

## 歩行に影響する腕の振りの基礎的研究

真 武 友 一\*・今 井 康 文\*  
高 瀬 徹\*\*・松 本 俊 久\*\*\*

Basic Study on Arm Swing for Walking

By

Tomokazu MATAKE, Yasufumi IMAI

(Mechanical Engineering)

Tooru TAKASE

(Graduate Student)

and

Toshihisa MATSUMOTO

(Nippon Telegraph & Telephone Public Corporation)

The influence of the arm swing on the gait has been investigated by using the simple model. The model consists mainly of the shoulder, the waist, and the torsional spring as the backbone which connects the shoulder and the waist. Two arms and two legs are also pinned to appropriate positions. Variations of the swing angle of the leg and the twist angle of the waist associated with the sinusoidal swing of arms were numerically calculated for following three cases:

- I alternation of the periods during which each foot is fixed,
- II alternation of the period during which one foot is fixed and the period during which both feet are fixed,
- III adding to the pattern, case II, one foot can be swung when the other foot is fixed. Obtained variations are consistent with the actual.

The model used in this investigation aids us to understand how the swing of arms assists the leg to swing forward.

### 1. 緒 言

歩行に関する研究は、人体欠損を補うための義足の研究<sup>1)</sup>に端を発して、最近のロボットの歩行機構開

発に至るまで多分野にわたってその特性の研究ならびに開発が進められている。他方、Biomechanicsの分野では身体の機構や運動機能に関する研究<sup>2)</sup>が盛

昭和54年9月27日受理

\* 機械工学科

\*\* 大学院工学研究科

\*\*\* 電々公社

んで、医学や体育関係<sup>3)</sup>で著しい進歩をみせている。たとえば、水泳、ジャンプ、バレーのスパイクなどスポーツ界では研究結果を採入れて合理的な機能の訓練を行ない、記録の更新が続いている。

歩行はこれらの運動に比べると基本的で、一見極めて単調にみえる。しかし、詳細に考察すればその運動は、はなはだ複雑である。したがって歩行の実態の調査も Basography, 筋電図, 足圧図など方法論的にも多種多様で、歩行によって発生する一現象を取上げても多くの情報が得られており、歩行のために駆動される多くの筋肉, 関節, 骨格, 神経などを考えてみれば、ヒトの歩行全体を解析するためには膨大な系統的的研究調査が必要となる。

しかし、概観的に考えれば歩行は物体の運動であるから物理学的, 運動力学的な面より探究するのも一方法である。この方面で有力な手がかりになるのが Force plate 法である。この方法については、著者の一人が従来の欠点を改良した新しい踏力計を開発し、この計器を用いて得られる図形から6通りの歩行特性を定義し、これらの図形を用いれば歩行状態が定型化されることを提唱した<sup>4), 5)</sup>。さらに足関節と膝関節に回転ばねをもつ脚部をピンで結合した2脚モデルを考案した。このモデルにある初速度を与えれば、正常歩行における heel contact, foot flat, toe off の歩行を続け、ピン(重心)の位置はヒトの正常歩行時の重心と同様、ほぼ正弦曲線を描くことがわかった<sup>6)</sup>。その時の足の床反力は、前報告<sup>4), 5)</sup>の正常歩行 $\alpha$ 線図に近いものとなり、このモデルが歩行の解析に有用であることがわかった。

前述のように、歩行現象は複雑で、その解析に関して多数の研究が報告されているが、これらの中で等閑に附されているものに腕の運動がある。歩行は確かに脚の運動である。腕の振りは補助的な運動でしかない。腕を振らないで脚を前後する歩容(gait)ならびにロボットの歩行などもあるが、一般には腕の振り、およびこれによる身体の捻転運動が、脚の蹴り出しおよびこれによる下半身の捻転運動とのバランスをとり、ある意味で歩行運動全体をコントロールするという重要な役目を果している。すなわち、腕の振りには下半身の捻転運動にバランスするための上半身の捻転運動と、下半身に捻転を与えて脚を蹴り出すための上半身の捻転運動に相当するものがあると考えられる。また、歩行は多くの関節, 多くの筋肉や神経の作用によって起きる多元的な運動であるから、上半身の捻転運動を単純なモデル、すなわち数個のばねを有する力学的モデルで論ずるにはいくつかの仮定を必要とする。

また、歩行においては捻転運動が重要な役割をなすことを前報告の $\xi, \eta, \zeta$ 線図<sup>3)</sup>において指摘しているので、本報告では以上のことがらを考慮して、歩行における腕の振りによる身体の捻転運動の重要性を力学的モデルと計算を用いて解明する。

## 2. モデルと仮定

本研究に用いたモデルは、Figs. 1, 2のように、2個の質量 $m_1$ を長さ $2l_1$ 、質量 $M_1$ 、慣性モーメン

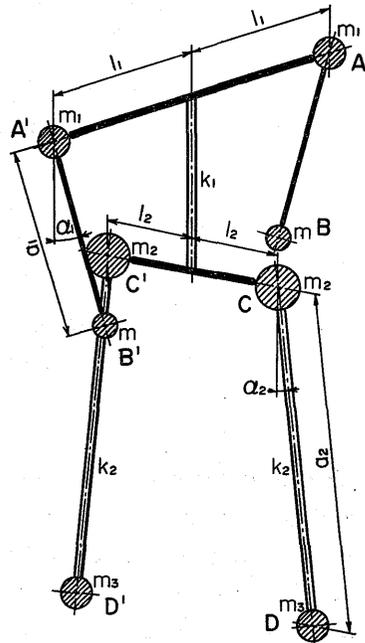


Fig. 1 General view of walking model

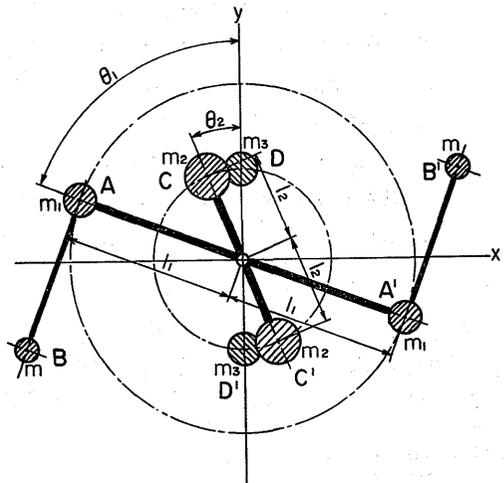


Fig. 2 Plan of walking model

ト  $I_1$  の剛体で連続した肩部  $AA'$  と、この両端から長さ  $a_1$  の先端に質量  $m$  をもつ腕部がある。肩部の中央は、長さ  $2l_2$  の両端に質量  $m_2$  をもつ腰部（質量  $M_2$ 、慣性モーメント  $I_2$ ）の中央とねじりのばね常数  $k_1$  のばねで接続されている。腰部の両端  $C, C'$  は、先端に質量  $m_3$  をもち、ねじりのばね常数  $k_2$ 、長さ  $a_2$  の脚部に結合している。ここでは、肘関節および膝関節は考えていない。

解析を簡単にするために、

- (1) 歩行の際も垂直軸は傾かない。すなわち肩部  $AA'$  および腰部  $CC'$  は水平面内で回転する。
- (2) 肩部  $AA'$  の回転による手部の質量  $m$  の遠心運動および腰部  $CC'$  の回転による足の質量  $m_3$  の遠心運動は考えない。
- (3) 腕  $AB, A'B'$  および脚  $CD$  の回転に対する慣性モーメントは考えない。
- (4) 連結部  $A, A'$ ;  $C, C'$  は回転自由ではねはない。
- (5) 最初、脚部は垂直な状態で運動する。
- (6) つぎに、脚を蹴出す場合は蹴出された脚が着地すると同時に重心  $G$  は両足の中央に移動して捻転運動を行なう。
- (7) 肩部の回転と腰部の回転運動は位相が  $180^\circ$  異なる。
- (8) 腕  $AB, A'B'$  の振り上げ角は前後で同じである。

### 3. 腕の振りによる運動方程式

#### 3-1 片足接地の場合 (Fig. 3)

片足接地で回転運動がおこる場合、接地足を座標原点  $O$  とする。

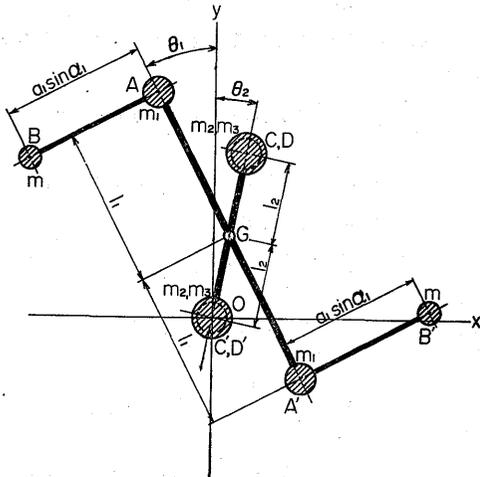


Fig. 3 Walking model with a fixed foot

G 点の座標および速度は

$$x=l_2\sin\theta_2, \quad y=l_2\cos\theta_2, \quad v=l_2\dot{\theta}_2 \quad (1)$$

C, D 点の座標および速度は

$$x=2l_2\sin\theta_2, \quad y=2l_2\cos\theta_2, \quad v=2l_2\dot{\theta}_2 \quad (2)$$

A 点の座標および速度は

$$\left. \begin{aligned} -x &= l_1\sin\theta_1 - l_2\sin\theta_2 \\ y &= l_1\cos\theta_1 + l_2\cos\theta_2 \\ v^2 &= \dot{x}^2 + \dot{y}^2 = l_1^2\dot{\theta}_1^2 + l_2^2\dot{\theta}_2^2 - 2l_1l_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\cos(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \right\} (3)$$

A' 点の座標および速度は

$$\left. \begin{aligned} x &= l_1\sin\theta_1 + l_2\sin\theta_2 \\ y &= l_1\cos\theta_1 + l_2\cos\theta_2 \\ v^2 &= \dot{x}^2 + \dot{y}^2 = l_1^2\dot{\theta}_1^2 + l_2^2\dot{\theta}_2^2 + 2l_1l_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\cos(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \right\} (4)$$

B 点の座標および速度は

$$\left. \begin{aligned} -x &= -l_1\sin\theta_1 + l_2\sin\theta_2 - a_1\sin\alpha_1\cos\theta_1 \\ y &= l_1\cos\theta_1 + l_2\cos\theta_2 - a_1\sin\alpha_1\sin\theta_1 \\ z &= a_1(1 - \cos\alpha_1) \\ v^2 &= \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 \\ &= l_1^2\dot{\theta}_1^2 + l_2^2\dot{\theta}_2^2 + a_1^2\dot{\alpha}_1^2 + a_1^2\dot{\theta}_1^2\sin^2\alpha_1 - 2l_1l_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\cos(\theta_1 + \theta_2) \\ &\quad + 2l_1a_1\dot{\theta}_1\dot{\alpha}_1\cos\alpha_1 - 2l_2a_1\dot{\theta}_2\dot{\alpha}_1\cos(\theta_1 + \theta_2) + 2l_2a_1\dot{\theta}_2\dot{\alpha}_1\sin\alpha_1\sin(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \right\} (5)$$

B' 点の座標および速度は

$$\left. \begin{aligned} x &= l_1\sin\theta_1 + l_2\sin\theta_2 + a_1\sin\alpha_1\cos\theta_1 \\ y &= -l_1\cos\theta_1 + l_2\cos\theta_2 + a_1\sin\alpha_1\sin\theta_1 \\ z &= a_1(1 - \cos\alpha_1) \\ v^2 &= \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 \\ &= l_1^2\dot{\theta}_1^2 + l_2^2\dot{\theta}_2^2 + a_1^2\dot{\alpha}_1^2 + a_1^2\dot{\theta}_1^2\sin^2\alpha_1 \\ &\quad + 2l_1l_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\cos(\theta_1 + \theta_2) + 2l_1a_1\dot{\theta}_1\dot{\alpha}_1\cos\alpha_1 \\ &\quad + 2l_2a_1\dot{\theta}_2\dot{\alpha}_1\cos(\theta_1 + \theta_2) - 2l_2a_1\dot{\theta}_2\dot{\alpha}_1\sin(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \right\} (6)$$

この系の運動エネルギーおよびポテンシャルエネルギーは

$$\left. \begin{aligned} 2T &= 2m(l_1^2\dot{\theta}_1^2 + l_2^2\dot{\theta}_2^2 + a_1^2\dot{\alpha}_1^2 + a_1^2\dot{\theta}_1^2\sin^2\alpha_1 \\ &\quad + 2l_1a_1\dot{\theta}_1\dot{\alpha}_1\cos\alpha_1) + 2m_1(l_1^2\dot{\theta}_1^2 + l_2^2\dot{\theta}_2^2 \\ &\quad + 4(m_2 + m_3)l_2^2\dot{\theta}_2^2 + (M_1 + M_2)l_2^2\dot{\theta}_2^2 \\ &\quad + I_1\dot{\theta}_1^2 + I_2\dot{\theta}_2^2 \\ 2U &= 4mga_1(1 - \cos\alpha_1) + k_1(\theta_1 + \theta_2)^2 \\ &\quad + k_2\theta_2^2 \end{aligned} \right\} (7)$$

これから Lagrange の運動方程式の各項を求めれば次のようである。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_1} \right) &= 2m(l_1^2 \ddot{\theta}_1 + a_1^2 \ddot{\theta}_2 \sin^2 \alpha_1 + 2a_1^2 \dot{\theta}_1 \dot{\alpha}_1 \cdot \\ &\quad \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 + l_1 a_1 \ddot{\alpha}_1 \cos \alpha_1 - l_1 a_1 \dot{\alpha}_1^2 \sin \alpha_1) \\ &\quad + 2m_1 l_1 \ddot{\theta}_1 + I_1 \ddot{\theta}_1 \\ \frac{\partial T}{\partial \theta_1} &= 0, \quad \frac{\partial U}{\partial \theta_1} = k_1(\theta_1 + \theta_2) \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_2} \right) &= l_2^2 \ddot{\theta}_2 \{ 2(m + m_1 + 2m_2 + 2m_3) \\ &\quad + M_1 + M_2 \} + I_2 \ddot{\theta}_2 \\ \frac{\partial T}{\partial \theta_2} &= 0, \quad \frac{\partial U}{\partial \theta_2} = k_1(\theta_1 + \theta_2) + k_2 \theta_2 \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}_1} \right) &= 2m(a_1^2 \ddot{\alpha}_1 - l_1 a_1 \dot{\theta}_1 \dot{\alpha}_1 \sin \alpha_1 \\ &\quad + l_1 a_1 \ddot{\theta}_1 \cos \alpha_1) \\ \frac{\partial T}{\partial \alpha_1} &= 2m(a_1^2 \dot{\theta}_1^2 \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 - l_1 a_1 \dot{\theta}_1 \dot{\alpha}_1 \sin \alpha_1) \\ \frac{\partial U}{\partial \alpha_1} &= 2m g a_1 \sin \alpha_1 \end{aligned}$$

これらを用いれば Lagrange の運動方程式が求まる。

$$\left. \begin{aligned} 2m(l_1^2 \ddot{\theta}_1 + a_1^2 \ddot{\theta}_2 \sin^2 \alpha_1 + 2a_1^2 \dot{\theta}_1 \dot{\alpha}_1 \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 \\ - l_1 a_1 \dot{\alpha}_1^2 \sin \alpha_1 + l_1 a_1 \ddot{\alpha}_1 \cos \alpha_1) + 2m_1 l_1 \ddot{\theta}_1 \\ + I_1 \ddot{\theta}_1 + k_1(\theta_1 + \theta_2) &= 0 \\ \{ 2(m + m_1 + 2m_2 + 2m_3) + M_1 + M_2 \} l_2^2 \ddot{\theta}_2 \\ + I_2 \ddot{\theta}_2 + k_1(\theta_1 + \theta_2) + k_2 \theta_2 &= 0 \\ a_1^2 \ddot{\alpha}_1 + l_1 a_1 \ddot{\theta}_1 \sin \alpha_1 - a_1^2 \dot{\theta}_1^2 \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 \\ + g a_1 \sin \alpha_1 &= 0 \end{aligned} \right\} (8)$$

### 3-2 両足接地の場合 (Fig. 4)

片足D'を接地して腕AB, A'B'の振り, 肩部AA'の回転によって腰部CC'が回転し, 足Dは前方へ回転して着地する。ここで両足接地となり腕の振り, 肩部の回転は逆方向となる。この状態は Fig. 4 のように表わされる。座標原点Oは重心Gに一致する。

AあるいはA'点の座標および速度は

$$x = \pm l_1 \sin \theta_1, \quad y = \pm l_1 \cos \theta_1, \quad v = l_1 \dot{\theta}_1 \quad (9)$$

CあるいはC'点の座標および速度は

$$x = \pm l_2 \sin \theta_2, \quad y = \pm l_2 \cos \theta_2, \quad v = l_2 \dot{\theta}_2 \quad (10)$$

BあるいはB'点の座標および速度は

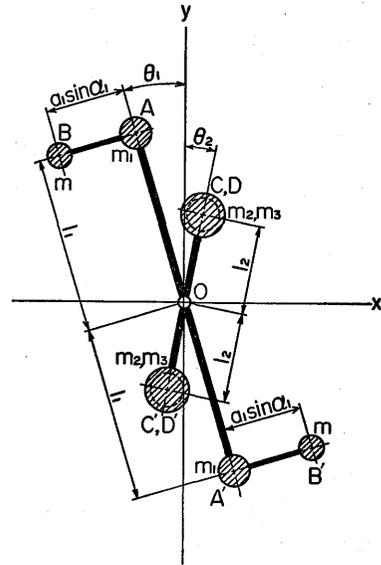


Fig. 4 Walking model with feet fixed

$$\left. \begin{aligned} x &= \pm l_1 \sin \theta_1 \mp a_1 \sin \alpha_1 \cos \theta_1 \\ y &= \pm l_1 \cos \theta_1 \mp a_1 \sin \alpha_1 \sin \theta_1 \\ z &= a_1 (1 - \cos \alpha_1) \\ v^2 &= \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 \\ &= l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + a_1^2 \dot{\theta}_1^2 \sin^2 \alpha_1 + a_1^2 \dot{\alpha}_1^2 \\ &\quad + 2l_1 a_1 \dot{\theta}_1 \dot{\alpha}_1 \cos \alpha_1 \end{aligned} \right\} (11)$$

運動エネルギーおよびポテンシャルエネルギーは

$$\left. \begin{aligned} 2T &= 2m(l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + a_1^2 \dot{\theta}_1^2 \sin^2 \alpha_1 + a_1^2 \dot{\alpha}_1^2 \\ &\quad + 2l_1 a_1 \dot{\theta}_1 \dot{\alpha}_1 \cos \alpha_1) + 2m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + 2m_2 l_2^2 \dot{\theta}_2^2 \\ &\quad + I_1 \dot{\theta}_1^2 + I_2 \dot{\theta}_2^2 \\ 2U &= 4m g a_1 (1 - \cos \alpha_1) + k_1(\theta_1 + \theta_2)^2 \\ &\quad + 2k_2 \theta_2^2 \end{aligned} \right\} (12)$$

Lagrange の運動方程式の各項を求めれば次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_1} \right) &= 2m(l_1^2 \ddot{\theta}_1 + a_1^2 \ddot{\theta}_2 \sin^2 \alpha_1 + 2a_1^2 \dot{\theta}_1 \dot{\alpha}_1 \cdot \\ &\quad \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 + l_1 a_1 \ddot{\alpha}_1 \cos \alpha_1 - l_1 a_1 \dot{\alpha}_1^2 \sin \alpha_1) \\ &\quad + 2m_1 l_1 \ddot{\theta}_1 + I_1 \ddot{\theta}_1 \\ \frac{\partial T}{\partial \theta_1} &= 0, \quad \frac{\partial U}{\partial \theta_1} = k_1(\theta_1 + \theta_2) \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_2} \right) &= (2m_2 l_2^2 + I_2) \ddot{\theta}_2 \\ \frac{\partial T}{\partial \theta_2} &= 0, \quad \frac{\partial U}{\partial \theta_2} = k_2(\theta_1 + \theta_2) + 2k_2 \theta_2 \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}_1} \right) &= 2m(a_1^2 \ddot{\alpha}_1 + l_1 a_1 \ddot{\theta}_1 \cos \alpha_1 - l_1 a_1 \dot{\theta}_1 \dot{\alpha}_1 \cdot \\ &\quad \sin \alpha_1) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{a}_1} = 2m(a_1^2 \dot{\theta}_1^2 \sin a_1 \cos a_1 - l_1 a_1 \dot{\theta}_1 \dot{a}_1 \sin a_1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial a_1} = 2mga_1 \sin a_1$$

したがって、Lagrange の運動方程式は次のように求まる。

$$\left. \begin{aligned} (2ml_1^2 + 2ma_1^2 \sin^2 a_1 + 2m_1 l_1^2 + I_1) \ddot{\theta}_1 \\ + 4ma_1^2 \dot{\theta}_1 \dot{a}_1 \sin a_1 \cos a_1 - 2ml_1 a_1 \dot{a}_1^2 \sin a_1 \\ + l_1 a_1 \ddot{a}_1 \cos a_1 + k_1(\theta_1 + \theta_2) = 0 \\ (2m_2 l_2 + I_2) \ddot{\theta}_2 + k_1(\theta_1 + \theta_2) + 2k_2 \theta_2 = 0 \\ l_1 a_1 \dot{\theta}_1 \cos a_1 + a_1^2 \ddot{a}_1 - a_1^2 \dot{\theta}_1^2 \sin a_1 \cos a_1 \\ + ga_1 \sin a_1 = 0 \end{aligned} \right\} (13)$$

### 3-3 片足が接地して他足を蹴り出す場合

(Fig. 5)

3-1 においては脚 C'D' を軸として捻転しても脚 CD は C 点の下で垂直のまま水平運動したが、ここでは前に蹴り出される場合を考えよう。ただし CD は腰部 CC' に垂直な平面内の運動のみで、腰部の回転運動による遠心運動は考えない。この場合 Fig. 5 のような状態となるが、これは Fig. 3 で D 点が前に出たものである。したがって(1)~(6)式以外に D 点に関することを考えればよい。

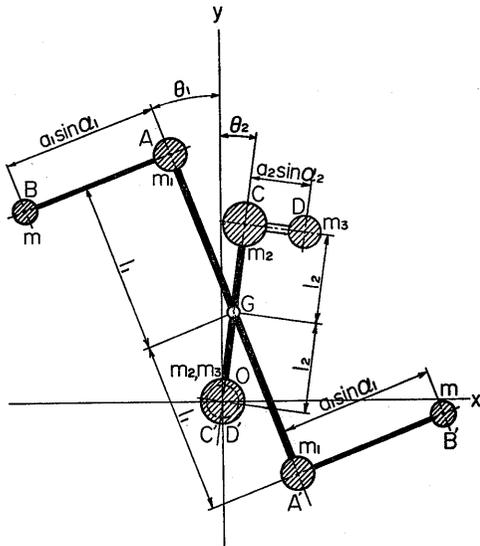


Fig. 5 Walking model with a fixed foot and a swing leg

D 点の座標および速度は

$$\left. \begin{aligned} x &= 2l_2 \sin \theta_2 + a_2 \sin a_2 \cos \theta_2 \\ y &= 2l_2 \cos \theta_2 - a_2 \sin a_2 \sin \theta_2 \\ z &= a_2(1 - \cos a_2) \\ v^2 &= \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 \\ &= 4l_2^2 \dot{\theta}_2^2 + a_2^2 \dot{\theta}_2^2 \sin^2 a_2 + a_2^2 \dot{a}_2^2 \\ &\quad + 4l_2 a_2 \dot{\theta}_2 \dot{a}_2 \cos a_2 \end{aligned} \right\} (14)$$

よって、この系の運動のエネルギーおよびポテンシャルエネルギーは

$$\left. \begin{aligned} 2T &= 2m(l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + l_2^2 \dot{\theta}_2^2 + a_1^2 \dot{a}_1^2 + a_1^2 \dot{\theta}_1^2 \sin^2 a_1 \\ &\quad + 2l_1 a_1 \dot{\theta}_1 \dot{a}_1 \cos a_1) + 2m_1(l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \\ &\quad + l_2^2 \dot{\theta}_2^2) + 4m_2 l_2^2 \dot{\theta}_2^2 + m_3(4l_2^2 \dot{\theta}_2^2 \\ &\quad + a_2^2 \dot{\theta}_2^2 \sin^2 a_2 + a_2^2 \dot{a}_2^2 + 4l_2 a_2 \dot{\theta}_2 \dot{a}_2 \cos a_2) \\ &\quad + (M_1 + M_2)l_2^2 \dot{\theta}_2^2 + I_1 \dot{\theta}_1^2 + I_2 \dot{\theta}_2^2 \\ 2U &= 4mga_1(1 - \cos a_1) + 2m_3 g a_2 \\ &\quad (1 - \cos a_2) + k_1(\theta_1 + \theta_2)^2 + k_2 \theta_2^2 \end{aligned} \right\} (15)$$

Lagrange の方程式の各項を求めれば

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_1} \right) = 2m(l_1^2 \ddot{\theta}_1 + a_1^2 \dot{\theta}_1 \sin^2 a_1 + l_1 a_1 \ddot{a}_1 \cos a_1 + 2a_1^2 \dot{\theta}_1 \dot{a}_1 \sin a_1 \cos a_1 - l_1 a_1 \dot{a}_1^2 \sin a_1) + 2m_1 l_1 \ddot{\theta}_1 + I_1 \ddot{\theta}_1$$

$$\frac{\partial U}{\partial \theta_1} = k_1(\theta_1 + \theta_2)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_2} \right) = l_2 \ddot{\theta}_2 (2(m + m_1 + 2m_2 + 2m_3) + M_1 + M_2) + I_2 \ddot{\theta}_2 + m_3(a_2^2 \dot{\theta}_2 \sin^2 a_2 + 2l_2 a_2 \dot{\theta}_2 \dot{a}_2 \cos a_2 + a_2^2 \dot{\theta}_2 a_2 \sin a_2 \cos a_2 + 2l_2 a_2 \dot{\theta}_2 \ddot{a}_2 \cos a_2 - 2l_2 a_2 \dot{\theta}_2 a_2 \sin a_2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \theta_2} = k_1(\theta_1 + \theta_2) + k_2 \theta_2$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{a}_1} \right) = 2m(a_1^2 \ddot{a}_1 + l_1 a_1 \dot{\theta}_1 \cos a_1 - l_1 a_1 \dot{\theta}_1^2 \sin a_1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial a_1} = 2m(a_1^2 \dot{\theta}_1^2 \sin a_1 \cos a_1 - l_1 a_1 \dot{\theta}_1^2 \sin a_1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial a_1} = 2mga_1 \sin a_1$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{a}_2} \right) = m_3(a_2^2 \ddot{a}_2 + 2l_2 a_2 \dot{\theta}_2 \cos a_2 - 2l_2 a_2 \dot{\theta}_2 a_2 \sin a_2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial a_2} = m_3(a_2^2 \dot{\theta}_2^2 \sin a_2 \cos a_2 - 2l_2 a_2 \dot{\theta}_2 a_2 \sin a_2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial a_2} = m_3 g a_2 \sin a_2$$

である。これらより Lagrange の運動方程式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned}
 &2m(l_1^2\ddot{\theta}_1 + a_1^2\ddot{\theta}_1\sin^2\alpha_1 + 2a_1^2\dot{\theta}_1\dot{\alpha}_1\sin\alpha_1\cos\alpha_1 - l_1a_1\dot{\alpha}_1^2\sin\alpha_1 + l_1a_1\ddot{\alpha}_1\cos\alpha_1) \\
 &+ 2m_1l_1\ddot{\theta}_1 + I_1\ddot{\theta}_1 + k_1(\theta_1 + \theta_2) = 0 \\
 &(2m + 2m_1 + 4m_2 + 4m_3 + M_1 + M_2)l_2^2\ddot{\theta}_2 \\
 &+ I_2\ddot{\theta}_2 + m_3(a_2^2\ddot{\theta}_2\sin^2\alpha_2 + 2l_2a_2\dot{\theta}_2\dot{\alpha}_2\cos\alpha_2 + a_2^2\dot{\theta}_2\alpha_2\sin\alpha_2\cos\alpha_2 + 2l_2a_2\dot{\theta}_2\dot{\alpha}_2\cos\alpha_2 - 2l_2a_2\theta_2\alpha_2^2\sin\alpha_2) = 0 \\
 &2m(a_1^2\ddot{\alpha}_1 + l_1a_1\dot{\theta}_1\cos\alpha_1 - l_1a_1\dot{\theta}_1\alpha_1\sin\alpha_1 - a_1^2\dot{\theta}_1^2\sin\alpha_1\cos\alpha_1 + l_1a_1\dot{\theta}_1\alpha_1\sin\alpha_1 + ga_1\sin\alpha_1) = 0 \\
 &a_2^2\ddot{\alpha}_2 + 2l_2a_2\dot{\theta}_2\cos\alpha_2 - a_2^2\dot{\theta}_2^2\sin\alpha_2\cos\alpha_2 + ga_2\sin\alpha_2 = 0
 \end{aligned} \right\} (16)$$

4. 計算方法および計算例

求めた Lagrange の運動方程式に初期条件および適当な常数を与えて数値計算を行う。計算はオイラー

の方法に従い時間間隔を  $dt=0.02 \text{ sec}$  とした。計算例としては I. 片足接地のみ、すなわち、両足接地の時間が0で左右の脚が切替わる場合(8式), たとえば競歩のような状態, II. 片足接地, 両足接地, 片足接地と左右の脚が切替わる時に両足立脚の時間がある場合(8および13式), および III. 片足接地の状態での他の脚が前方に蹴り出され, 両足接地後直ちに重心を軸に捻転運動する場合(16および13式)の3通りを考えた。

計算に用いる常数は文献(7), (8)に従って, 身体の標準的な寸法と身体各部の質量比を求め, これを身長  $170\text{cm}$ , 体重  $60\text{kg}$  のヒトに適用して身体各部の質量を求める。これから  $m, \dots, m_3, M_1, M_2$  の質量および慣性モーメント  $I_1, I_2$  を計算すれば Table 1 のようになる。1分間の歩行を100歩とすれば1歩に要する時間は  $0.6 \text{ sec}$  となり, 腕の振れが正弦運動をすると仮定すれば, 腕の角速度は  $\omega = 5.24 \text{ rad/s}$  となる。ねじりのばね常数  $k_1, k_2$  は(8式)で  $\theta_1, \theta_2$  の位相が  $180^\circ$  になるように試行錯誤により求めた。

これらの諸元を用いて電算機によって計算した結果を Figs. 6~8 に示す。

Table 1 Body constants used in calculation

kg						kg · m · sec <sup>2</sup>		kg · m/rad.	
<i>m</i>	<i>m</i> <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	<i>M</i> <sub>1</sub>	<i>M</i> <sub>2</sub>	<i>I</i> <sub>1</sub>	<i>I</i> <sub>2</sub>	<i>k</i> <sub>1</sub>	<i>k</i> <sub>2</sub>
1.01	1.12	5.91	4.47	21.88	13.13	0.3459	0.1588	32.0	7.0

5. 結果の考察

Fig. 6 は I. 片足接地の場合で, 横軸に時間, 縦

軸に角度をとっている。この場合は, 片足を軸として, 他足を僅かに浮かせたねじり振動であるが, 腕の

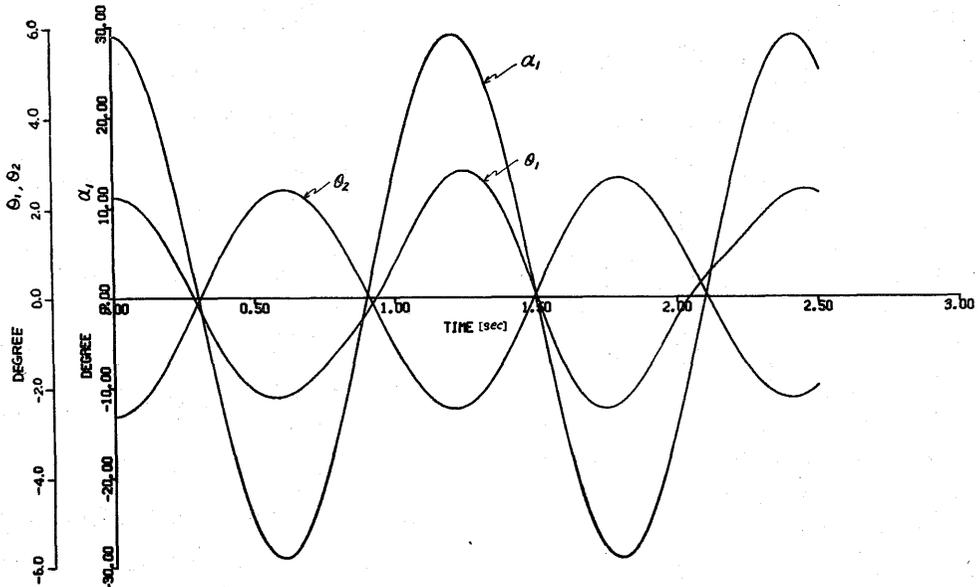


Fig. 6 Swing diagram of case I

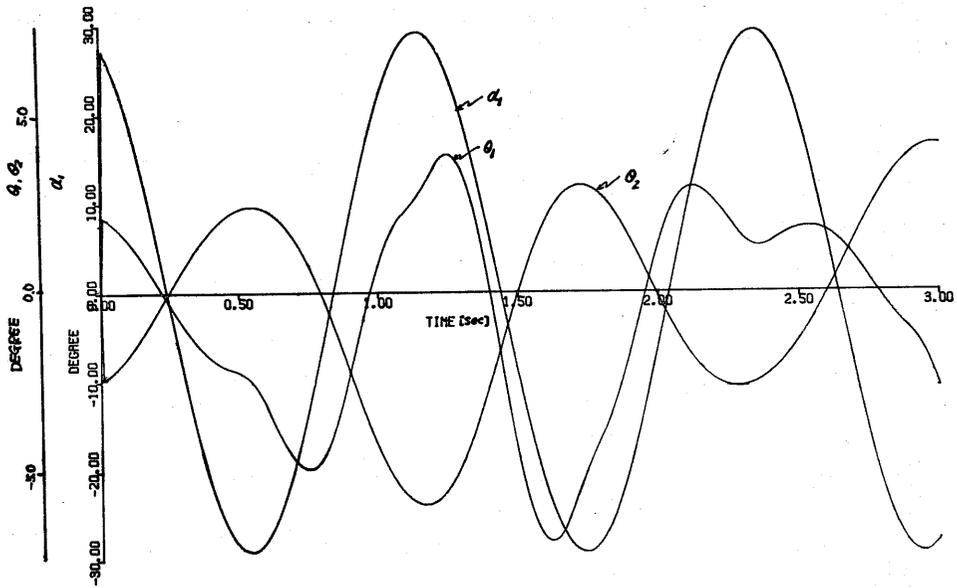


Fig. 7 Swing diagram of case II

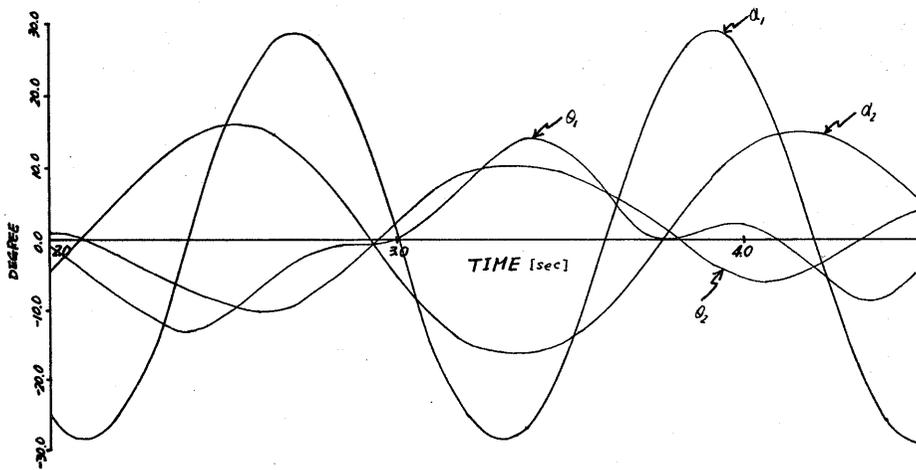


Fig. 8 Swing diagram of case III

振りと肩部、腰部の振りがよく一致している。肩部と腰部のねじれは互に逆方向で肩部の方がよく回転している。

Fig. 7 は II. の両足接地の期間が存在する場合である。歩行を連続させるためには片足接地・両足接地・片足接地と繰返される時間が問題である。すなわち、片足から両足へ、両足から片足への切換え時間を設定する必要がある。前報告<sup>6)</sup>から考えれば1歩の時間が0.6 sec の場合は、両足接地の時間は0.12 sec となる。これを腕の振りに対応させると、最大振り角(27.58°)の前後の0.06 sec である。

Fig. 7 からわかるように、この場合も肩部の振れに多少乱れはあるが腕の振りと肩部、腰部の回転は大

体よい一致をみている。

Fig. 8 は III. 片足接地・他足蹴出しの場合である。両足接地の切換え時間は II. の場合と同様である。この場合も腕の振りと脚の振りは良い一致を示し腕の振りによって脚が蹴り出される状態が理解できる。腰部の回転運動も円滑で大体よいが、肩部の回転は II. の場合より一層の乱れを示している。これは大きな質量をもつ下半身の捻転運動の影響が軽い上半身に敏感に反応しているためと考えられる。

以上3通りの形式についての計算は人体を基準にとった数値を用いて、いくつかの仮定に立って行なったものであるが、計算結果は腕の振りが脚の運動に及ぼす影響を矛盾なく説明できるようである。

義足の製作の際は円滑な運動が得られるように、人体の数値にこだわらないで質量を選択できる便利さがある。今後は、上記の仮定をさらに現実の状態に近づけて検討する必要があり、その結果をヒトの歩行現象に一層近づけうる見通しができた。

今回は水平面内の回転運動のみであったために、上下方向の踏力、および前後方向の蹴力がなく、したがってヒトの歩行における  $\xi$  および  $\zeta$  線図との比較を行なうことができなかった。

## 6. 結 論

腕の振りが歩行に及ぼす影響を調査する目的で、歩行モデルを考え、力学的解析を行なった。解析結果を I. 片足接地・片足接地, II. 片足接地・両足接地・片足接地, III. 片足接地と蹴出し・両足接地・片足接地と蹴出しの3通りの形式について平均的な人体の常数を用い、数値計算を行ない次のような結果を得た。

- (1) 腕の振りとう肩部、腰部の回転運動はよく対応している。
- (2) 腕の振りとう脚の蹴出しはよく同調しており、ヒトの歩行における腕の振りが脚の蹴出しに関係し、歩

行の補助運動になりうることが理解できる。

## 文 献

- (1) 武智, 明石; 義足 (昭43, 医学書院) .
- (2) たとえば, Komi, P. V. (ed.); Biomechanics V (1976, Univ. Park Press); 日本機械学会誌, 「人間の歩行と人工の足」特集号, 78巻676号 (昭50) .
- (3) P. R. Cavanagh; Pre-Print, First Intern. Sym. on Biomechanics of Sports (1976, Quebec, Canada).
- (4) T. Mataka; Proc. Fifth Intern. Congr. Biomechanics, p.426, (1976).
- (5) 真武; 長大工学部研究報告, 6号, P.1, (昭50) .
- (6) 真武, 今井, 波佐間, 山口; 長大工学部研究報告, 12号, p.1, (昭54) .
- (7) 長谷川光洋; 身体均整の科学, p. 59, (1961, 新星出版) .
- (8) 人間工学ハンドブック委員会; 人間工学ハンドブック, p. 279, (1976, 金原出版) .