

立体写真法による人間歩行の解析

加藤厚生

An Analysis of Human Gait by Stereo Photograph

KATO Atuo

二足歩行機械を研究開発する過程で、大きな示唆を与えてくれる人間の歩行については、さまざまな方法で研究がなされている。^{1),2)}

本論文では、その一方法として、立体写真法を用いた歩行測定とその結果の解析について述べる。

序文

自から移動することのできる機械、「移動機械」の研究開発において、もっとも興味ある対象は二足歩行機械である。

この二足歩行機械の実現への過程で、二足歩行生物の一典形である人間の歩行から、学ぶところは大きい。

筆者は、この小論のなかで、本来動的で、外因や、心理的要因の影響を受け易い人間の歩行を、比較的乱さずに測定できる手法として、立体写真法について述べ、この手法によって得られた解析結果を示す。

立体写真法

立体写真を撮影するためには、一般に図1に示すように、同一水平面内に置いた二台のカメラを用い、角度 α

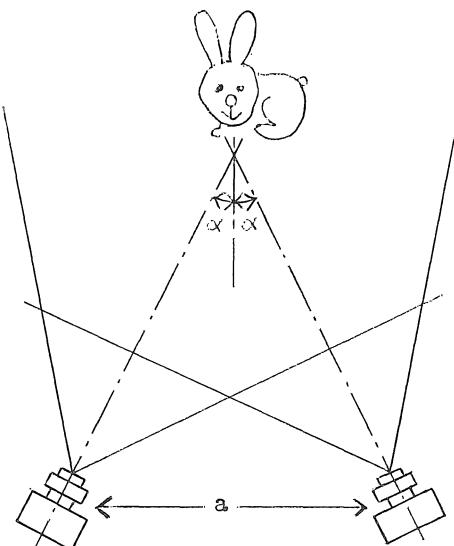


図1 立体写真撮影方

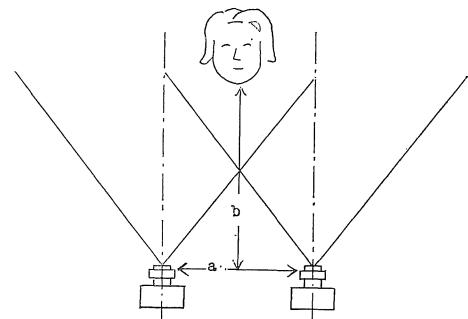


図2 よく使われる立体写真撮影方

を適当に選定する方法がとられている。

よく用いられる方法は、図2のように、 $\alpha=0$ とする方法である。

この方法は、カメラの設定が、比較的容易で、再生像の立体感も自然であって、市販システムもよく整っている。

立体写真では、一般に被写体の再生像位置精度は、図2のa, bによってきまり、bを大きくとりたい場合、aも大きくしなければ精度が悪くなる。

ところが、図2の方法では、aを大きくすると、二台のカメラの共通被写界が狭くなり、狭い室内で、大きな移動動作をともなう歩行を撮影する場合のように、被写界を広くとり、しかも精度を高くしたい場合には、必ずしも適当な方法とは言えない。

筆者は、図3に示す条件の研究室内で、歩行の立体写真を撮影するため、 $\alpha=45^\circ$ にし $a=6000\text{mm}$, $b=3000\text{mm}$ として、約2000mmの共通被写界幅を得た。

$\alpha=45^\circ$ としたので、この方法を仮りに45°方式立体写真法と呼ぶこととした。

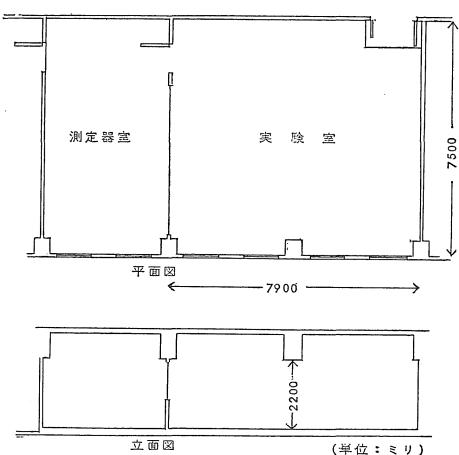


図3 実験に使用した研究室の寸法制限

45°方式立体写真法の原理

図4に位置関係を示す。

ここに, x , y , z は, 歩行台前縁中心部を原点 o とする直角座標,

X , Y , Z は,

$$\begin{cases} x=0 \\ y=-2(L+1) \sin\theta \\ z=0 \end{cases} \quad (\text{ただし } \theta=45^\circ)$$

を原点 \bar{o} とし, x 軸に対し θ° だけ回転した X 軸をもつ直角座標である。

x' , y' , z' 座標は, X , Y , Z 座標から, x , y , z 座標へ変換する過程で導入した直角座標である。

被験者は, 歩行台上を x 方向に進行し, 被験者に貼付けた被測点 $P(x, y, z) = P(X, Y, Z)$ は歩行台上空にある。

二台のカメラは X , Y , Z 座標内に設定され, 右カメラのフィルム面は, $Y-Z$ 面内に, 左カメラのフィルム面は, $X-Z$ 面内にある。

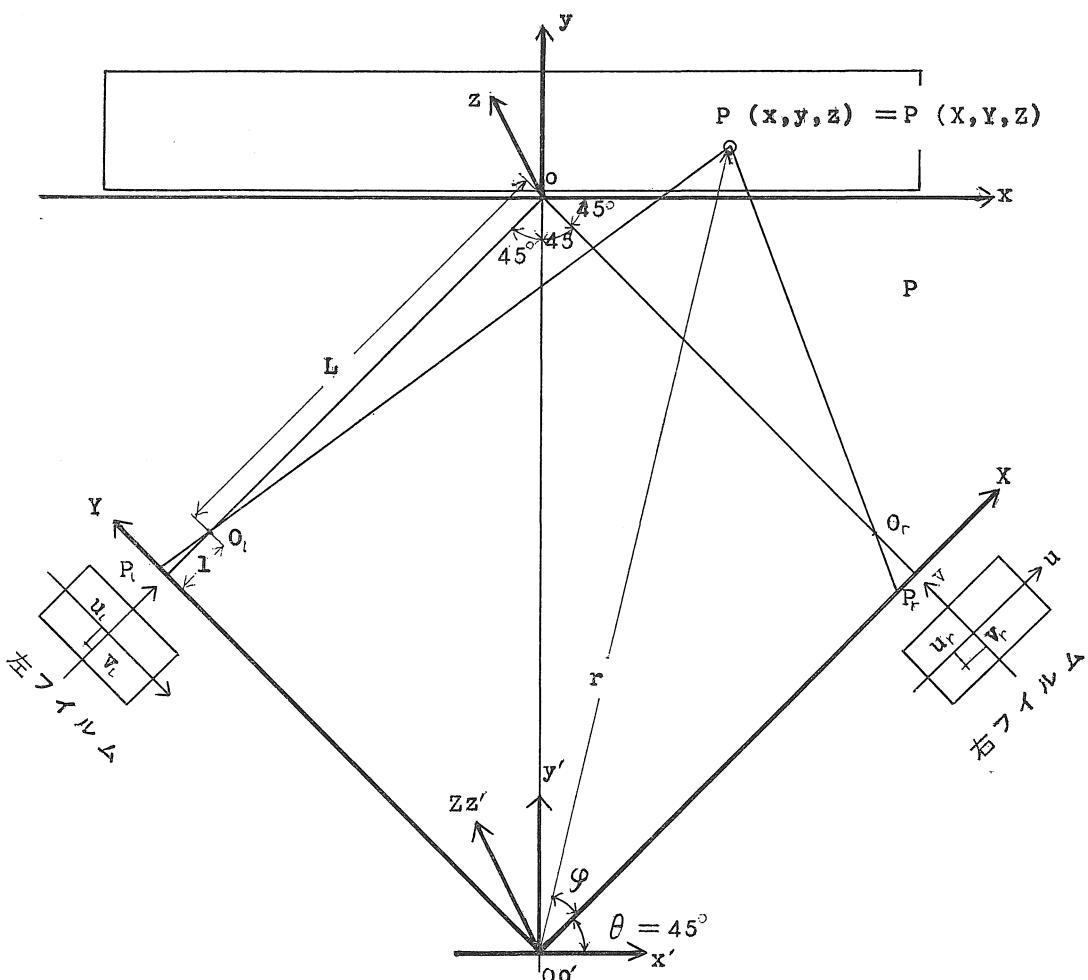
図4の X , Y , Z 座標において

図4 45°方式立体写真法の原理図

u_r は、右カメラのフィルム面中心から、被測点 P の
フィルム面上の像 P_r までの X 方向長さ。

u_1 は、左カメラのフィルム面中心から、被測点 P の
フィルム面上の像 P_1 までの Y 方向長さ。

v_r は、右カメラのフィルム面中心から、被測点 P の
フィルム面上の像 P_r までの Z 方向長さ。

v_1 は、左カメラのフィルム面中心から、被測点 P の
フィルム面上の像 P_1 までの Z 方向長さであ
る。

レンズ中心の高さを、左右のカメラ共 h とすると、
図中各点の座標は、次のように表わされる。

右カメラのレンズ中心座標

$$O_r (X, Y, Z) = O_r (L+1, 1, h)$$

左カメラのレンズ中心座標

$$O_1 (X, Y, Z) = O_1 (1, L+1, h)$$

右カメラのフィルム上の像

$$P_r (X, Y, Z) = P_r (u_r + L+1, 0, h + v_r)$$

左カメラのフィルム上の像

$$P_1 (X, Y, Z) = P_1 (0, u_1 + L+1, h + v_1)$$

ここで、1 はレンズ中心からフィルム面中心までの距
離。

P (X, Y, Z) を求める。

点 O_r , P_r から決定される直線を、X-Y 面へ投影し
てできる直線の方程式は、

$$(1/u_r) X + Y - 1 (L+1+u_r)/u_r = 0 \quad ①$$

点 O_1 , P_1 から決定される直線を、X-Y 面へ投影し
てできる直線の方程式は、

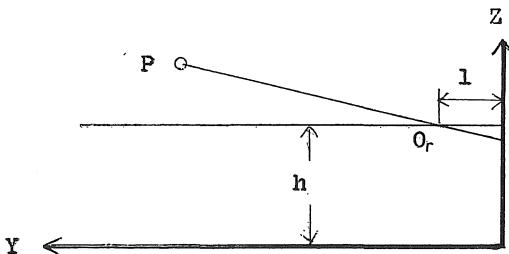
$$(u_1/1) X + Y - (L+1+u_1) = 0 \quad ②$$

①, ②式で表わされる二直線の交点の座標は、

$$X = \frac{1\{-u_r(L+u_r)+1(L+1)\}}{1^2-u_ru_1} \quad ③$$

$$Y = \frac{1\{-u_1(L+u_r)+1(L+1)\}}{1^2-u_ru_1} \quad ④$$

点 P (X, Y) を X, Y 座標上で極座標表現すれば、



(a) Y-Z面

$$P (X, Y) = P (r, \varphi) \quad ⑤$$

$$X = r \cos \varphi$$

$$Y = r \sin \varphi$$

x' , y' 座標上で極座標表示すれば、

$$P (x', y') = P (r, \varphi + \theta) \quad ⑥$$

$$x' = r \cos (\varphi + \theta) = X \cos \theta - Y \sin \theta$$

$$y' = r \sin (\varphi + \theta) = Y \cos \theta + X \sin \theta$$

さらに

$$x = x' \quad ⑦$$

$$y = y' - 2(L+1) \sin \theta \quad ⑧$$

として、x, y 座標へ平行移動する。

ここで、 $\theta = 45^\circ$ であるから

$$\sin \theta = \cos \theta = 1/\sqrt{2}$$

③, ④, ⑥, ⑦, ⑧式から

$$x = \frac{1L (u_1 - u_r)}{\sqrt{2} (1^2 - u_r u_1)} \quad ⑨$$

$$y = \frac{2L u_r u_1 - 1L (u_r + u_1)}{\sqrt{2} (1^2 - u_r u_1)} \quad ⑩$$

となる。

次に Z を求める。

図5 (a) は、Y-Z 面を、(b) は、X-Z 面を表わす。

図5 (a) において、直線 $P-O_r$ の方程式は、

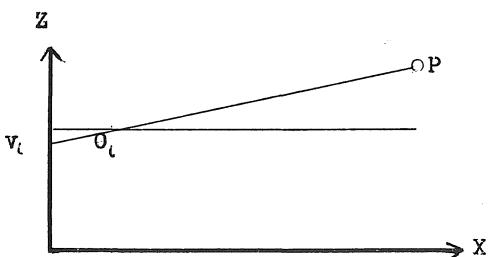
$$Z_r = -\frac{v_r}{1} Y + (h + v_r) \quad ⑪$$

図5 (b) において、直線 $P-O_1$ の方程式は、

$$Z_1 = -\frac{v_1}{1} X + (h + v_1) \quad ⑫$$

となる。

一方、図6 (a) に示すように、x-y 面内の点 p (x, y) 上に単位長の垂線を立てた場合、右カメラのレンズ
中心 O_r から見た垂線の長さ h_r は、p- O_r の距離に反



(b) X-Z面

図5 測定原理の立面図

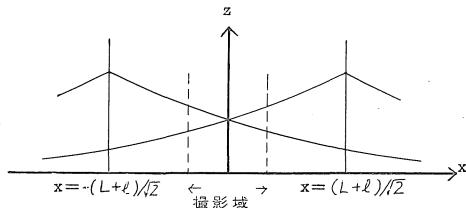
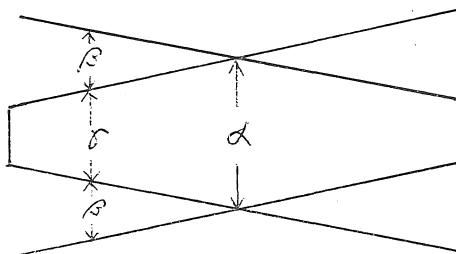


図6 カメラからの距離による収れん



$$d = \frac{2d + 2f}{2}$$

図7 左右カメラによる収れんの補正

比例し、次式で表わされる。

$$h_r = k / \sqrt{(a-x)^2 + (a+y)^2} \quad (13)$$

ただし、 k は比例定数

同様にして、左カメラのレンズ中心から見た単位長垂線の長さ h_1 は、

$$h_1 = k / \sqrt{(a+x)^2 + (a+y)^2} \quad (14)$$

したがって、 y を固定して、 x を $-\infty$ から $+\infty$ へ移動すると、左・右カメラからの見掛けの単位垂線長は、図6 (b) のように、 x の逆数関数として零に収れんする。

撮影可能域では、この収れんを線形とみなせば、図7 に示す関係から

$$\begin{aligned} z = Z &= \frac{z_1 + z_r}{2} = -\frac{v_r Y + v_1 X}{2l} + \frac{v_r + v_1}{2} + h \\ &= \frac{L \{ (v_r u_1 + v_1 u_r) - (v_r l + v_1 l) \}}{2 (l^2 - u_r u_1)} + h \end{aligned} \quad (15)$$

⑨、⑩、⑪式を用い、 u_r, u_1, v_r, v_1 から点 P の x, y, z 座標上の位置を算出できる。

誤差について

$$x = f_1 (u_r, u_1, L, l, \theta) \quad (16)$$

$$y = f_2 (u_r, u_1, L, l, \theta) \quad (17)$$

$$z = f_3 (v_r, v_1, u_r, u_1, L, l, \theta, h) \quad (18)$$

であって、 x, y, z に含まれる誤差は、それぞれ次式で示される。

$$\begin{aligned} dx &= \frac{\partial x}{\partial u_r} du_r + \frac{\partial x}{\partial u_1} du_1 \\ &+ \frac{\partial x}{\partial L} dL + \frac{\partial x}{\partial l} dl + \frac{\partial x}{\partial \theta} d\theta \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} dy &= \frac{\partial y}{\partial u_r} du_r + \frac{\partial y}{\partial u_1} du_1 \\ &+ \frac{\partial y}{\partial L} dL + \frac{\partial y}{\partial l} dl + \frac{\partial y}{\partial \theta} d\theta \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} dz &= \frac{\partial z}{\partial v_r} dv_r + \frac{\partial z}{\partial v_1} dv_1 + \frac{\partial z}{\partial u_r} du_r + \frac{\partial z}{\partial u_1} du_1 \\ &+ \frac{\partial z}{\partial L} dL + \frac{\partial z}{\partial l} dl + \frac{\partial z}{\partial \theta} d\theta + \frac{\partial z}{\partial h} dh \end{aligned} \quad (21)$$

ここに、 $dL, dl, d\theta, dh$ は、カメラ設定誤差であり計算結果中に系統的な誤差として現われるから、適当な修正を加えることによって、計算上、この誤差による影響を減少することができる。

dv_r, dv_1, du_r, du_1 は、フィルムの読み取り誤差である。フィルムの伸縮による誤差もここに含まれるが、伸縮による誤差は、系統的な誤差として、適当な修正により減少することが可能である。

結局、修正不能なフィルム読み取り誤差によってもたらされる dx, dy, dz は、それぞれ次のようになる。

$$dx = \frac{\partial x}{\partial u_r} du_r + \frac{\partial x}{\partial u_1} du_1 \quad (22)$$

ただし、

$$\frac{\partial x}{\partial u_r} = \frac{-lL (l^2 - u_1^2)}{\sqrt{\frac{2}{2} (l^2 - u_r u_1)^2}} \quad (23)$$

$$\frac{\partial x}{\partial u_1} = \frac{lL (l^2 - u_r^2)}{\sqrt{\frac{2}{2} (l^2 - u_r u_1)^2}} \quad (24)$$

$$dy = \frac{\partial y}{\partial u_r} du_r + \frac{\partial y}{\partial u_1} du_1 \quad (25)$$

ただし、

$$\frac{\partial y}{\partial u_r} = \frac{Ll (2lu_1 - u_1^2 - l^2)}{\sqrt{\frac{2}{2} (l^2 - u_r u_1)^2}} \quad (26)$$

$$\frac{\partial y}{\partial u_1} = \frac{Ll (2lu_r - u_r^2 - l^2)}{\sqrt{\frac{2}{2} (l^2 - u_r u_1)^2}} \quad (27)$$

$$dz = \frac{\partial z}{\partial v_r} dv_r + \frac{\partial z}{\partial v_1} dv_1 + \frac{\partial z}{\partial u_r} du_r + \frac{\partial z}{\partial u_1} du_1 \quad (28)$$

ただし、

$$\frac{\partial z}{\partial v_r} = \frac{-L (u_1 + l)}{2 (l^2 - u_r u_1)} \quad (29)$$

$$\frac{\partial z}{\partial v_1} = \frac{L (u_r - 1)}{2 (l^2 - u_r u_1)} \quad (30)$$

$$\frac{\partial z}{\partial u_r} = \frac{L_1 (v_1 l - v_r u_1) + L u_1 (v_r u_1 - v_1 l)}{2 (l^2 - u_r u_1)^2} \quad (31)$$

$$\frac{\partial z}{\partial u_1} = \frac{L_1 (v_r l - v_r u_r) + L u_r (v_1 u_r - v_1 l)}{2 (l^2 - u_r u_1)^2} \quad (32)$$

測定に使用した各数値は、次のとおり。

$$L = 3972\text{mm}$$

$$l = 100\text{mm}$$

$$h = 950\text{mm}$$

したがって⑨, ⑩, ⑪式から

$$x = 280863 - \frac{u_1 - u_r}{10000 - u_r u_1} \quad (33)$$

$$y = 5617.26 - \frac{u_r u_1 - 50 (u_r + u_1)}{10000 - u_r u_1} \quad (34)$$

$$z = \frac{1986.00 \{(-v_r u_1 + v_1 u_r) - 100(v_r + v_1)\}}{10000 - u_r u_1} + 950 \quad (35)$$

となる。

$v_r = v_1 = u_r = u_1 = 0$ のとき

⑨, ⑩, ⑪, ⑫, ⑬, ⑭, ⑮, ⑯式から⑨, ⑩, ⑪式は、それぞれ次のようになる。

$$dx = 28.09du_r + 28.09du_1 \quad (36)$$

$$dy = -28.09du_r - 28.09du_1 \quad (37)$$

$$dz = -19.86dv_r - 19.86dv_1 + 0.du_r + 0.du_1 \quad (38)$$

すなわち、 dx , dy , dz をそれぞれ1mm以内にするには、 x , y , z 座標の原点付近でも

du_r , du_1 を約 $1/60\text{mm}$

dv_r , dv_1 を約 $1/40\text{mm}$

まで読取らねばならない。

45°方式立体写真法による歩行中の体重心の測定

人間の身体各部の全体重に対する比率と、各部毎の重心位置を表1に示す。

ここに重心位置は、各部の長軸長の中軸端から重心までの距離の長軸長に対する割合である。

この配分表を用いると、各関節の x , y , z 座標上の位置がわかれれば、体重心位置を算出することができる。

身体各部の x , y , z 座標を次のように表わす。

- (1) 首の重心位置 $P_1 (x_1(t), y_1(t), z_1(t))$
- (2) 頭部関節中心 $P_2 (x_2(t), y_2(t), z_2(t))$
- (3) 右肩関節中心 $P_3 (x_3(t), y_3(t), z_3(t))$
- (4) 右ひじ関節中心 $P_4 (x_4(t), y_4(t), z_4(t))$
- (5) 右手くび関節中心 $P_5 (x_5(t), y_5(t), z_5(t))$

表1 身体各部の質量比および重心位置
質量比重心位置

	質量比	重心位置
頭	0. 044	0, 63
首	0. 029	0. 50
胸	0. 488	0. 52
上 腕	0. 028	0. 46
前 腕	0. 028	0. 41
手	0. 015	0. 50
大 腿	0. 194	0. 42
下 腿	0. 117	0. 41
足	0. 035	0. 50

(松井秀次による)

(6) 右大腿関節中心 $P_6 (x_6(t), y_6(t), z_6(t))$

(7) 右ひざ関節中心 $P_7 (x_7(t), y_7(t), z_7(t))$

(8) 右くるぶし関節中心 $P_8 (x_8(t), y_8(t), z_8(t))$

(9) へその高さでの胴体中心

$$P_9 (x_9(t), y_9(t), z_9(t))$$

上記 P_i 点近傍の体表皮上に P_i' 点をとると P_i 点の座標はそれぞれ

$$P_i (x_i(t) + l_{x_i}, y_i(t) - l_{y_i}, z_i(t) + l_{z_i})$$

ただし、 $i = 1, 2, \dots, 9$

l_x, l_y, l_z は、関節中心から表皮までの距離。

通常の歩行時において、身体長軸の垂直軸まわりの回転を無視し、かつ、 $l_{x_i} = l_{z_i} = 0$ とすれば、 P_i 点はそれぞれ次のようになる。

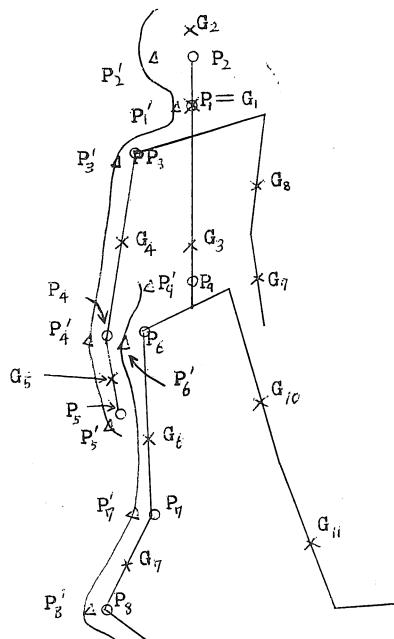


図8 関接点、被測点、重心

$$P_i (x_i(t), y_i(t) - ly_i, z_i(t))$$

P_i 点を被測点とする。

以上の位置関係を図 8, 一例を写真 1 に示す。重心の座標は、それぞれ次のようになる。

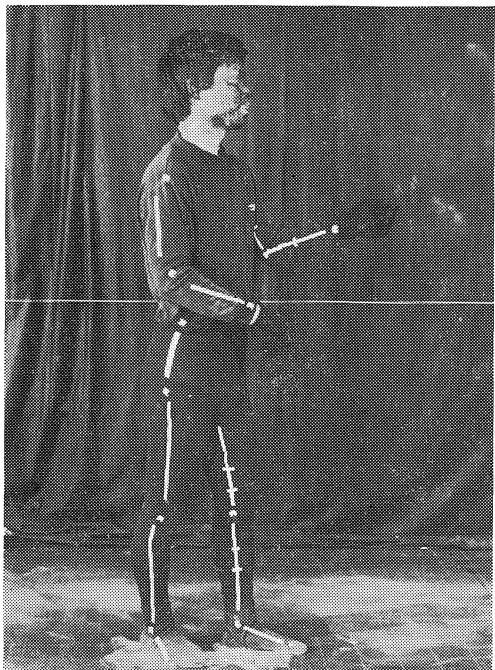


写真 1 被験者 T

$$x_i = x_i(t), y_i = y_i(t), z_i = z_i(t)$$

とおくと。

$$G_1 (x, y, z) = G_1 (x_1, y_1 - ly_1, z_1) \quad (39)$$

$$G_2 (x, y, z) = G_2 (x_2, y_2 - ly_2, z_2 + c_{22}) \quad (40)$$

$$G_3 (x, y, z) = G_3 (x_1 - 0.52 (x_1 - x_9), \\ y_1 - 0.52 (y_1 - y_9), z_1 - c_{23} - 0.52 \\ (z_1 - c_{23} - z_9)) \quad (41)$$

$$G_4 (x, y, z) = G_4 (x_3 - 0.46 (x_3 - x_4), \\ y_3 - 0.46 (y_3 - y_4), z_3 - 0.46 (z_3 - z_4)) \quad (42)$$

$$G_5 (x, y, z) = G_5 (x_4 - 0.41 (x_4 - x_5), \\ y_4 - 0.41 (y_4 - y_5), z_4 - 0.41 (z_4 - z_5)) \quad (43)$$

$$G_6 (x, y, z) = G_6 (x_6 - 0.42 (x_6 - x_7), \\ y_7 - 0.42 (y_6 - y_7), z_7 - 0.42 (z_6 - z_7)) \quad (44)$$

$$G_7 (x, y, z) = G_7 (x_7 - 0.41 (x_7 - x_8), \\ y_7 - 0.41 (y_7 - y_8), z_7 - 0.41 (z_7 - z_8)) \quad (45)$$

$$G_8 (x, y, z) = G_4 (x(t - T/2), y(t - T/2), \\ z(t - T/2)) \quad (46)$$

$$G_9 (x, y, z) = G_5 (x(t - T/2), y(t - T/2), \\ z(t - T/2)) \quad (47)$$

$$G_{10} (x, y, z) = G_6 (x(t - T/2), y(t - T/2), \\ z(t - T/2)) \quad (48)$$

$$G_{11} (x, y, z) = G_7 (x(t - T/2), y(t - T/2), z(t - T/2)) \quad (49)$$

c は身体実測値, T は歩行周期

$$G_i (x_i, y_i, z_i) \text{ にある質量 } M_i$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

の合成重心座標 G_{jk} と合成質量 M_{jk} ($j \neq k$) は,

$$G_{jk} (x, y, z) = G_{jk} \left(\frac{M_k x_j + M_j x_k}{M_j + M_k}, \right.$$

$$\left. \frac{M_k y_j + M_j y_k}{M_j + M_k}, \frac{M_k z_j + M_j z_k}{M_j + M_k} \right) \quad (50)$$

$$M_{jk} = M_j + M_k. \quad (51)$$

この実験では, $n = 11$ であるから, 上の計算を 10 回繰り返せば, 全合成重心を求めることができる。

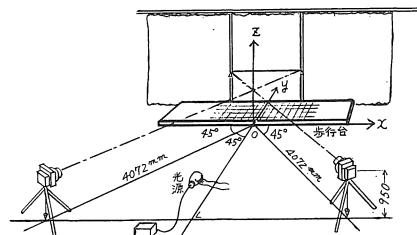


図 9 撮影装置の全体

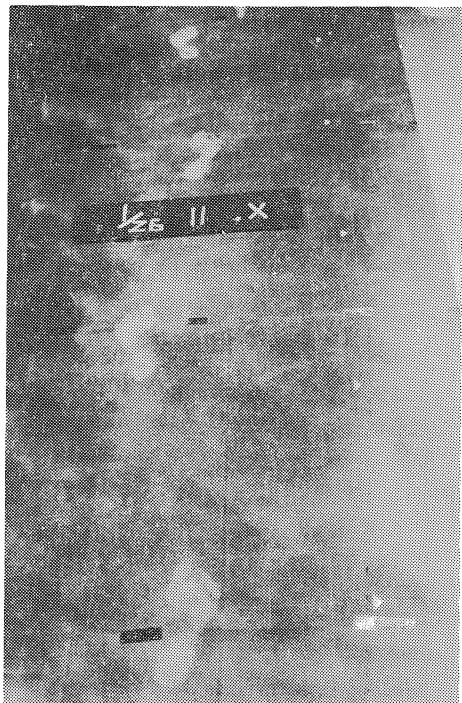


写真 5 ベビーパウダーによる足跡の記録

測定系の全構成図を図9に示す。被験者は、歩行台上をカメラから見て左から右へ歩き、被験者の体表面に貼付した蛍光反射板にマルチストロボフラッシュ光を照射し、反射光を撮影する。

マルチストロボは、20PPSで発光させた。

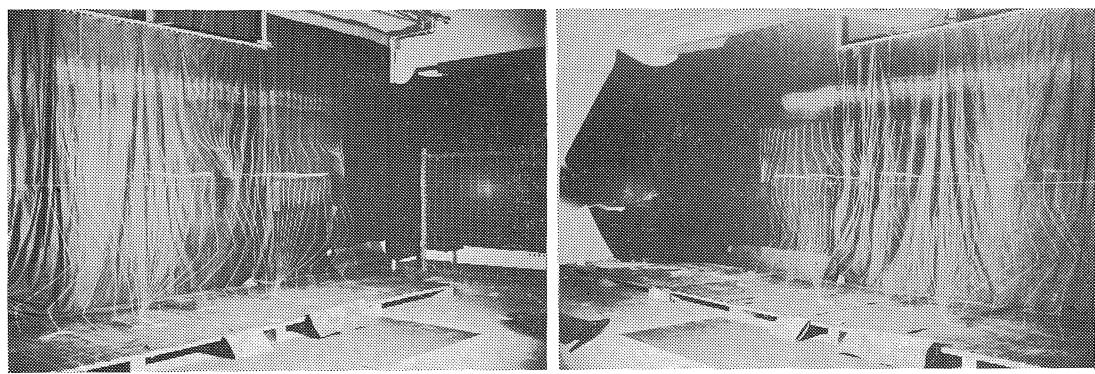
室内は暗黒状態にせず、多少の光を与えて被験者の心理的不安感の軽減を計った。

カメラは、 $f=100\text{mm}$ のレンズを装着したマミヤプレスを採用し、焦点は無限遠に合わせ、絞りを深くして焦点

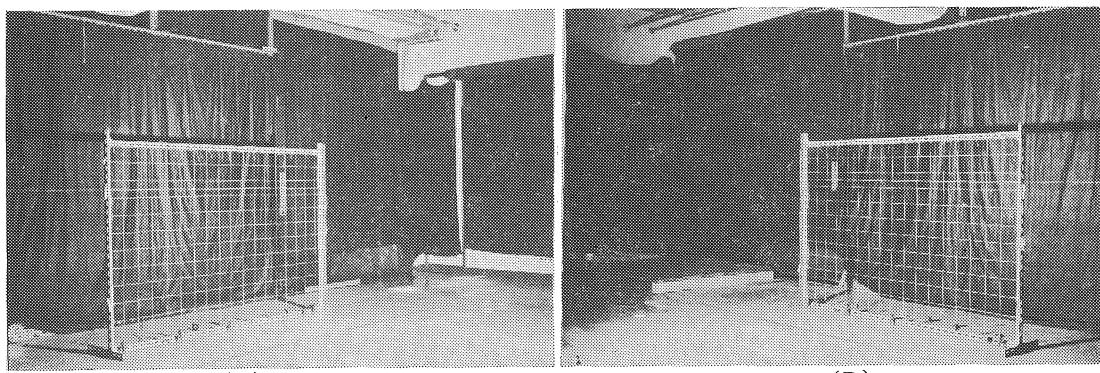
深度を大きくとった。

フィルムは、イルフォード ASA400 の 6×9 ロールフィルムを用い、増感現像した。撮影例を写真2 (R, L) に示す。R は右カメラ、L は左カメラによる撮影像である。

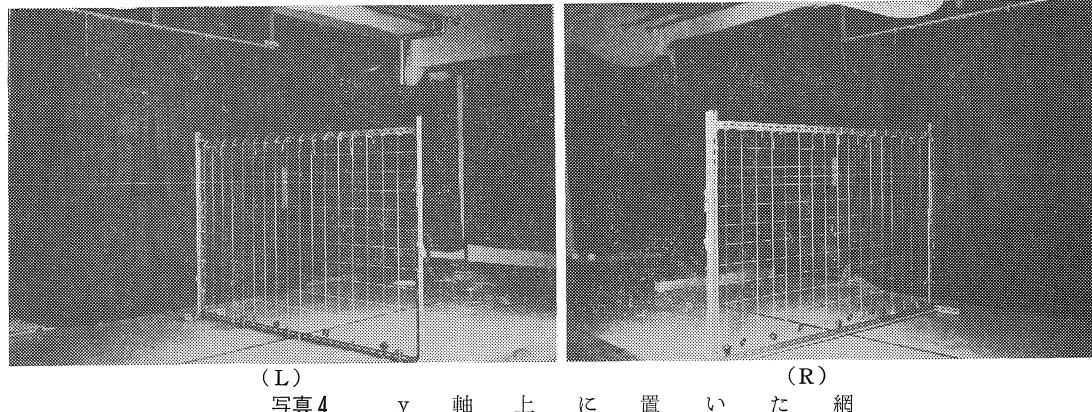
写真3 (R, L), 4 (R, L) は、この系の系統誤差を検出するため撮影した位置が正確に判明している被写体である。



(L) 写真2 歩行の撮影例 (R)



(L) 写真3 x軸に平行に置いた網 (R)



(L) 写真4 y軸上に置いた網 (R)

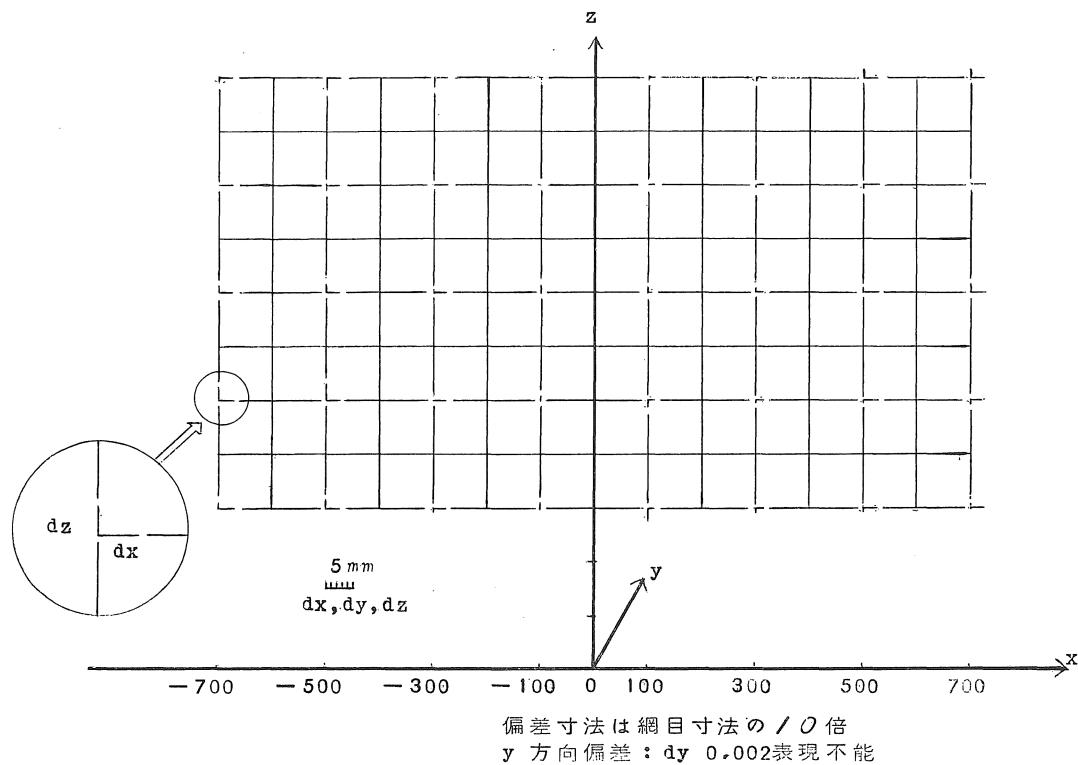


図10 網目についての偏差

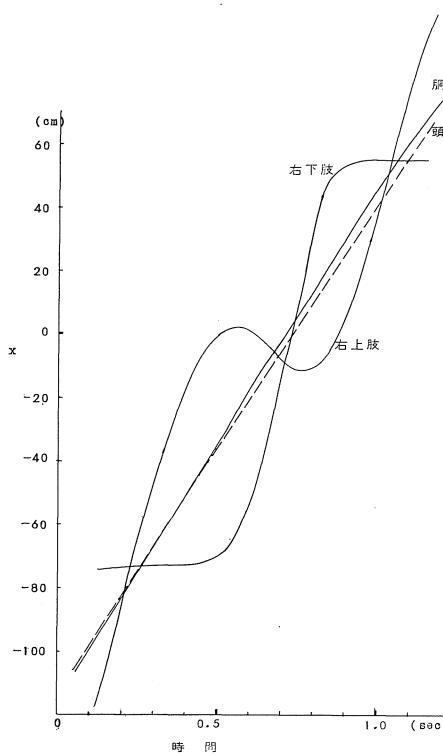


図11 重心の移動（x方向）

写真5は、歩行台上に残った足跡である。白色は、ペーパーウッドである。

結果および考察

網目（写真3）についての計算結果を、図10に示す。

図10は、x軸上に置いた網目の各交点での実位置との偏差を、網目寸法の10倍の尺度で表示してある。

これによるとx方向偏差 dx 、z方向偏差 dz はそれぞれ $\pm 3\text{mm}$ 以内に納まっており、一般に $dz < dx$ の傾向がある。

またy方向偏差 dy は $dy \leq 0.002$ であり、図10には

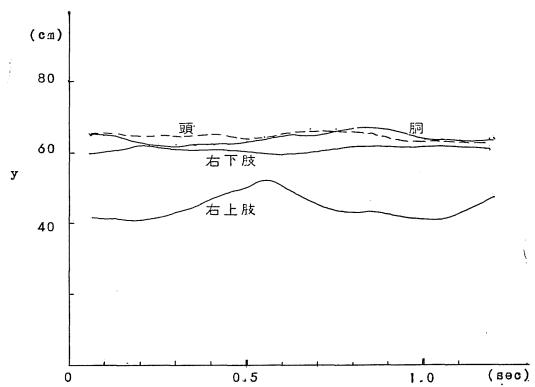


図12 重心の移動（y方向）

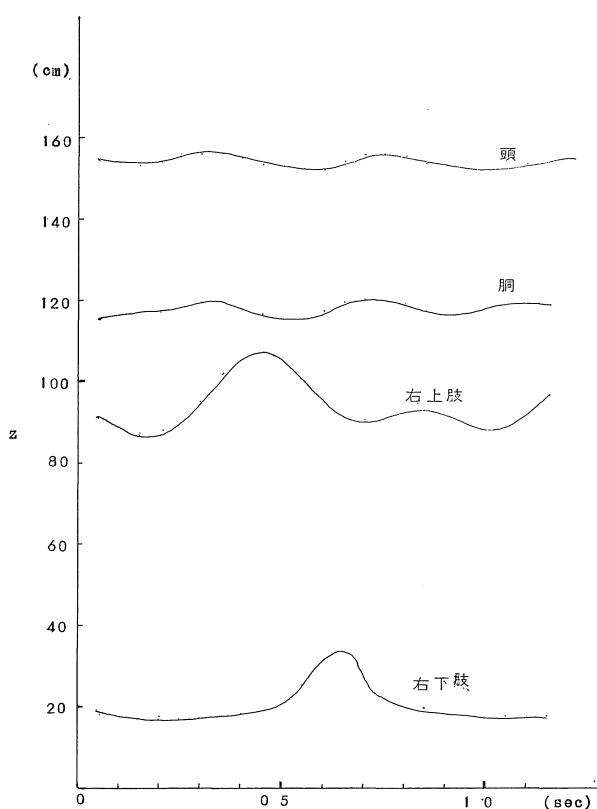


図13 重心の移動 (z方向)

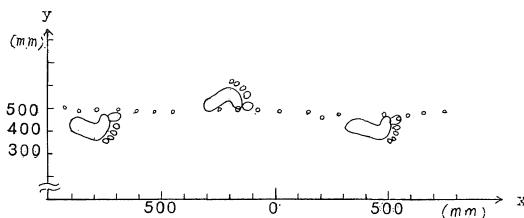


図14 45°方式立体写真法による歩行時の体重心移動

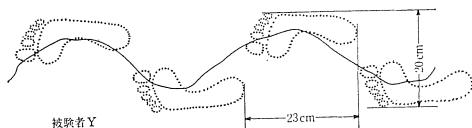


図15 フォースプレート法による歩行時の体重心移動¹⁾
表現していない。図11から、図13に算出した身体各部重心位置を時間関数として示す。

図14に、全合成重心位置の移動の様子を示す。足形は、写真5から描き移した。

図15に、フォースプレート法による体重心移動曲線を示す。¹⁾

図14と図15との間には明瞭な違いがある。それは、図15では体重心は足形の中を必ず通過しているが、図14では、ほとんど足形の中を通らない（三次元的には、足形の上を通らない）と言う違いである。これまでの、二足歩行機械には、片足立ちの時、着地している足形中の上方に体重心を置き、静的安定を計る観点から設計されたものがある。

図14は、この観点を根本的に修正することを要求している。

図14はまた、二足歩行が静的には不安定なものであることを示している。

結論

45°方式立体写真法の原理と実際の測定方法について述べた。

位置のわかっている網目と計算値との間には、ここに示した例ではまだ大きな差異がある。

左半身の動きは、右半身と正中線対称で半周期遅れであると仮定した、この仮定を実証するためには4台のカメラを使って歩行台の前後からの撮影をしなければならない。

1/20秒でサンプリングしたので、これより短時間の動きは読み取不能である。

被測定点の位置と関節位置との相互関係を厳密になし得ていない。

被験者が表1によく合致しているかどうか確認がない。など、実験的に不充分な点や、この方式の限界はあるが、体重心移動について一応の結論を得た。

ここで得た結果は、直観的にも充分納得できる結果である。

参考文献

- 1) 山下, 山田, 猪谷歩行の基礎的研究
バイオメカニズム
- 2) K. Tsuchiya, T. Aoyama, K. Matsuo & T. Kasahara
HUMAN LOCOMOTION STUDY USING
FOOT-PRINTS IN STATIONARY AND
TRANSIENT STATES
4th International Symposium on External
Control of Human Extremities