移動仕事率の観点から脚数による優劣を考えてみることにする。4脚歩行機械と6脚歩行機械が同じ大きさ、脚形態を有し、しかも同一速度で歩行していることを想定した場合、Fig. 12 は本質的に4脚歩行機械の方が多くのエネルギーを要することを意味している。もちろん Fig. 12 における差は、あくまでも質量比  $m$  まで等しいことを前提としている。一般的な比較を行うため、4脚の  $m$  を 0.2 とし、6脚の  $m$  を脚数に比例させて 0.3 として計算したのが Fig. 12 の一点鎖線である。 $\beta=0.75$  (4脚の下限値) との差は小さくなるが、定性的な傾向は変わらない。ただし  $\hat{u} \rightarrow 0$  の場合、脚系のポテンシャルエネルギーの変動に起因するエネルギー消費のため、4脚より6脚の方が多くのエネルギーを消費するようになる。また破線は立脚相にあるすべての足に均等に床反力が作用すると仮定して計算したものである。これより床反力分布による影響はそれほど大きくないことがわかる。



**Fig. 12** Specific resistance  
(parameter: duty factor  $\beta$ )



Fig.13 は質量比  $\hat{m}$  の影響について、type (1) のタイムチャートを用いて吟味したものである。同一歩幅比でみると、 $\hat{m}=0$  の移動仕事率を  $\epsilon_0$  として、 $\epsilon - \epsilon_0 \doteq k\hat{m}$  が成立していることがわかる。これは、脚質量が関節モーメントに対し線形的に関与することに対応している。

また  $\hat{m}$ ,  $\beta$ ,  $\hat{h}$ ,  $\hat{u}$ ,  $\hat{s}$  で結果を整理すれば、脚数  $n$  が結果にほとんど影響しないことをチェックするため、Fig. 13 には  $n=4$  (実線) の計算結果だけでなく、 $n=6$  (破線) の計算結果も示されている。この場合  $n=4$  と  $n=6$  との差は最大 3% で、平均的には 1.5% 程度となる。厳密には  $n \geq 8$  についても吟味する必要があるが、実際問題として  $n$  をいたずらに多くしても、それに見合うだけの効果は期待できないため、 $n=6$  程度で十分である。次に両者の計算結果が近似的に一致する理由を考えてみる。本研究で対象としている歩行機械のエネルギー消費は、(i) 脚系の運動エネルギーの変化、(ii) 脚系の重心上下動に起因するポテンシャルエネルギーの変化、(iii) 床反力に抗してアクチュエータがする正の仕事によってもたらされる。

ここで 1 周期について考えてみると、(i), (ii) に起因するエネルギー消費は脚形態、足先の運動軌跡が規定されれば、脚質量  $m_2$  と脚数  $n$  の積だけで決まってしまう。(iii) の場合、問題となるのは脚数により床反力分布が変化することである。したがって床反力分布による影響がどの程度かということが問題になるが、床反力分布の影響がそれほど大きくないことは Fig. 12 においてすでに示されている。つまり、 $\hat{m} = nm_2/m_1$  とおけば、脚数  $n$  による相違は、高々 Fig. 12 の  $\beta=0.75$  における実線と破線の差程度になることが推察される。そこで現象を支配する無次元数の数を一つでも少なくするという観点に立って、筆者らは脚数  $n$  を陽に表示しないという

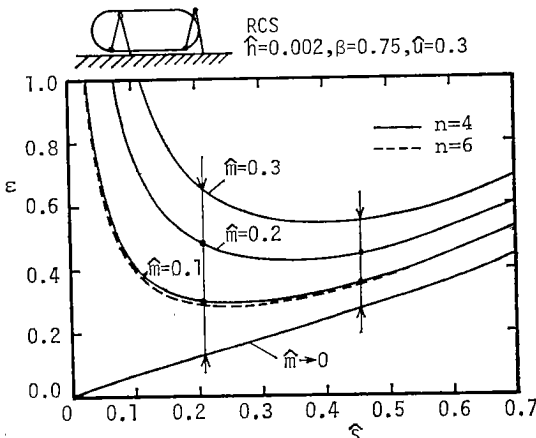


Fig. 13 Specific resistance (parameter : mass ratio  $\hat{m}$ )

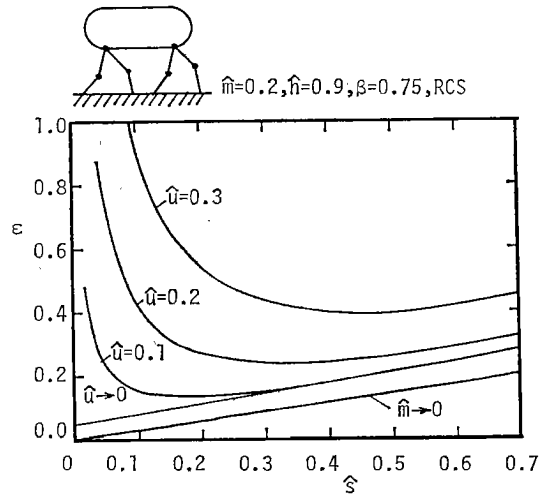


Fig. 14 Specific resistance (parameter : non-dimensional velocity  $\hat{u}$ )

立場をとっている。ただし、定式化は  $n$  脚系として行っているため、静的安定を実現するための必要条件として、立脚相の脚数  $\geq 3$ 、すなわち  $n\beta \geq 3$  が常に成立するように  $\beta$  を選定しなければならない。例えば 4 脚を想定すれば、 $0.75 \leq \beta < 1$  となるし、6 脚を想定すれば  $0.5 \leq \beta < 1$  となる。

Fig.14 は RCS 型のアクチュエータ配置を有する mammal type の歩行モデルを対象に、無次元速度  $\hat{u}$  の影響について type (1) のタイムチャートを用いて吟味したものである。ここに  $\hat{u} \rightarrow 0$  の漸近線が  $\hat{s} \rightarrow 0$  で  $\epsilon = 0$  にならないのは、Fig. 9(c) において  $\hat{s} \rightarrow 0$  で  $\epsilon = 0$  にならないのと同じような理由による (付録 4 参照)。

なお、以上の計算結果 (Fig. 9~Fig. 14) はすべて無次元表示されているため、歩行機械の大きさには全く依存しない。

### 3.7 $\epsilon = \epsilon(\hat{m}, \hat{s}, \hat{h}, \hat{u}, \beta)$ の関数形についての具体例

本節では、前節のシミュレーション結果をもとに  $\epsilon$  の関数形について考察してみる。一般的な形で  $\epsilon$  を表示することは、実際上きわめて困難であるため、ここでは RCS のアクチュエータ配置で insect type ( $\hat{h} \rightarrow 0$ ) の場合に限定する。この条件により、無次元数  $\hat{h}$  は固定されるため、 $\epsilon$  は  $\hat{m}$ ,  $\hat{s}$ ,  $\hat{u}$ ,  $\beta$  から構成される関数と考えることができる。

ところで、本研究で対象としている歩行機械の移動仕事率  $\epsilon$  は、以下の 3 つの項から構成されていると考えられる。

- (i) 脚系の運動エネルギーに起因する項  $\rightarrow \epsilon_1$
- (ii) 脚系の重心上下動に起因するポテンシャルエネルギーに起因する項  $\rightarrow \epsilon_2$

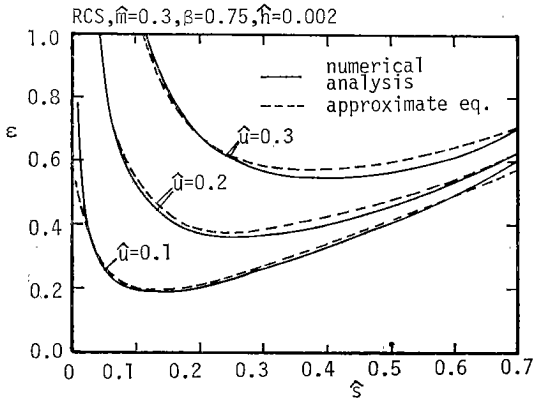


Fig. 15 Comparison between numerical analysis and approximate equation ( $\hat{m}, \beta, \hat{h}$  are fixed)

(iii) 床反力に対しアクチュエータがする正の仕事に対応する項  $\rightarrow \epsilon_3$

脚系の運動エネルギー  $E_1$  を胴体からみた脚系の最大運動エネルギーで代表すると  $E_1 \sim m_2 \{\beta / (1-\beta)\}^2 \bar{u}^2$  となり、移動仕事率の形で表示すると、 $k_1$  を定数として  $\epsilon_1 = k_1 \beta \hat{m} \{\beta / (1-\beta)\}^2 \bar{u}^2 / s$  となる。一方、Fig. 12 より (ii) および (iii) に起因する  $\epsilon_2, \epsilon_3$  はそれぞれ  $\epsilon_2 = k_2 q(\hat{m})$ ,  $\epsilon_3 = k_3 s$  になることがわかる。なお、線形解析 (付録 3) より  $k_3$  は 0.5 になる。ところで脚系の重心上下動によるエネルギー消費は  $\hat{m}$  に比例するため、 $q(\hat{m}) \sim \hat{m}$  と表わすことができる。ここで全体としての移動仕事率を仮に  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  の和として表示すると式 (24) が成立する。

$$\epsilon = f_1(\hat{m}, \beta) \frac{\hat{u}^2}{s} + f_2(\hat{m})s \quad (24)$$

$$\text{ただし, } f_1(\hat{m}, \beta) = k_1 \hat{m} \frac{\beta^3}{(1-\beta)^2} \quad (25)$$

$$f_2(\hat{m}) = k_2 \hat{m} + 0.5 \quad (26)$$

式 (24) は  $k_1, k_2$  を未知数とする方程式と考えれば、 $\epsilon, \hat{m}, \beta, s, \hat{u}$  について適当な 2 組の値を用いて容易に求めることができる。このようにして  $k_1 = 0.56, k_2 = 1.01$  を得る。Fig. 15, 16, 17 は式 (24) が数値計算結果をどの程度近似できるかを各パラメータについてチェックしたものである。式 (24) はかなり大胆な近似を用いて得た式であるにもかかわらず、 $k_1, k_2$  を適当に選定すれば、数値計算結果をかなりの精度で近似できることがわかる。また、式 (24) はシミュレーションにおいて使用している式に比べ、きわめて単純な形で表示されているため、代表的な脚について式 (24) のような形で定式化しておけば、理論的な移動仕事率  $\epsilon$  を容易に算出することができ、歩行機械を設計する上での指標になるものと筆者らは考えている。

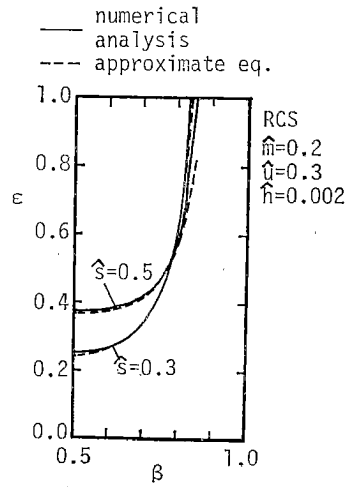


Fig. 16 Comparison between numerical analysis and approximate equation ( $\hat{m}, \hat{u}, \hat{h}$  are fixed)

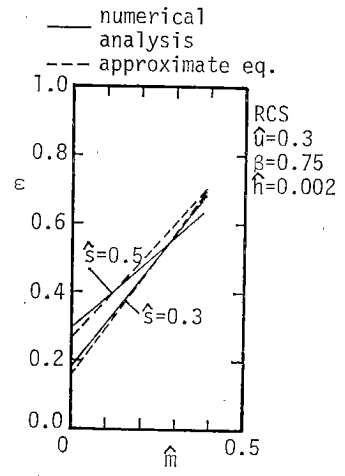


Fig. 17 Comparison between numerical analysis and approximate equation ( $\hat{u}, \beta, \hat{h}$  are fixed)

#### 4. 相似則に関する一解釈

例えば大きさは異なるが、幾何学的に完全に相似な 2 つのモデル 1, 2 を想定する。もし歩容形態まで同じであれば、 $\hat{h}_1 = \hat{h}_2, s_1 = s_2, \beta_1 = \beta_2$  が成立する。ここで仮に、 $\hat{m}_1 = \hat{m}_2$  とし、大きさが  $k$  倍異なる ( $l_1/l_2 = k$ ) ものとする、モデル 1, 2 の移動仕事率が理論的に等しくなるのは  $\bar{u}_1 = \sqrt{k} \bar{u}_2$  のときに限られる。つまり歩行機械の移動仕事率はたとえ相似な歩行機械であっても、大きさが異なれば変化し、それらが一致するのは限られた運転条件に限定される。

#### 5. あとがき

歩行機械のエネルギー効率を評価する指標として、移動仕事率を考え、移動仕事率の観点から歩行機械の相似則について、シミュレーションを含めて検討を行い、以下のような知見が得られた。

(1) 移動仕事率  $\epsilon$  は質量比  $\hat{m}$ 、無次元高さ  $\hat{h}$ 、歩幅比  $\beta$ 、デューティ比  $\beta$ 、および無次元速度  $\hat{u}$  の5つの無次元数の関数として表示できる。

(2) 無次元胴体高さ  $\hat{h}$  が移動仕事率に及ぼす影響はきわめて大きい、mammal type の場合、同一歩幅比では  $\hat{h}$  を大きくするほど移動仕事率は小さくなる。また insect type の場合、逆に  $\hat{h}$  を小さくするほど移動仕事率は小さくなる。

(3) 同一歩幅比で考えた場合、質量比  $\hat{m}$  が移動仕事率に及ぼす影響は線形的となる。

(4) 脚系の加速度運動に伴って発生する床面慣性反力によるアクチュエータ消費エネルギーは、歩行速度が大きくなると無視することはできない。

(5) 同一脚を使って4脚、6脚歩行機械を構成し、同一速度で歩行させた場合、デューティ比  $\beta$  を0.5まで下げられるという理由により、一般に高速では6脚歩行機械の移動仕事率の方が小さくなる。また低速では4脚歩行機械の方が小さくなる。

(6) 脚質量比  $\hat{m}$  が等しく、幾何学的に相似な2台の歩行機械1, 2を考えた場合、理論上両者の移動仕事率が等しくなるのは  $\hat{u}_1 = \sqrt{k} \hat{u}_2$  に限定される。ただし  $\hat{u}$  は平均歩行速度で、 $k$  は相似比 ( $=l_1/l_2$ ) である。

最後に、本研究を進めるにあたり、オハイオ州立大学の R. B. McGhee 教授より、不静定問題のアプローチ方法を含め、有益な助言をいただいた。ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) K. J. Waldron, et al., "Configuration Design of the Adaptive Suspension Vehicle", Int. J. Robotics Res. 3-2, p.37, 1984
- 2) G. Gabrielle, T. von Karman, "What Price Speed", Mechanical Engineering, 72-10, p.775, 1950
- 3) M. G. Bekker, "Introduction to Terrain-Vehicle Systems", Univ. of Michigan Press, p.417, 1967
- 4) M. Kaneko et al., "Legged Locomotion Machine Based on the Consideration on Degrees of Freedom", 5th CISM-IFTOMM Symp. on Theory and Practice of Robots and Manipulators, p.306, 1984
- 5) T. Frank, "Dynamic Study of a Four-Bar Linkage Walking Machine Leg", OSU Master Thesis, 1982
- 6) 広瀬 祐谷, "歩行機械のエネルギー効率に関する基本的考察", 計測自動制御学会論文集, 第15巻, 第7号, p.78, 1979
- 7) T. J. Pedley, "Scale Effect in Animal Locomotion", Academic Press, p.93, 1977
- 8) 江守はか, "模型実験の理論と応用", 技報堂, p.27, 1973
- 9) C. A. Klein et al., "Use of Force and Attitude Sensors for Locomotion of a Legged Vehicle over Irregular Terrain", Int. J. Robotics Res. 2-3, p.3, 1983
- 10) A. Gelb, "Applied Optimal Estimation", MIT Press, p.19, 1979

【付 録 1】

(1) RCS の場合

$$A_i = \begin{pmatrix} \frac{4}{3}ml^2 + \frac{1}{2}ml^2 \cos(\theta_{i1} - \theta_{i2}) \\ \frac{1}{2}ml^2 \cos(\theta_{i1} - \theta_{i2}) \\ \frac{1}{3}ml^2 + \frac{1}{2}ml^2 \cos(\theta_{i1} - \theta_{i2}) \\ \frac{1}{3}ml^2 \end{pmatrix} \quad (A.1)$$

$$B_i = \begin{pmatrix} ml^2 \sin(\theta_{i1} - \theta_{i2}) & \frac{1}{2}ml^2 \sin(\theta_{i1} - \theta_{i2}) \\ -\frac{1}{2}ml^2 \sin(\theta_{i1} - \theta_{i2}) & 0 \end{pmatrix} \quad (A.2)$$

$$C_i = \begin{pmatrix} \frac{3}{2}mgl & \frac{1}{2}mgl \\ 0 & \frac{1}{2}mgl \end{pmatrix} \quad (A.3)$$

$$D_i = \begin{pmatrix} -l(\cos \theta_{i1} + \cos \theta_{i2}) & -l(\sin \theta_{i1} + \sin \theta_{i2}) \\ -l \cos \theta_{i2} & -\sin \theta_{i2} \end{pmatrix} \quad (A.4)$$

(2) BCS の場合

$$A_i = \begin{pmatrix} \frac{4}{3}ml^2 & \frac{1}{2}ml^2 \cos(\theta_{i1} - \theta_{i2}) \\ \frac{1}{2}ml^2 \cos(\theta_{i1} - \theta_{i2}) & \frac{1}{3}ml^2 \end{pmatrix} \quad (A.5)$$

$$B_i = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2}ml^2 \sin(\theta_{i1} - \theta_{i2}) & \frac{1}{2}ml^2 \sin(\theta_{i1} - \theta_{i2}) \\ -\frac{1}{2}ml^2 \sin(\theta_{i1} - \theta_{i2}) & 0 \end{pmatrix} \quad (A.6)$$

$$C_i = \begin{pmatrix} \frac{3}{2}mgl & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}mgl \end{pmatrix} \quad (A.7)$$

$$D_i = \begin{pmatrix} -l \cos \theta_{i1} & -l \sin \theta_{i1} \\ -l \cos \theta_{i2} & -l \sin \theta_{i2} \end{pmatrix} \quad (A.8)$$

【付録2】

RCS の場合、 $\alpha_{ij}$  と  $\theta_{ij}$  の関係は Fig.4 より、式 (A.9) で与えられる。

$$\begin{cases} \alpha_{i1} = \theta_{i1} + \frac{\pi}{2} \\ \alpha_{i2} = \theta_{i2} - \theta_{i1} + \pi \end{cases} \quad (A.9)$$

したがって  $\dot{\alpha}_i$  と  $\dot{\theta}_i$  の関係で表示すると、 $K$  は式 (A.10) で与えられる。

$$K = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \quad (A.10)$$

同様に BCS の場合の  $K'$  を求めると、式 (A.11) と

なる。

$$K' = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A} \cdot 11)$$

$$\hat{h} > 0.5 \text{ RCS, } \varepsilon \doteq \frac{1}{4} \frac{\$}{\hat{h}} \quad (\text{A} \cdot 17)$$

### 【付 録 3】

脚質量が零の場合、腰関節でなされる仕事と膝関節でなされる仕事の和は必ず零となる。なぜなら、胴体は自重支持力の方向に対し直角方向に動くため、自重支持力は系に対して仕事をしないからである。以上のことを考慮し、文献(7)およびアクチュエータのモデル式(5)を参考にすると、RCS についての移動仕事率は式(A・12)、(A・13)のように定式化することができる。

$$\varepsilon = \frac{1}{\$} \int_{\hat{x}_1}^{\hat{x}_2} |R(\hat{x}, \hat{h})| d\hat{x} \quad (\text{A} \cdot 12)$$

$$R(\hat{x}, \hat{h}) = \frac{\hat{h}\hat{x}}{\hat{x}^2 + \hat{h}^2} + \frac{\hat{x}^2}{(1 - \hat{x}^2 - \hat{h}^2)^{1/2} (\hat{x}^2 + \hat{h}^2)^{1/2}} \quad (\text{A} \cdot 13)$$

ただし、座標  $x$  は腰部を原点にとって進行方向を正にとったものである。また  $\hat{x} = x/2l$

一方 BCS の場合、被積分関数は式(A・14)となる。

$$B(\hat{x}, \hat{h}) = \frac{1}{2} \left\{ - \frac{\hat{h}^2 (1 - \hat{x}^2 - \hat{h}^2)^{1/2}}{(\hat{x}^2 + \hat{h}^2)^{3/2}} + \frac{\hat{x}^2}{(1 - \hat{x}^2 - \hat{h}^2)^{1/2} (\hat{x}^2 + \hat{h}^2)^{1/2}} \right\} \quad (\text{A} \cdot 14)$$

次に、歩幅が足の長さ比べて十分小さい ( $s/2l \ll 1$ ) とすると、 $\hat{x}^2$  以上の項まで無視して近似解を得ることができる。

$$\hat{h} \rightarrow 0 \quad \text{RCS, } \varepsilon \doteq \frac{1}{2} \$ \quad (\text{A} \cdot 15)$$

$$\hat{h} \rightarrow 0 \quad \text{BCS, } \varepsilon \doteq \frac{1}{4} \$ \quad (\text{A} \cdot 16)$$

### 【付 録 4】

消費エネルギー  $E$  は単純に考えると、関節モーメント  $M$  と関節角変化量  $\Delta\alpha$  の積として式(A・18)のように表わされる。ただし腰関節と膝関節が考えられるが、 $\omega = 0$  の場合、両者の外部仕事は常に大きさが等しくて符号が逆になるので、腰関節だけに着目しても一般性を失うことはない。

$$E \sim M \cdot \Delta\alpha \quad (\text{A} \cdot 18)$$

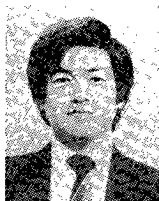
ところで関節モーメント  $M$  および角度変化量  $\Delta\alpha$  は RCS および insect type の BCS の場合、 $M \propto s$ 、 $\Delta\alpha \propto s$  と考えられる。したがって  $s=0$  の場合の移動仕事率は、式(A・19)となる。

$$\varepsilon = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{ks^2}{m_1gs} = 0 \quad (\text{A} \cdot 19)$$

次に、mammal type の BCS の場合を想定すると、 $s=0$  であっても、腰関節部のモーメントは零でない(3.1 節参照)から、 $M = k_1 + k_2s$ 、 $\Delta\alpha \propto s$  となる。したがって  $s=0$  における移動仕事率は式(A・20)となる。

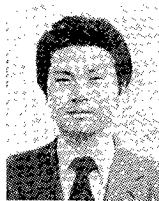
$$\varepsilon = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{k's(k_1 + k_2s)}{m_1gs} \neq 0 \quad (\text{A} \cdot 20)$$

以上が  $s=0$  で  $\varepsilon \neq 0$  となる物理的根拠である。なお同様なことは mammal type の RCS ( $m \neq 0$ ) においても考えられる。この場合、 $s=0$  で  $\varepsilon \neq 0$  となるのは脚質量が腰関節に対して常にモーメントを発生することに起因している。



金子 真 (Makoto KANEKO)

昭和 29 年 1 月 18 日生れ。51 年九州工業大学機械工学科卒業。53 年東京大学機械工学系大学院修士課程修了。56 年同大学博士課程修了。同年通産省工業技術院機械技術研究所入所。移動ロボット用障害物検出センサ、多足歩行機械などロボット関連の研究に従事。気液二相流ポンプ系の不安定現象にも興味を持つ。59 年日本機械学会賞奨励賞受賞。現在ロボティクス部感覚機構課技官。日本機械学会、計測自動制御学会、バイオメカニズム学会、IEEE などの会員。工学博士。(日本ロボット学会正会員)



館 瞳 (Susumu TACHI)

昭和 21 年 1 月 1 日生れ。43 年東京大学工学部計数工学科卒業。48 年同大学院博士課程修了。工学博士。同年同大工学部助手。50 年通産省工業技術院機械技術研究所に移り、現在ロボティクス部感覚機構課主任研究官。バイスペクトルなどの統計的信号処理、電気刺激による情報伝達、盲導ロボット、テレグジスタンスなどの研究に従事。54~55 年米国マサチューセッツ工科大学 (MIT) 客員研究員。IEEE、計測自動制御学会、日本 ME 学会、バイオメカニズム学会、日本機械学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)



谷江和雄 (Kazuo TANIE)

昭和 21 年 11 月 6 日生れ。46 年 3 月早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年 4 月通産省工業技術院機械技術研究所入所。現在ロボティクス部感覚機構課主任研究官。55 年 2 月工学博士。56 年 8 月から 1 年間 UCLA Biotechnology Laboratory 客員研究員。動力義手、電気刺激による情報伝達、ロボットのセンサなどの研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会、バイオメカニズム学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)



阿部 稔 (Minoru ABE)

昭和 7 年 8 月 11 日生れ。30 年 3 月横浜国立大学工学部機械工学科卒業。同年 4 月通産省工業技術院機械試験所 (現、機械技術研究所) に入所、現在に至る。この間、機械要素の研究に従事後、動力義手、盲人用歩行誘導機械等福祉機器の研究開発に従事。現、ロボティクス部長。日本機械学会、計測自動制御学会、バイオメカニズム学会、日本 ME 学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

## Basic Study on Similarity in Walking Machine from a Point of Energetic Efficiency\*

Makoto KANEKO\*\*

Susumu TACHI\*\*

Kazuo TANIE\*\*

Minoru ABE\*\*

### Abstract

This paper describes the problem of similarity on walking machines in the energetic efficiency.

First of all, five non-dimensional parameters which control the energetic efficiency of walking machines are introduced for nine physical parameters by applying the techniques of dimensional analysis.

In order to check those influences on the energetic efficiency, the basic considerations on actuator arrangement and computer simulations are performed for n-legged walking model. The influence on the ground reaction forces caused by the leg inertia forces is especially considered in this simulation.

Simulation results and basic explanations on similarity are concluded in the following way: (1) Energetic efficiency (specific resistance) is largely influenced by the body height ratio, even though the same stride ratio is assumed. (2) Energetic efficiency (specific resistance) is influenced linearly by the leg/body mass ratio. (3) Ground reaction forces due to the leg inertia force are not always negligible. (4) Six-legged machines (minimum duty factor=0.5) consume the fewer energy than four-legged machines (minimum duty factor=0.75) in high walking speed, while the result becomes opposite in extremely low speed. (5) Even though two walking machines have the similar configurations and same leg/body mass ratio, energetic efficiencies for both machines are not equal generally, and same energetic efficiencies are only realized in the limited walking speed.

Key word: Walking machine, Specific resistance, Similarity

\* Received December 19, 1984

\*\* Robotics Department, Mechanical Engineering Laboratory