

# 写真測量による人の歩行の3次元バイオメカニクス解析

Biomechanical 3-D Analysis of Human Walking Using Photogrammetry

鶴 岡 政 子\*・村 井 俊 治\*  
Masako TSURUOKA and Syunji MURAI

## 1. はじめに

近年、人間の運動を科学的にとらえようとするバイオメカニクス解析は医学、運動学、身体工学等多分野において大きな期待が寄せられている。しかし、立体空間で動いている対象を3次元測量するという課題がある。本報告では、2台の一般カメラをシンクロナイズさせることに成功し、ステレオ撮影による写真解析3次元計測システム (Bird Man System) を用いて身体に非接触にて時系列3次元解析値を得ることができ、次の4角度から連続した人の動きの3次元バイオメカニクス解析を試みることができた。

- 1) stick model picture による動きの form の解析
- 2) 身体の各部 (膝, 肘) の変位
- 3) 体重心の変位
- 4) エネルギー消費量

## 2. ステレオ写真測量による解析3次元計測

### 1) 原理と測量

図1のようにカメラ2台 (O<sub>1</sub>とO<sub>2</sub>) の前に被写体と標識 (基準点) を空間に配置し、各基準点の地上座標3D値 (X, Y, Z) を測量する。

2台のカメラ間の距離 (図1のB) と被写体までの距離HとのB/H比は精度を考慮して2/3から1/3になるようにし、被写体をオーバーラップ視できるように配置する<sup>1)</sup>。

被写体とカメラのレンズの中心とフィルム上の像は、一直線上になければならないという共線条件に基づき次のような式が得られる。

(X, Y, Z) を被写体の地上座標, (x, y) を写真座標, c をレンズの焦点距離, (X<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub>, Z<sub>0</sub>) をカメラレンズ中心位置, α, ω, κをそれぞれ X, Y, Z軸のまわりの回転角度とする。ΔX, Δyは残差とし, a<sub>ij</sub>を回転行列要素とする。

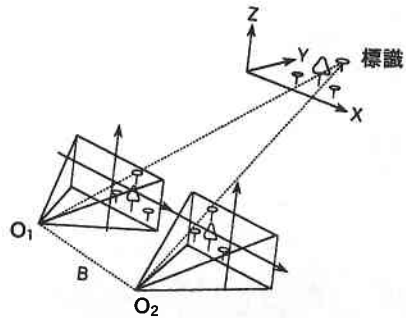


図1 ステレオ撮影の原理

$$x = c \frac{\alpha_{11}(X-X_0) + \alpha_{12}(Y-Y_0) + \alpha_{13}(Z-Z_0)}{\alpha_{31}(X-X_0) + \alpha_{32}(Y-Y_0) + \alpha_{33}(Z-Z_0)} + \Delta x \quad (1)$$

$$y = c \frac{\alpha_{21}(X-X_0) + \alpha_{22}(Y-Y_0) + \alpha_{23}(Z-Z_0)}{\alpha_{31}(X-X_0) + \alpha_{32}(Y-Y_0) + \alpha_{33}(Z-Z_0)} + \Delta y$$

$$R = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

基準点の写真測量をして、(1)式の条件式を用いれば未知変数である X<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub>, Z<sub>0</sub> および α, ω, κ を求めることができる。これらの未知変数が求まると(1)式の逆変換式によりステレオ写真上の1対の写真座標 (x, y) に対応する空間座標 (X, Y, Z) が求められる。

\*東京大学生産技術研究所 第5部

## 研究速報

1台のカメラの未知変量は6個だから2台のカメラでは12個の未知変量を求める必要がある。概知座標1個につき共線条件式は2式得られるので概知座標は6個基本的に必要である。12個の未知数の近似値を最小2乗法を使って求める。(精度を上げるためには概知座標の数を増やし共線条件式の数を増やす。)本報告で利用したBird Man Systemはパーソナルコンピュータ、ステレオデジタイザーを利用してカメラのレンズデイスティオン等を考慮し、残差 $\Delta_x, \Delta_y$ をできるだけ小さくするキャリブレーションを行うことによって精度をあげることで非測定用カメラを利用した3次元写真測量を可能にしている。

## 2) 身体計測点

Martinの身体計測点<sup>2)</sup>を参考にして人体にレオタードの上や、直接体表にマークシールを貼った。運動歴(ダンス)ある人(写真1)とない人(写真2)を被験

者とし、共に性別(女)、年齢(22才)、身長(157cm)、体重(47kg)は同じである。基準点のボールの中での歩行の連続撮影を行った。

## 3. 人の動きの3次元バイオメカニクス解析

## 1) stick model picture による歩行のform 比較結果

3次元解析値より正面から見た(カメラ位置)図と視点を90度回転した側面図を作成した。左右交互に繰り返す一連の同じ動きの中から左脚を振り上げる部分(重心の鉛直方向変位図の矢印の部分)の動きを表したものである。

## a. 頭の動き

カメラに向かった正面からは把握できなかったが側面図を見ると運動歴のない人(図2下段)はある人(図2上段)と比べて前傾しており体の奥行き方向のバランスを悪くした歩行となっている。

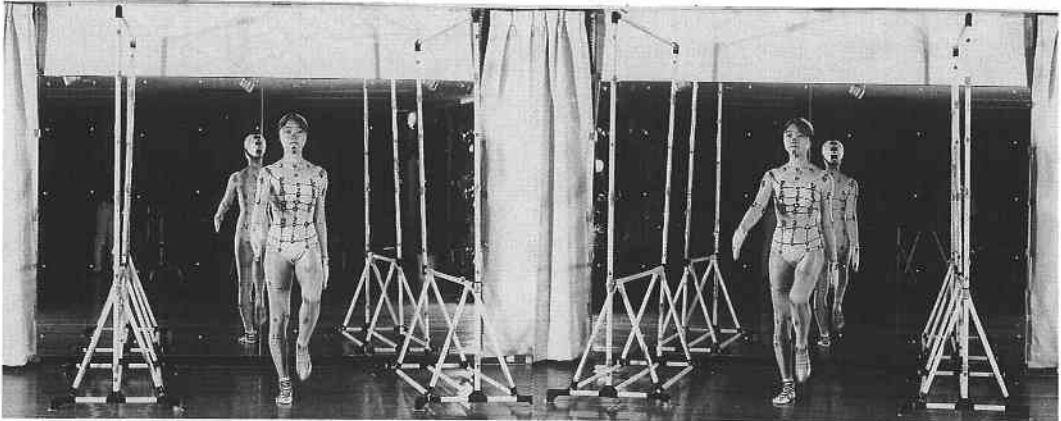


写真1 ステレオ写真  
運動歴のある人の歩行

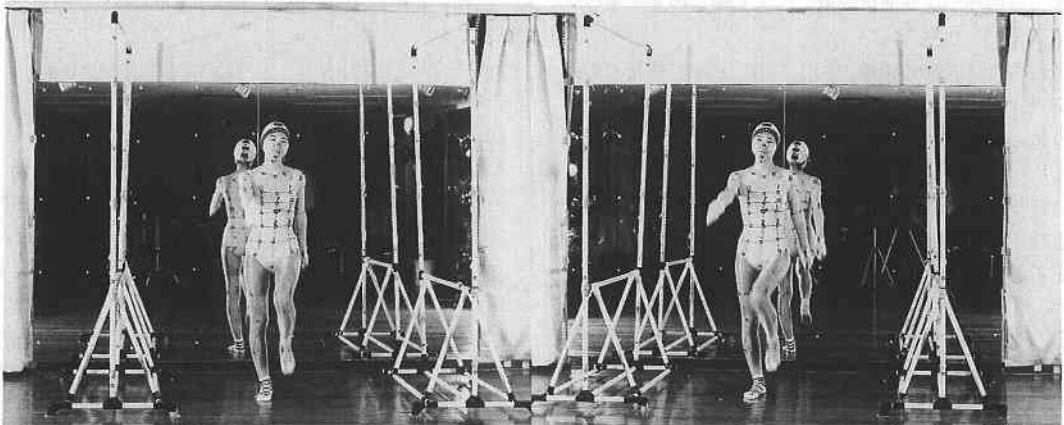


写真2 ステレオ写真  
運動歴のない人の歩行

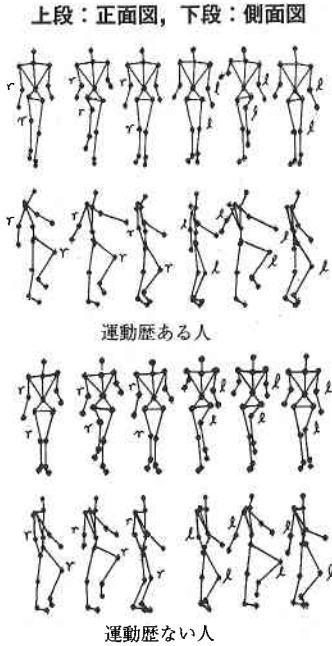


図2 stick model picture

b. 腕と脚の動き

正面図を見ると左右の前腕，上腕，下腿，上腿の長さが違い，また次の図で違う長さになっているのは側面図で見ると腕，脚を体の前後に動かしているため投影された図では長短となって現われる．また左右どちらが体の前なのか後ろなのかの区別も正面，側面図があるため観察できる．運動歴のある人は脚の動きと腕の動きのタイミングが滑らかである．

2) 身体各部 (膝，肘) の変位

歩行においては膝，肘の時系列 3 次元空間での位置変化 (変位という) が重要な因子である．床面に対して水平方向と，鉛直方向，そして身体の前後の奥行き方向の 3 方向うとした．

a. 右膝の変位

図3上段を見ると水平方向の変位は運動歴のある人の方が振幅が小さい．鉛直方向，奥行き方向，共に振幅が滑らかかつ同じ大きさを繰り返している．

b. 右肘の変位

水平方向の振幅は右膝とは反対に運動歴ある人 (図4上) は振幅がやや大きい．これは骨盤の回旋の動きに拮抗して滑らかな歩行を助長する上肢の動きと思われる．鉛直の方向，奥行き方向の変位は運動歴ある人の方が振幅が小さく，滑らかで回数が多い．

3) 体重心の変位<sup>4)</sup>

歩行運動は前述の膝，肘，そして身体各部の運動が<sup>3</sup>

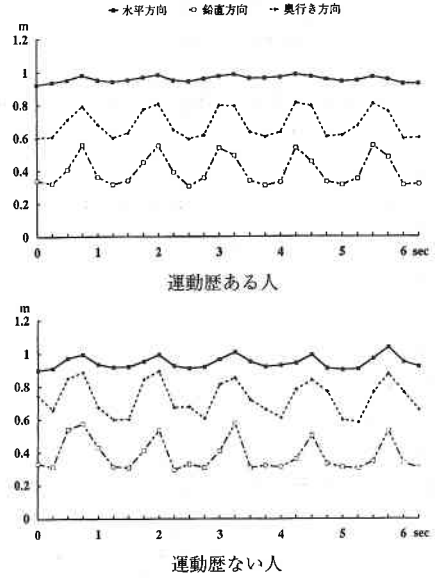


図3 右膝の動き

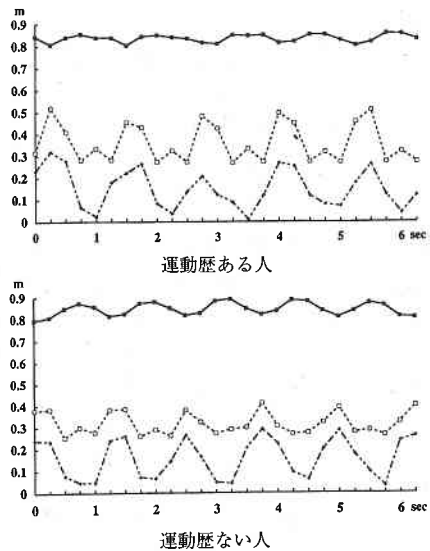


図4 右肘の動き

次元空間で同時に重なりあう複雑な現象であり，その観察分析は複雑なものとなる．そこで身体を左右脚，下腿，上腿，前腕，上腕，体幹 (腹，胸，頭を含む) の各 segment に分けて連結された剛体とみなし体重心の動きから解析を試みた．

重力加速度  $g$ ，segment  $i$  の質量  $m_i$ ，segment  $i$  に働く力  $f_i$ ，身体全体に働く力  $f$  とすると次式が成立する．

$$f_i = m_i g, \quad F = \sum_{i=1}^n m_i g$$

研究速報

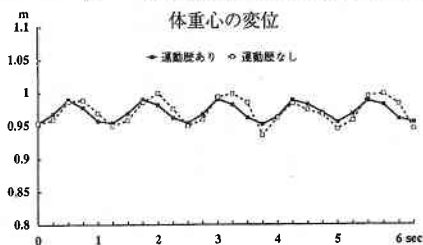


図5 水平方向

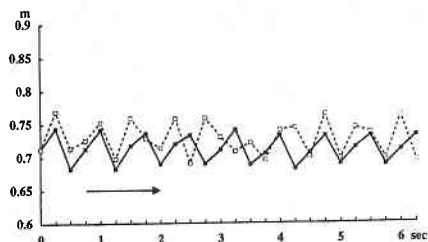


図6 鉛直方向

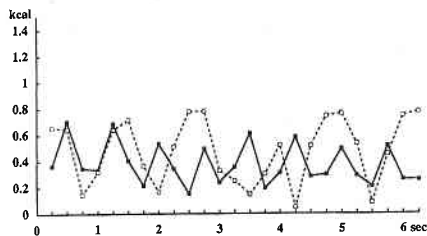


図7 消費エネルギーの変化

各 segment に働く力は重力なので平行力とみなしてよく、したがって全 segment に働く合力の大きさは、

$F = \sum_{i=1}^n f_i$  で表せる。segment  $i$  の重心の作用点座標を  $(x_i, y_i, z_i)$ 、体重心の作用点座標を  $(XG, YG, ZG)$  とすると  $g$  を考えなくてよく、したがって、次式により体重心が求められることになる。

$$XG = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad YG = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i},$$

$$ZG = \frac{\sum_{i=1}^n m_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$$

a. 水平方向の変位

運動歴ない人(図5)は振幅に乱れがあり、滑らかさが持続しない。

b. 鉛直方向の変位

運動歴ある人(図6)は同じ振幅を繰り返しているが運動歴ない人は振幅が大きくなったり、小さくなったりしてかつ、滑らかさは欠ける。

4) エネルギー消費量<sup>3)</sup>

安静状態時のエネルギー基礎代謝消費量と比べて歩行運動時の消費量は4倍消費されると言われている。歩行速度を  $V$  km/h 消費エネルギーを  $C$  kcal とすると次式が成立する。

$$C = 0.8V + 0.5$$

そこで体重心の鉛直方向の変位から速度変化(鉛直方向)を求めて上式に代入し、エネルギー消費量変化をみると図7のようになった。運動歴ある人とない人を比較するとない人の消費量はある人を大きく上まわったり、かなり少なくなったりその振幅の変化が著しい動きとなっている。運動歴ある人は比較的同じ消費量で持続した動きとなっている。

4. 考 察

写真測量により人の連続した動きを非接触による3次元測定ができることから運動歴ある人の歩行とない人の歩行のバイオメカニクス解析比較<sup>5)</sup>を行うと空間内で運動歴ある人の方が比較的円滑で、かつ規則性を持ち、エネルギー消費の面からも効率の良い持久生のある動きをしているという科学的な有意義な情報が得られた。日常の動作では筋肉は本来持つ力の約30%の力を使っていると言われている。従い身体の関節の最大トルクを求めることでリハビリテーションの計画を構築することに期待が持てる。また3D digital 値を使い複雑な各関節の動きの関連性をスペクトル解析等により解明することも可能と思われる。

5. 謝 辞

写真測量3次元解析プログラム Bird Man System 利用にあたっては建設省国土地理院の小井土今朝巳氏に、身体の動きに関しては慶応大学医学部森英二氏に懇切なる助言、指導等、ご協力を頂いたことを感謝致します。

(1992年12月8日)

参 考 文 献

- 1) 日本写真測量学会：解析写真測量改訂版，1983。
- 2) 中尾喜保：生体の観察，メジカルフレンド社，1988。
- 3) 中村隆一，斉藤 宏氏：基礎運動学 3 版，医歯薬出版，1987。
- 4) 鶴岡政子，村井俊治，和田孝雄：“人の動きの写真測量解析”，写真測量とリモートセンシング，Vol. 31, No. 1 (1992)，pp. 40-49
- 5) 鶴岡政子，村井俊治，和田孝雄：“ミラーを利用した写真測量による人の動きのバイオメカニクス解析”，日本写真測量学会平成4年度年次学術講演論文集 (1992)，pp. 127-132。