

人体の数値表現とその自動処理

Digital Representation of Human Body and its Automatic Processing

丸安 隆和*・村井 俊治*・栗原 京子*

Takakazu MARUYASU, Shunji MURAI and Kyoko KURIBARA

柔軟体である人体の複雑な動きを正確にとらえることは衣服構成など人間工学上の数多くの諸問題を解明するために不可欠の課題である。本研究ではまず最初に写真測量によって種々の運動時の人体の計測を正確に行ない、人体の情報を三次元空間座標をもつ点群としてデジタルな形で抽出した。つぎにこれらのデータをもとにして人体になめらかに連続する曲面をあてはめ計算機のなかに数値人体モデルをつくり出した。このモデルから各種運動時の人体の透視図および展開図を作成し、さらに人体表面積を求めることにより人体の動きを数値的かつ、視覚的にとらえて、人間工学上の基礎資料をつくり出そうとした。

まえがき

機能的で着心地がよくさらに美しい衣服を構成するためには、着衣基体である人体の動きをまず第一に解明しなければならない。しかるのちにこれらの結果を衣服構成に反映させることを考えるべきである。

しかしながら、現在のところ人体の形状そのものを正確に計測する技術が遅れているため、人体計測はきわめて簡略化された方法で行なわれ、しかも静的な状態でのいくつかの部位のみの計測にとどまっている。そのため従来の方法のみでは、柔軟体である人体の複雑な動きを面としてとらえることはきわめて困難である。

そこで本研究では、いろいろな動きをした状態の人体を写真測量によって三次元的な空間座標としてとらえ、これらのデータからコンピュータの中に滑らかに連続する三次曲面群で構成された数値人体モデル (Digital Body Model) をつくり出そうとした。このような数値人体モデルをつくり出すことにより、任意の角度から見た人体の姿をただちに立体透視図として自動的に描くことも可能であり、人体を三次元的に把握することもできる。

さらに、衣服構成の基礎資料を得るために、三次元的な人体の動きを、展開図上での動きとしてとらえようとした。人体展開図を作成することは人体の表面積の変化を求めることができるのみでなく、ある部位の動きが他の部位の変化にどのように影響しているかを見る上でもきわめて有効である。

以下に、写真測量とコンピュータを用いた人体の数値表現とその自動処理の方法とその応用例を示そう。

1. 写真測量による人体計測

(1) 人体測定点の配置

人体の動きをとらえるために、人体に縦横の線を描き、その線の動きを観察することが、試みられたことがあった。しかし、人体にきれいな線を描くことは、汗や脂の

ためにきわめて困難であり、できたとしても時間と労力がかかる。

そこで著者らは、人体にメッシュをかけたと仮定したときに得られる格子点のみを測定点とし、これらの格子点の三次元座標の測定値を用いて滑らかに連続する曲面をあてはめようとした。このようにすれば、点を測定しただけで、人体を線としても面としてもとらえることが可能となる。

著者らは、測定点として図1(a)に示すような幅1cmの正方形のバンソウ膏のターゲットを図1(b)に示すような位置にはり付けることにした。

図1(b)に示される測定点は正常姿勢において、人間工学的に重要である縦方向と横方向のメッシュポイントに配置された。図1(b)の中の測定点番号の1の位は横方向メッシュ線番号であり、10の位以上は縦方向メッシュ線番号である。これらのメッシュポイントは、たとえば、正中線、体側線などの縦線と、胴囲線、胸囲線、頸付根囲線などの横線とが相交わるところに配置されている。

(2) 写真撮影

図2に示すように、被験者から3m離れた前後の位置から2対のステレオカメラを用いてつぎに示す7動作に対して写真撮影がなされた。

- (1) 正常姿勢
- (2) 左上肢 90° 外転
- (3) 右上肢 135° 前上挙 45° 外転
- (4) 両上肢 90° 前挙
- (5) 両上肢 180° 上挙
- (6) 呼吸
- (7) 右側屈

使用したカメラの諸元はつぎのとおりである。

名称	マミヤステレオカメラ	
焦点距離	カメラ A	152.42 mm
	カメラ B	152.13 mm
基線距離	600 mm	

* 東京大学生産技術研究所 第5部

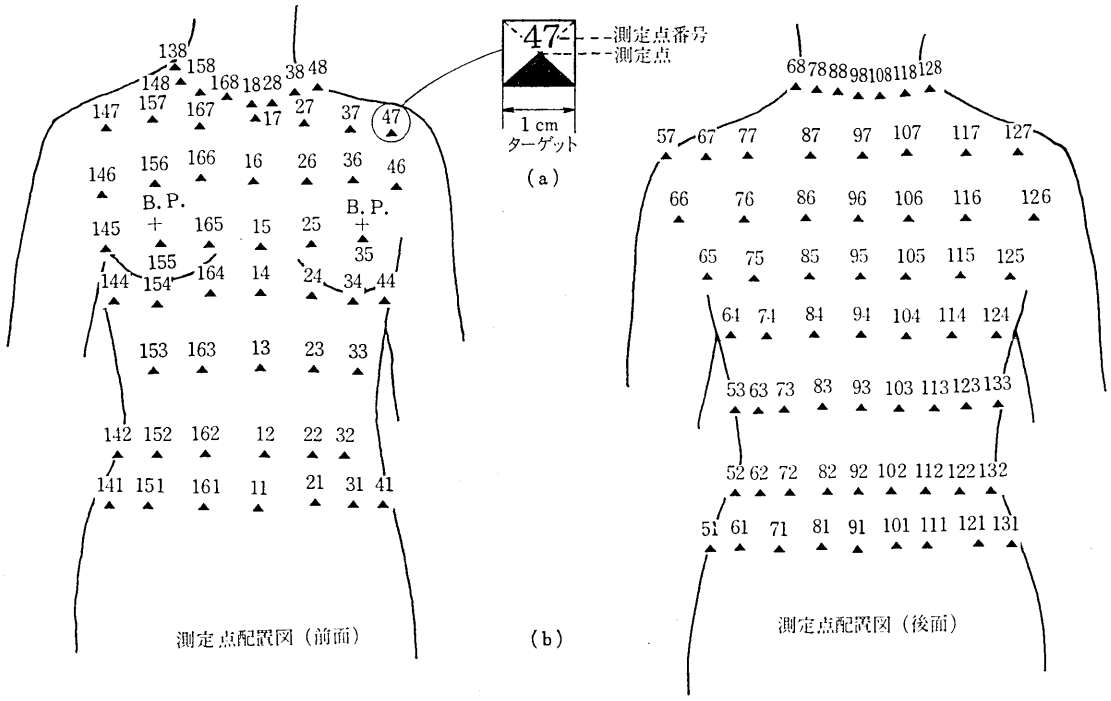


図1 測定点ターゲットとその配置図

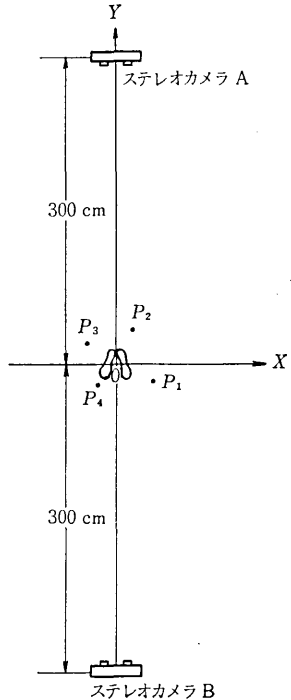


図2 (a) カメラおよび基準点配置図

基準点は、図2 (b) に示されるように天井から吊された4本のピアノ線に合計12点設けた。

これらの基準点の測量結果は、表1に示すとおりである。

(3) 解析写真測量による測定点の三次元解析

図3に示されるように、空間内のある点 $P(X, Y, Z)$

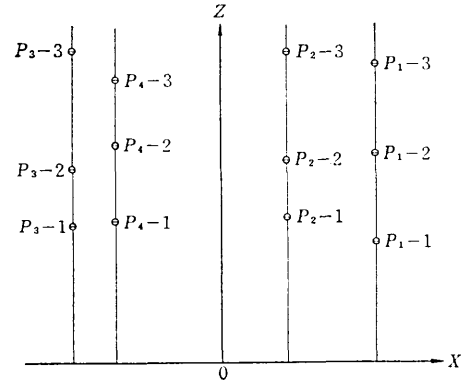


図2 (b) ピアノ線に吊された基準点

は2枚の写真にそれぞれ $p_1(x_1, y_1)$, $p_2(x_2, y_2)$ の平面写真座標をもつ像として撮影される。

このとき、写真座標と空間座標との間にはつぎのような関係がなりたつ。

表1 基準点の空間座標測定値 (単位 0.1mm)

基準点名	X	Y	Z
P 1-3	3548	-1839	13497
P 1-2	3571	-1850	9501
P 1-1	3576	-1838	5499
P 2-3	1550	3444	14020
P 2-2	1554	3453	9018
P 2-1	1557	3450	6520
P 3-3	-3447	2130	13985
P 3-2	-3454	2132	8937
P 3-1	-3456	2120	6490
P 4-3	-2383	-2110	13012
P 4-2	-2375	-2117	10017
P 4-1	-2384	-2123	7010

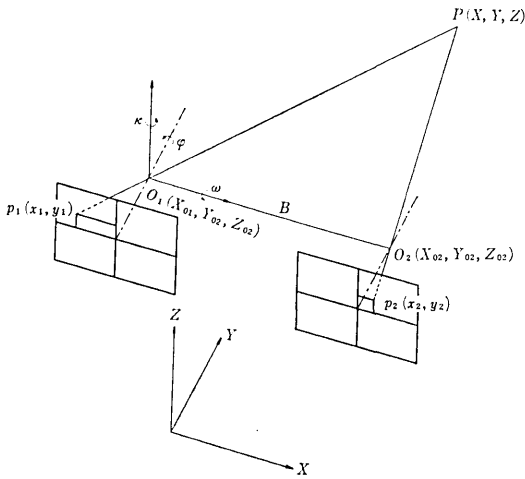


図3 写真測量の原理

$$\begin{cases} x = f \frac{A_1(X-X_0) + A_2(Y-Y_0) + A_3(Z-Z_0)}{B_1(X-X_0) + B_2(Y-Y_0) + B_3(Z-Z_0)} \\ y = f \frac{C_1(X-X_0) + C_2(Y-Y_0) + C_3(Z-Z_0)}{B_1(X-X_0) + B_2(Y-Y_0) + B_3(Z-Z_0)} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ B_1 & B_2 & B_3 \\ C_1 & C_2 & C_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & 1 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで (X_0, Y_0, Z_0) はカメラレンズ位置であり, κ, φ, ω は, それぞれ Z, Y, X 軸のまわりの微小順次回転角である。

結局, 基準点の写真座標を測定して (1) 次の条件式を用いれば, 未知変数であるカメラレンズ位置 (X_0, Y_0, Z_0) および撮影方向微小回転角 κ, φ, ω を数学的に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。

本研究では, 基準点および測定点の写真座標をコンパレータで測定し, 上記の計算の入力データとし, その後の計算はすべてコンピュータで行ない, 解析的に測定点の座標が求められた。

なお, 写真測量用のカメラでは, レンズの光軸と写真乾板面とが互に直交し, その距離すなわち焦点距離が不変であることが必要である。本研究で用いたカメラはこれらの内部機構に撮影毎の微小変位が認められたので上記の計算とともに内部定位の補正計算を同時に解析する方法をとった。

2. 人体の曲面表示

図 4 に示されるように, 三次元直交座標系 XYZ の中

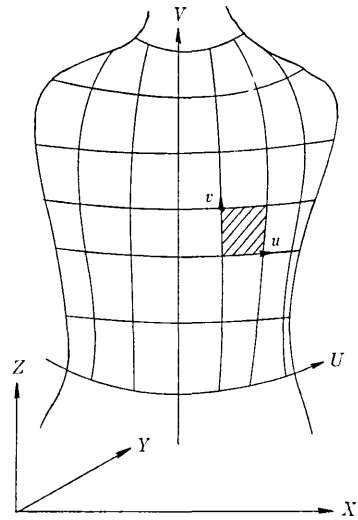


図4 メッシュによる人体座標系

に人体が位置づけられており, 人体の表面は UV のメッシュ座標系におおわれているものとする。

メッシュの格子点がマーキングされ, この格子点の空間座標 (X, Y, Z) が写真測量によって計測される。

このとき, 隣り合うメッシュが互いに滑らかに連続するような三次曲面のあてはめを考える。図 5 に示すよう

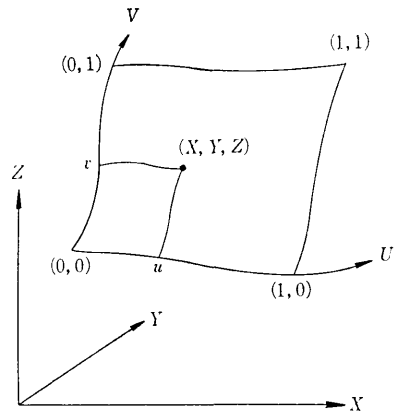


図5 自由曲面のあてはめ

にある一つのメッシュをとり出し, メッシュの間隔を単位とするような局所的な座標系 uv を設定し, このメッシュの内側にある点の空間座標 (X, Y, Z) をつぎのような三次関数とする。

$$X = X(u, v) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 a_{ij} u^{i-1} v^{j-1}$$

$$Y = Y(u, v) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 b_{ij} u^{i-1} v^{j-1}$$

$$Z = Z(u, v) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 c_{ij} u^{i-1} v^{j-1}$$

ただし $0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1$

このとき, このメッシュの 4 隅 $(0, 0), (1, 0), (0, 1),$

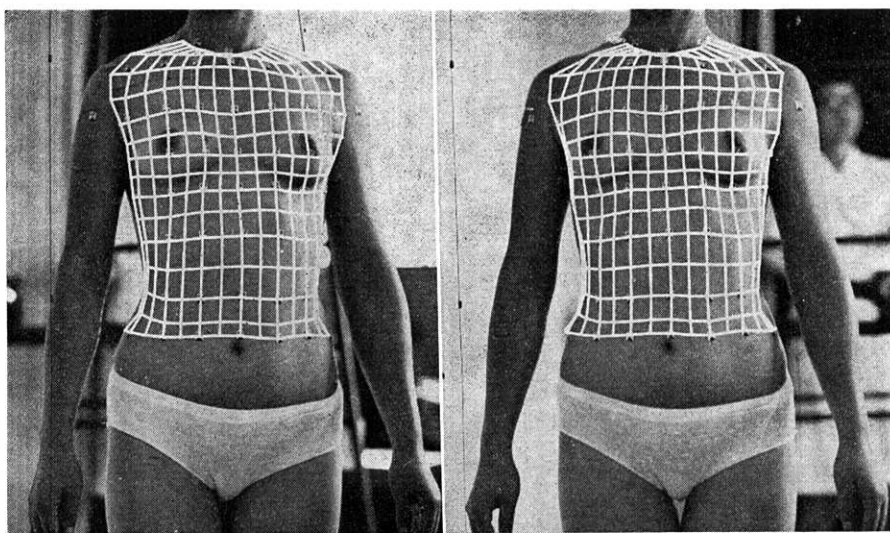
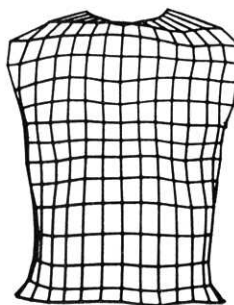
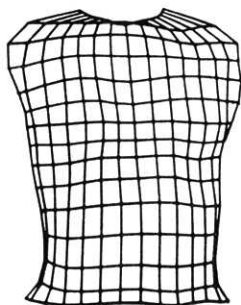
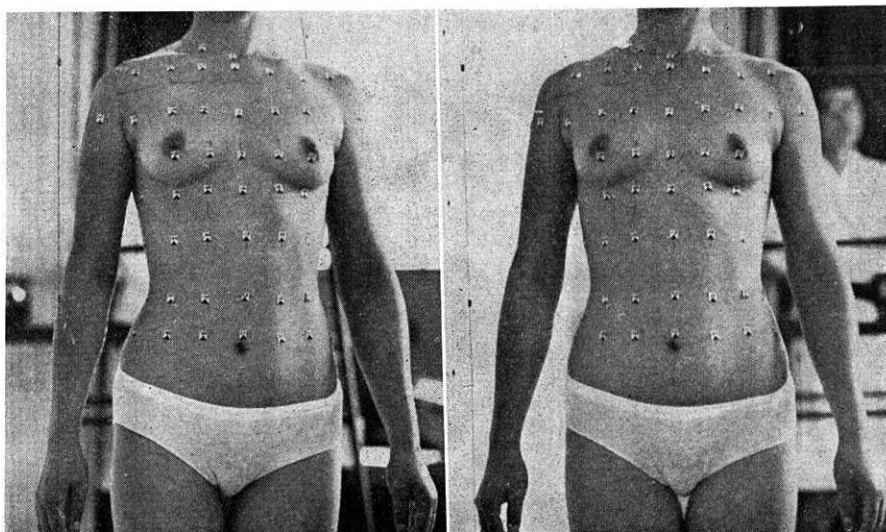


图6 正 常 姿 势

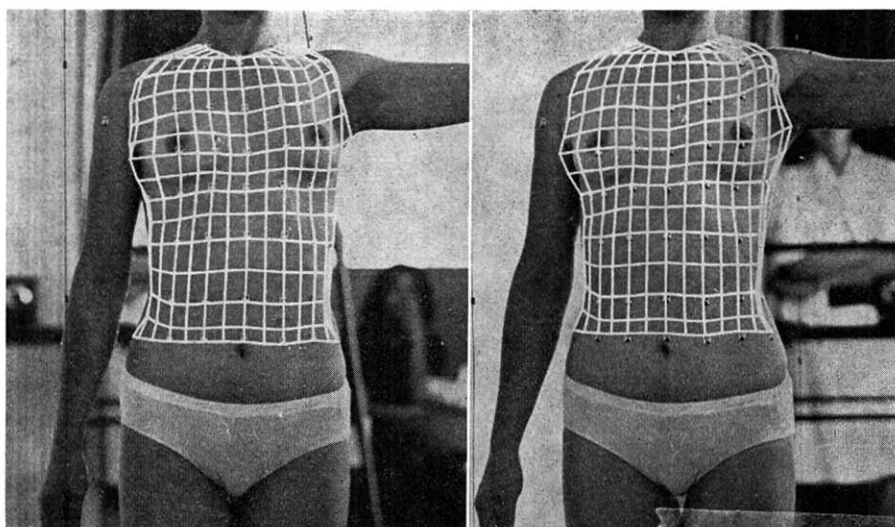
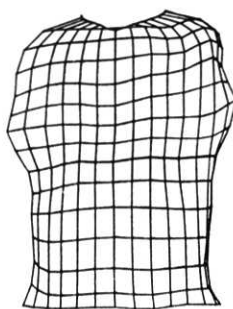
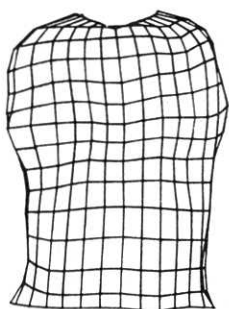
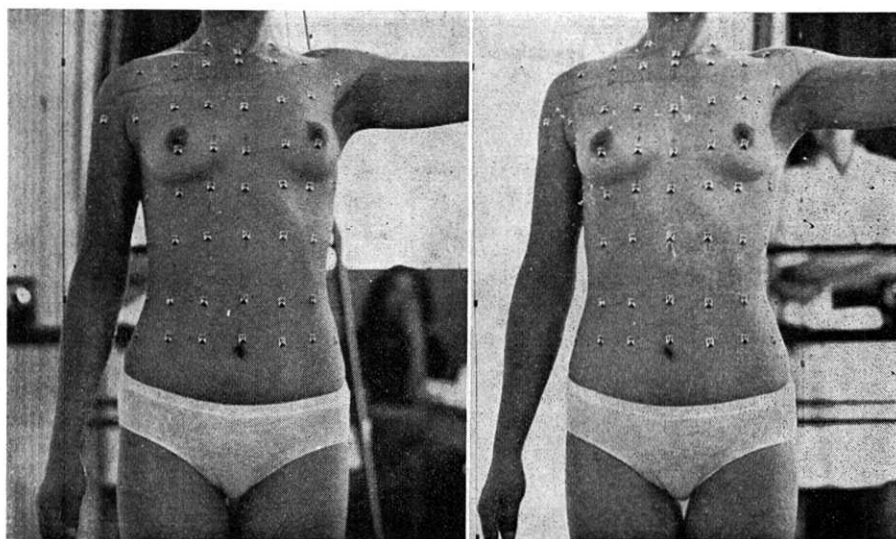


图7 左上肢 90° 外转

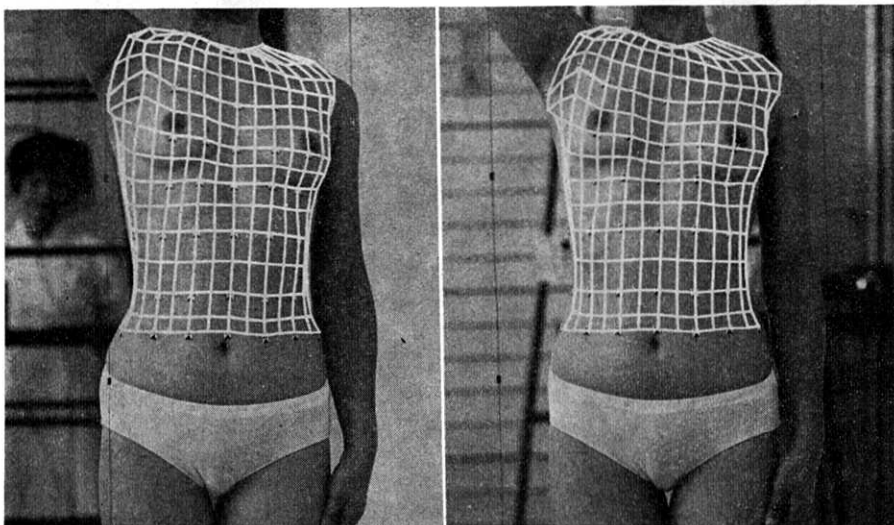
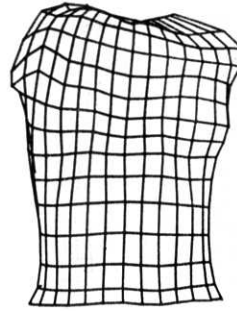
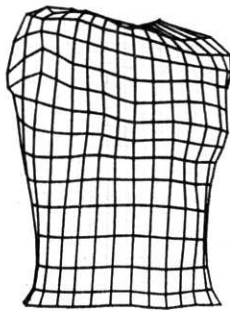
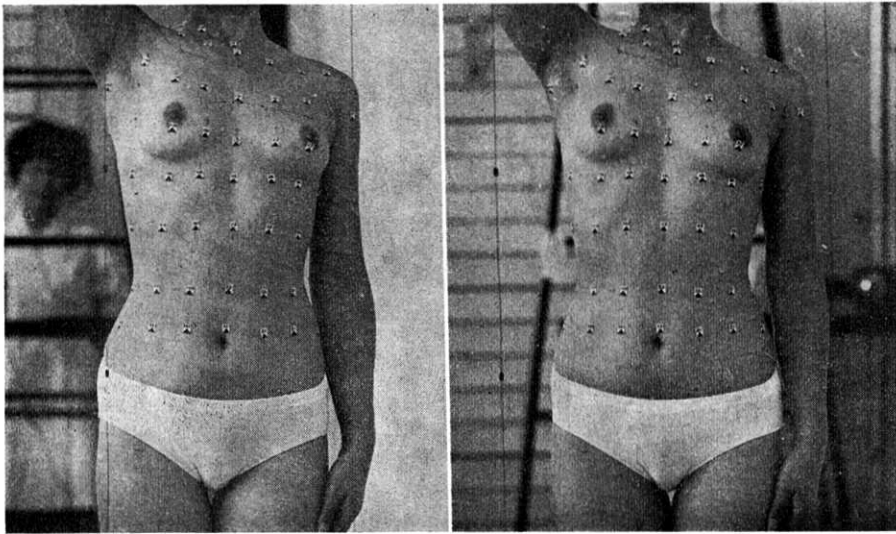


图8 右上肢 135° 前上举 45° 外转

(1, 1) におけるつぎの 4 種類の条件

- (i) 測定値 (X, Y, Z)
- (ii) u 方向接線勾配 $\left(\frac{\partial X}{\partial u}, \frac{\partial Y}{\partial u}, \frac{\partial Z}{\partial u}\right)$
- (iii) v 方向接線勾配 $\left(\frac{\partial X}{\partial v}, \frac{\partial Y}{\partial v}, \frac{\partial Z}{\partial v}\right)$
- (vi) ねじれ $\left(\frac{\partial^2 X}{\partial u \partial v}, \frac{\partial^2 Y}{\partial u \partial v}, \frac{\partial^2 Z}{\partial u \partial v}\right)$

すなわち、 $X(u, v), Y(u, v), Z(u, v)$ に対してそれぞれ 16 個ずつの条件を満足するように 16 個の係数 a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} をそれぞれ求める。

このようにして、次々におのおののメッシュに対して三次曲面をあてはめて行くと、人体は、たがいに滑らかに連続する三次曲面群としてあらわされる。

上に記した u 方向または v 方向接線勾配は、格子点の測定値を UV 座標系でそれぞれ分解し、連続する 4 点からそれぞれ三次曲線をあてはめたとき得られる曲線の接線勾配とする。また、ねじれは u 方向または v 方向の接線勾配の v 方向または u 方向の変化率として求められる。

三次曲面群として人体が表現されると、好みに応じた人体の断面構造を知ること可能であるし、数値積分すれば好きな部位の表面積を求めることが可能である。

3. 人体の視覚表現

人体を数値表現して、人体の表面積や展開面の動きを数値的に取り扱う一方、人体を図解的に表現して、人体の動きを視覚的にとらえることは人間工学上きわめて重要である。

ここでは、人体を好きな方向から眺めたとき得られる図すなわち透視図を作成しようとした。

透視図は三次元空間像が画面上に中心投影された像であるから、原理的には写真と同じである。したがって、(1) 式に、物を見ようとする視点の座標を (X_0, Y_0, Z_0) 、画面距離を f 、視準方向を κ, φ, ω で与えれば、任意の点 $P(X, Y, Z)$ の透視図上での平面座標 (x, y) が求まる。

異なる位置から見た二枚の透視図を作成すれば、立体写真と同様に立体透視図が得られる。

また、写真を撮影したときのレンズ位置と視点、撮影方向と視準方向、焦点距離と画面距離を一致させれば、もとの写真のなかに透視図をくみ入れることができる。これをモニタージュ写真とよぶ。

たとえば、メッシュポイントである測定点の間を結ぶ線をあてはめた三次曲面から内挿し、この線の透視図をもとの写真の中に重ね焼きすれば、あたかも、メッシュの線を体に描き入れて写真撮影したかのように見える。

図 6 から図 8 は正常姿勢、左上肢 90° 外転、右上肢

135° 前上挙 45° 外転の三つの場合における人体前面のステレオ写真、立体透視図、ステレオモニタージュ写真である。

4. 人体展開図の作成と人体表面積の計算

人体の三次元的な動きを被服構成へ反映させる基礎資料とするために、人体の展開図を自動製図機により作成した。同時に人体の表面積を数値積分により求めた。

人体の展開図の作成にあたっては、人体曲面上の測点を通る縦線および横線を展開軸としてとる。図 9 に示す

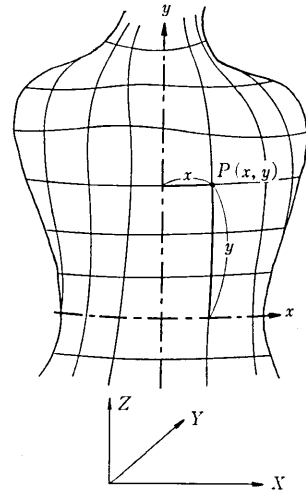


図 9 展開図の作成

ように任意の点 P の展開図上での座標 (x, y) はそれぞれ点 P から横軸線および縦軸線に至るまでの曲面に沿った距離とする。

人体表面積は、人体曲面を微小メッシュに分割し、微小メッシュが微小平面群でできていると仮定してそれらを数値積分することによって計算した。

展開図を作成する際の軸線はつぎの二つの場合を考えた。

- (1) 横軸線 ウェストライン
縦軸線 正中線
- (2) 横軸線 腕付根元線
縦軸線 正中線および体側線

図 10 から図 12 までの図は上記の二つの展開軸をとった場合の展開図および、その展開図の変化を示している。

これらの展開図の中には、正常姿勢のときのおおのの部位の面積を 1 として腕をあげたときのおおのの部位の表面積がどのくらい変化したかその割合が示されている。

これらの展開図を詳細に検討すれば、どこの部位はどこの部位の動きによりどの方向に伸縮しているかを展開図上でしらべることができる。

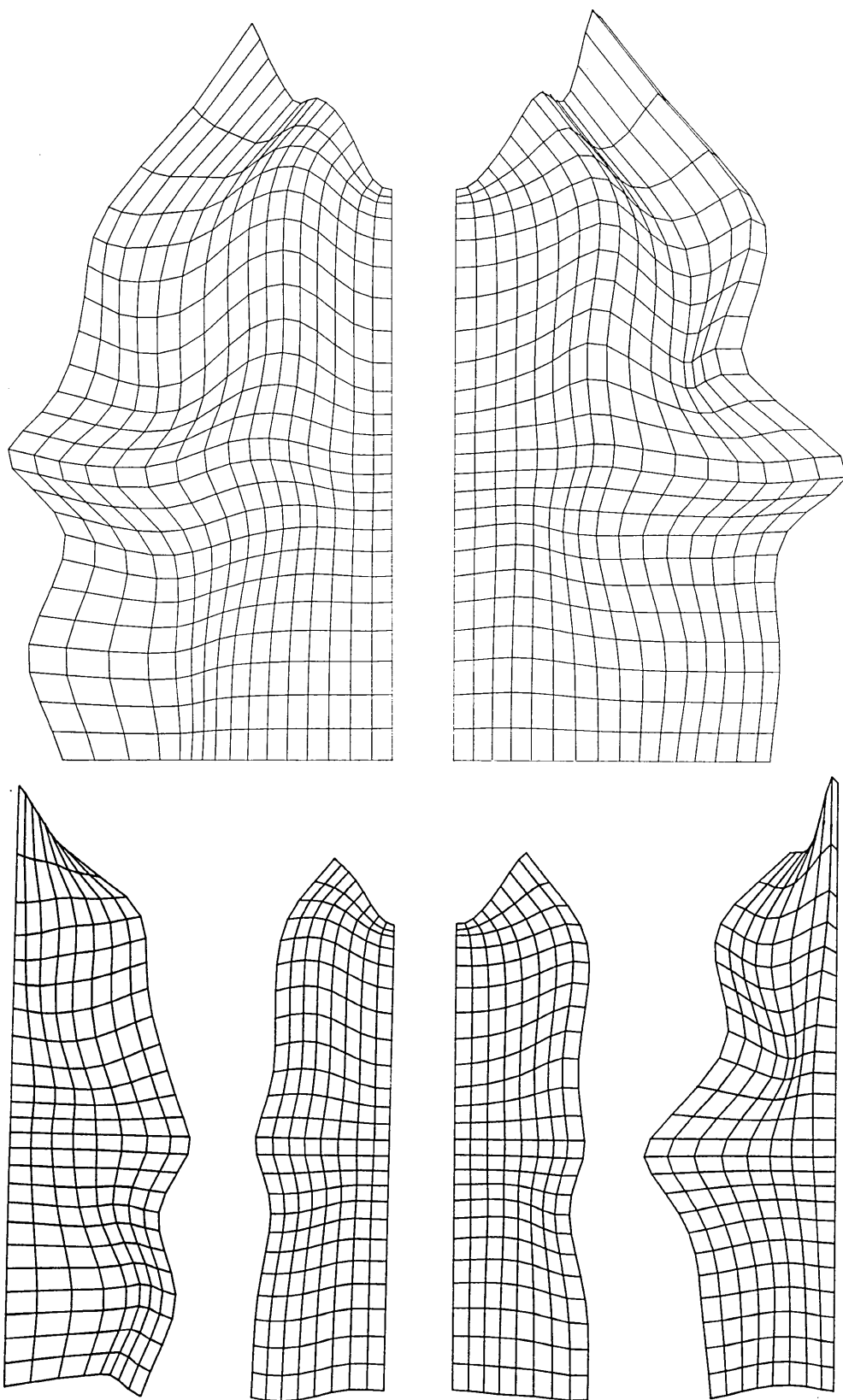


图 10 正常姿勢の展開図 (前面)

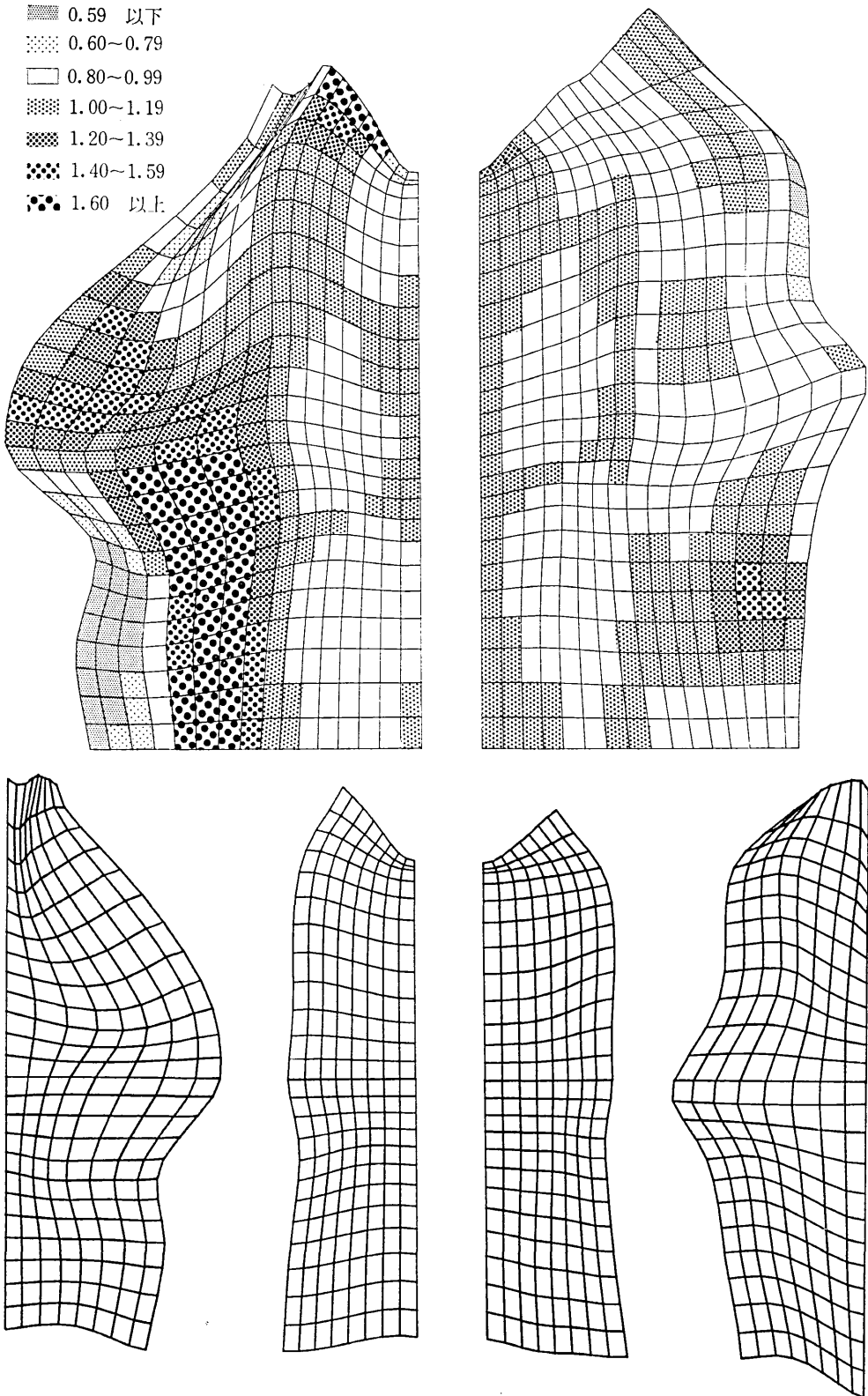


図 11 左上肢 90° 外転の展開図 (前面)

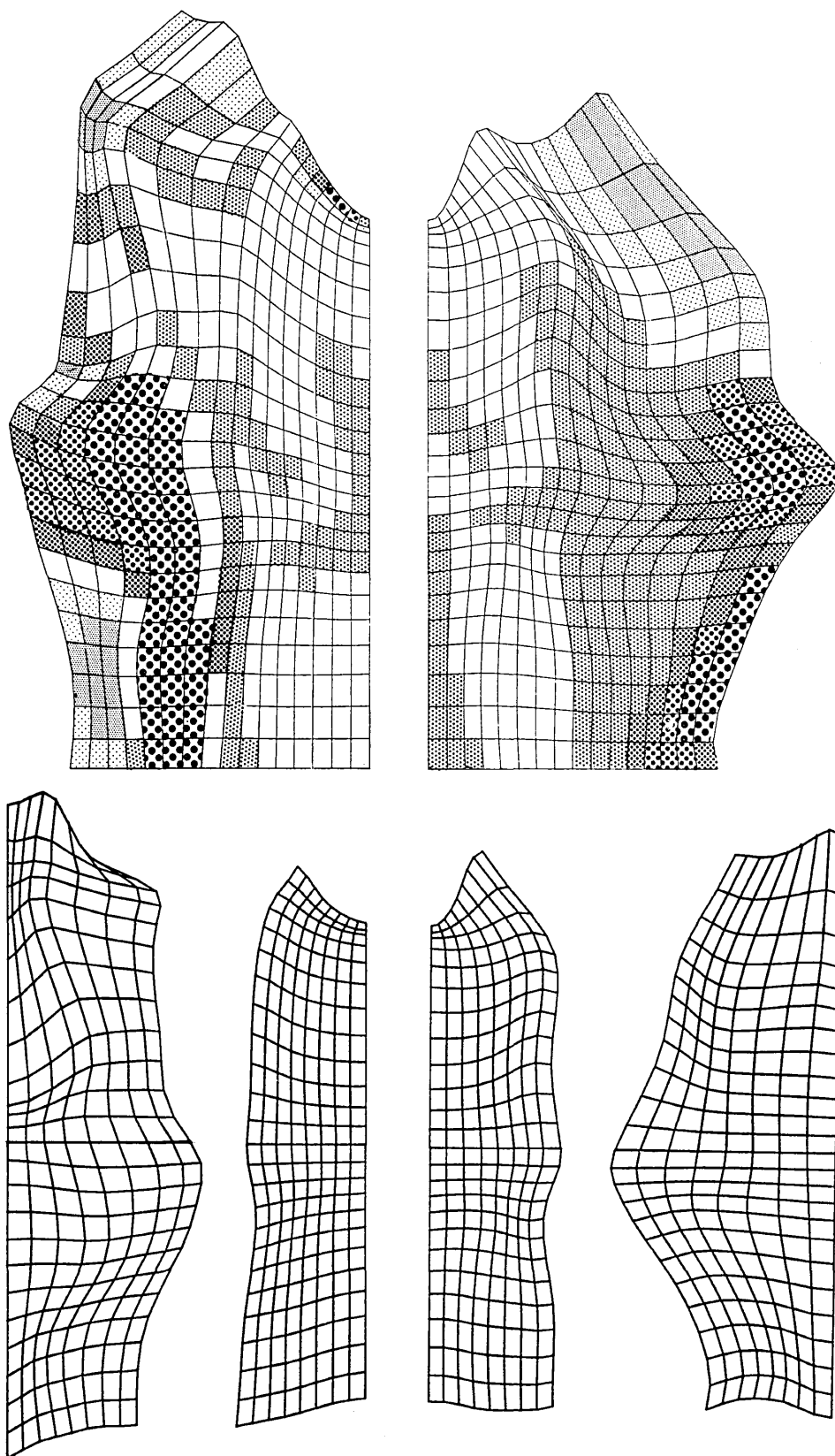


図 12 右上肢 135° 前上挙 45° 外転の展開図 (前面)

5. む す び

以上にのべてきた人体の数値表現とその自動処理が衣服構成など人間工学上の課題にどのような役割を果しうるかをまとめてみよう。

(1) 写真測量を行なうことにより複雑な人体の動きとその形状を正確に記録し測定することができる。

(2) 人体を滑らかに連続する曲面群で表現することにより、人体のもつ各種の幾何学的な変化を数値的および視覚的にとらえることができる数値人体モデルをコンピュータの中に記憶しておく。

(3) 本研究で用いた曲面あてはめの手法によれば、人体の計測にあたっては人体表面上の点の空間座標が与えられるだけでよい。そのため、体の表面に線を描く必要はなく、小さなバンソウ縞を貼りつけるだけでよいので測定の準備がきわめて簡便である。

(4) 数値人体モデルを用いてさらに人体の展開図を作成することができる。種々の動きをしたときの人体展

開図を描くと、人体の動きをその展開図上での動きとしてとらえられる。また展開図の作成にあたっては、いかなる展開軸に対する展開図も、展開軸の入力データを与えるだけであとは自動的に描画してくれる。

(5) 人体の展開図を作成すると同時に人体表面積を数値積分により計算することができる。人体の動きにより人体表面積の微小変化をとらえることもできる。

(6) 人体のある部位の動きと他の部位との相対関係を展開図上でしらべることができる。これは衣服構成を考える場合、人体をどのように展開したらよいか、および衣服のゆるみ量を割り出す上で基礎的な資料となる。

以上人体の数値表現とその自動処理に関して基礎的な研究の成果をのべてきたが、人間工学上の問題に対して本研究で示した手法はきわめて有効であると考えられる。

最後に本研究に用いた写真撮影および測定に協力してくださったお茶の水大学家政学部被服構成学研究室の方々および東大生産技術研究所丸安研空室の方々に感謝の意を表す。

(1971年6月24日受理)

(p. 12 よりつづく)

おわりに、この研究は故雀部高雄教授の示唆されたものである。(1971年6月22日受理)

文 献

- 1) Z. Gyulai, *Z. Phys.* 138 (1957) p. 317
- 2) S. S. Brenner, *J. Appl. Phys.* 27 (1956) p. 1484
- 3) *Carborundum Co. reports.* 4 (1965) p. 72
- 4) S. S. Brenner, *J. Metals.* 11 (1962) p. 809
- 5) エゴーフ著: 「強さと硬さ」東京図書. 1965
- 6) ラビノヴィッチ著: 「金属の構造と強さ」東京図書 1965
- 7) 橋口: 「固体物理」1966, p. 12
- 8) P. D. Gorsuch, *AIME.* 1959, p. 771
- 9) A. W. Cochardt et al., *Naturwissenschaften* 42 (1955) p. 342
- 10) R. S. Wagner & W. Ellis, *Trans. met. Soc. AIME.* 233 (1965) p. 1053
- 11) G. W. Sears, *Acta Metallurgica.* 3 (1955) p. 361
- 12) K. Yoshida, M. Yamamoto & T. Onozuka *J. Phys. Soc. Japan* 22 (1967) p. 668
- 13) K. Yoshida, et al. *J. Phys. Soc., Japan* 24 (1968) p. 1099
- 14) A. S. Keh, et. 「Dislocation dynamics, edited by A. R. Rosenfield et. al.」(McGraw-Hill New York 1958) p. 239
- 15) R. V. Coleman, 「Growth and perfection of crystals」(John Wiley & Sons, New York, 1958) p. 239
- 16) 鈴木秀次: 「転位論入門」(アグネ, 東京, 1967) p. 113
- 17) K. Kawamura *Tohoku Univ. Sci. Rep.* (1) 25 (1936) p. 364