

生体計測用自由形状処理システム

長島 忍 鈴木賢次郎 永野 三郎
東京大学教養学部情報・図形科学教室
堤 江美子
大妻女子大学人間生活科学研究所

生体等の3次元情報から、その計測、解析、あるいは結果の表示にいたる一連の過程をシステム化する糸口として、形状モデリングの手法を取り入れた形状解析プログラムを開発した。本システムはBezier曲面あるいは新しいBezier3辺形パッチを用いて、測定対象上の凹凸に関する特徴点や生体計測点等の3次元座標値からコンピュータ内に形状モデルを生成するものである。この手法によれば、形状を詳細に再現することも、また大域的な形状に置き換えて表現することも可能で、モデル上の任意の位置の幾何学的情報等を容易に抽出・表示できる。

A System for Human Bodies Measurements with Free-formed Surafces

Shinobu Nagashima Kenjiro Suzuki Saburo Nagano
Department of Graphic and Computer Science,
College of Arts and Sciences,
The University of Tokyo
3-8-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153, Japan

Emiko Tsutsumi
Institute of Human Living Sciences,
Otsuma Women's University
12 Sanban-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 102, Japan

As one of clue to systematize biostereometrics together with its measurements, analisys and display method, the auther developed computer graphics program putting geometrical modeling to represent human figure. The advantage of this system is to generate surface model only from 3-D coordinates of several points on the human body surface using Bezier and new Bezier triangular patches. Those data points are selected from characteristics points on concave-convex body surface and those of anthropometrically significant points. With this method, it became possible to present the original figure in detail or in a simpler shape according to the degree of selection for data points. The surface model could present various geometrical information and applications concerning to any point on the surface.

1. はじめに

被服構成や人類学分野では、従来から人体など生体形状の計測・解析を行ってきた。近年モアレ写真機など、3次元の非接触の計測装置が開発されたり、コンピュータ技術の進歩により、以前より容易にかつ客観的に3次元計測を行って自動化処理できるようになった。

筆者らはモアレ写真で得られた、立位静止状態にある人体体幹部の3次元情報から、コンピュータを用いて様々な自由曲面モデルを生成処理するシステムを開発した。これは、モアレ写真で生成される等高線図をデータとして入力し、必要に応じて曲面モデルを生成し、計測・解析に利用するシステムである。

2. 形状モデリング

ここでは、人体体幹部の形状をモデリングして計測や解析を行う場合、どのような形状モデルがあり、どのように利用できるかということを考えてみる。

たとえば、かなり大まかな形状でよければ図1のように正面図や側面図のシルエットの柱体の相貫形状から体幹部の形状モデルができる[1]。形状モデルの断面を調べたり、表面積を計算したりできるが、この方法では陥凹部の形状は表現できないという問題がある。また表面形状のなめらかさを出すためには、正面や側面だけでなく、数多くの方向のシルエットから相貫形状をつくる必要がある。さらに相貫体を生成する、つまり集合演算

を行うためには多面体で表現されていることが望ましく、自由曲面の集合演算が難しいという問題もある。

モアレ写真機などの3次元計測機を使うと、比較的容易に体幹部表面形状の3次元座標が得られる。これからメッシュ状の頂点座標値を計算して自由曲面モデルを生成することができる。自由曲面モデルが生成されることにより表面積や曲率など様々な幾何的特徴量を計算できる。

モアレ写真の場合、1つの方向のモアレ写真から自由曲面を生成すると、その方向から見える部分の形状に限られてしまう。したがって、体幹部全体の曲面モデルを生成するには、1方向だけでなく横方向や後方から撮影したモアレ写真が必要になる。

曲面パッチの大きさをどれくらいにするかということは、どれくらい正確に形状を表現するかということに依存する。また凹凸のない大きななめらかな面の場合だと、1つの面の内部をどのようにパッチに分割するかということはそれほど問題にならないが、人体体幹部の場合は、なめらかであっても凹凸があるので、パッチの分割方法はいろいろ問題になる。同じ数のパッチに分割する場合、再現性をなるべくよくするには、陥凹点、突出点、尾根線、谷線などを基準に分割を行った方がよい。したがって肩、肩稜、首まわり、乳頭点、正中線などを基準にパッチの分割を行った。

ここでは図2のように基準点を選んだ[2]。水平方向線は数字で、鉛直方向線はローマ字で示して

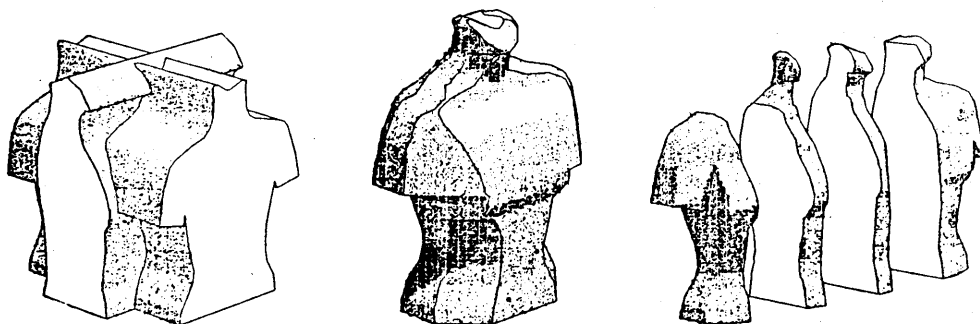


図1 正面図・側面図の相貫による体幹部形状モデルの例

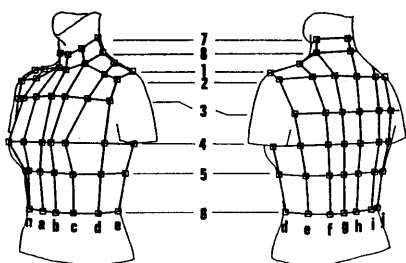


図2 曲面パッチ生成のための基準点

ある。鉛直方向線については、aとhが正中線である。水平方向線は次の通りである。

- 1：肩稜
- 2：上腕骨頭の前面部および後面部を通過する肩稜部の境界線
- 3：胸骨角を通過する水平線（前面）、肩甲骨の下角付近を通過する水平線（後面）
- 4：乳頭位胸囲線
- 5：下部胸囲線
- 6：胴位線（寛上最小位測定部位）

これらの基準線群にそのままパッチを割り当てて曲面を生成できる。鎖骨の突起などの細かい形状を表現するためにはより細かいパッチに分割しなければならない。体幹部形状のモデリングを行う場合、より細かく精密な曲面が必要かという点、必ずしもそうではなく、たとえば形状分類[3]を行うためには、なるべく大まかな曲面の方が望ましい。

これらの基準点は、モアレ撮影後に位置決めを行うのは容易でないで、石膏像や生体上にマーキングをしてから撮影を行うことにした。このように決まった分割を行うと、大量のデータ処理がより容易に行える。

3. 3次元座標の入力

モアレ写真によりモアレ縞-3次元形状の等高線図に相当するものが得られる。これは投影方向に垂直な平面群で切断した切口の曲線である。等高線の間隔は撮影時の諸条件により変わり、それを入力することにより3次元の座標値が計算できる。したがって切断平面に対し、平行に近い形状はきれいにモアレ縞がでなくなり、逆に垂直に近いと縞が見えにくくなる。

先に述べたように人体体幹部全体のモデリングを行う場合は、1方向だけでなく前後左右斜め方向からのモアレ撮影が必要になる。石膏像の場合は、回転台を利用していろいろな方向から撮影ができる。生体の場合、撮影のやり直しをすると形状が変わるので、複数台のカメラで同時撮影するのが望ましい。借用したモアレ写真も5台のモアレカメラを使用し、5方向から同時撮影したものである。女子体幹部石膏像のモアレ写真の例を図

3次元座標値の計算は、モアレ縞との位置関係から自動的に行う。はじめにモアレ写真をデジタルに張り付け、モアレ縞を順番に入力していく。入力方法は、モアレ縞上の何点かを入力して自由曲線を生成する。曲線データには、モアレの縞番号、つまり等高線の高さに相当するデータを付加3に示す。

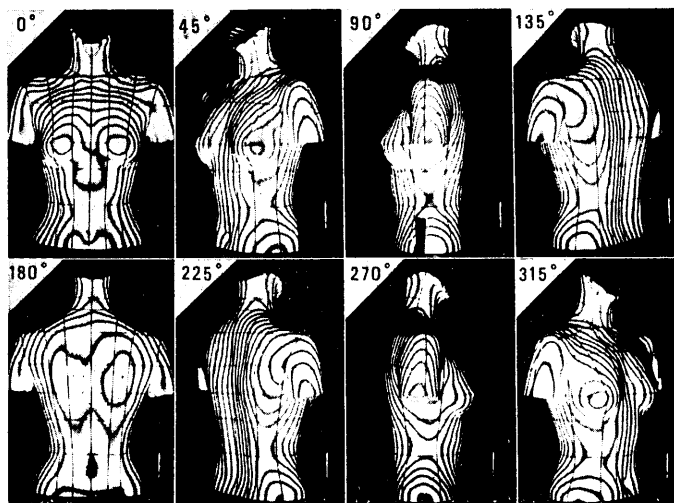


図3 45° おきに撮影したモアレ写真

する。このようにしてモアレ縞の等高線モデルを生成しておく。

次に変換したい点を、デジタイザで2次元の座標として入力する。平面上でこの点を通る水平線、垂直線とモアレ縞との交点を計算し、交差したモアレ縞の高さから入力点の高さを補間すれば、入力点の3次元座標が得られる。

4. 4辺形パッチによる形状モデル

自由曲面表現式は、4辺形と3辺形の2種類のBezier曲面パッチを用いた。はじめに4辺形状のBezierパッチを張り合わせて曲面形状を生成法について説明する。

Bezier曲面の4辺形パッチは uv 2つのパラメータを用い、 $n \times m$ 次の曲面式は次のように表せる[4]。

$$S(u:n, v:m) = (1-u+u\lambda)^n (1-v+v\mu)^m P_{00}$$

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

$$\lambda P_{ik} = P_{i+1, k}, \mu P_{ik} = P_{i, k+1}$$

$n=m=3$ の3次曲面がよく用いられる。

4辺形Bezierパッチによる代表的な形状生成法は、始めにパッチ4隅の頂点座標値、 P_{00} 、 P_{03} 、 P_{30} 、 P_{33} の4点を決める。つまり、基準点の座標値である。次に境界曲線、つまり境界上の制御点の座標値を決める。これは、 P_{10} 、 P_{20} 、 P_{01} 、 P_{02} 、 P_{31} 、 P_{32} 、 P_{13} 、 P_{23} の8点で、つながっている境界曲線がなめらかになるように境界の制御点を配置する。最後に内部の制御点、 P_{11} 、 P_{21} 、 P_{12} 、 P_{22} の4点を決める。これらの点は、境界上でとなりあうパッチの接平面を連続にする条件から計算する。

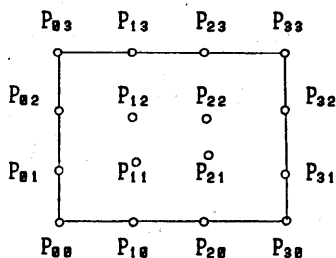


図4 4辺形パッチの制御点

この接続方法では、完全に連続に接続するための制御点の位置決定は容易ではない。これを行うためにGregory パッチ[5]のように制御点の数を増やして、接続する例もある。ここでは厳密な連続性は特に必要ないため、Bezierパッチそのままの式を用いた。

図2の基準点にしたがって曲面モデルを生成しながら順に表示したのが図5である。図5(1)が4隅の頂点を入力した状態、(2)が境界上の制御点を決定した状態、(3)が内部の制御点を決定した状態である。(4)は uv 曲線を表示したものである。

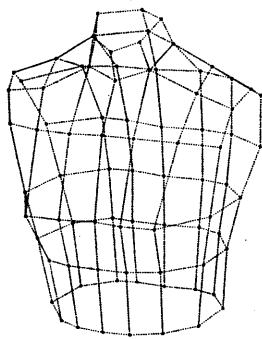
また分割を細かくして曲面モデルを生成し、等高線表示したのが図6である。2次元の頂点座標の入力は手作業で行ったが、このぐらい細かい場合は、基準点をもとに自動的に計算した方がよいだろう。等高線からメッシュ状の頂点座標値に変換する試みもいくつかある[6]。

5. 3辺形パッチによる形状モデル

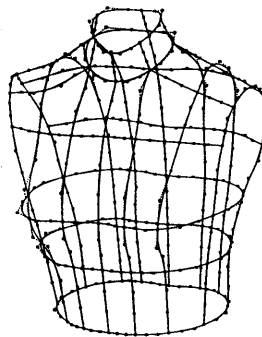
4辺形状のパッチでは、パッチの張り合わせが難しい部分があることはよく知られている。図5でも、1箇所に5枚のパッチを張り合わせた。これは本来の4辺形パッチの接続法ではなく、なめらかに接続できない部分が生じる。このような特異形状については、4辺形に比べると3辺形を張り合わせる方が面を生成しやすい。そのため、3辺形パッチによる曲面表現と接続も考えた。

3辺形パッチで曲面を生成する場合も、Bezierの3辺形パッチを用い、4辺形と同様な順序で生成を行うことにした。ただし、頂点における法線ベクトルは前もって決めておく。なぜなら、4辺形のパッチで曲面を生成する場合は、境界の u 方向、 v 方向の曲線を独立に決めそれにより頂点の法線ベクトルが決まるが、3辺形パッチの場合は頂点に集まるパッチの境界線が多いので、初めに頂点における面の法線ベクトルを決めなければならない。

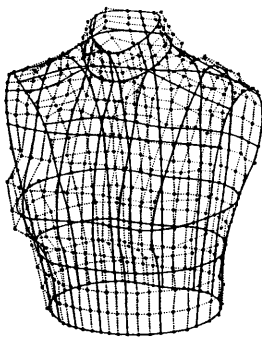
Bezier曲面の3辺形パッチは、 uvw 3つのパラメータを用い、 n 次の曲面式は次のように表せる。



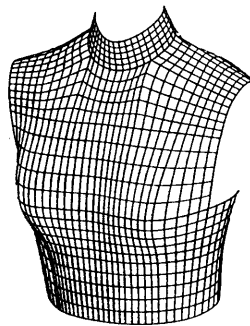
(1)



(2)



(3)



(4)

図5 曲面パッチの生成手順

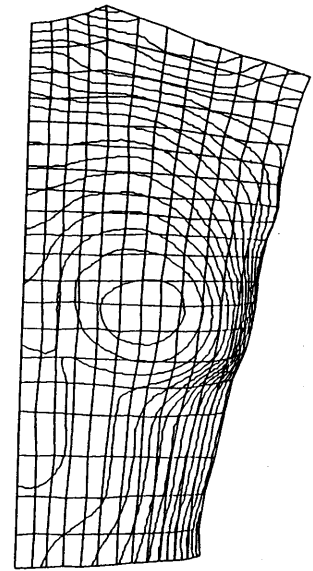


図6 パッチを細かくしたモデルの等高線表示

$$S(u, v, w; n) = (u + v\lambda + w\mu)^n P_{000}$$

$$0 \leq u, v, w \leq 1 \quad u + v + w = 1$$

$$\lambda P_{1k} = P_{1+k, k}, \quad \mu P_{1k} = P_{1, k+1}$$

境界曲線は3次曲線がよく用いられるが、3辺形の3次パッチでは、図7のように内部の制御点が1つしかなく、uvw方向になめらかに面を接続するための形状の変形は難しい。

そのため、Gregory パッチ[5]のように内部の制御点の数を増やした。これらを図のように P_{21u} 、 P_{12u} 、 P_{02v} 、 P_{01v} 、 P_{10w} 、 P_{20w} 、とする。

ここで、境界 $u=0$ において、u方向の接続性を考慮した曲面を考える。これを3辺形パッチでなく縮退した形の4辺形パッチで表す。

$$Su(u, v, w) = X P_u^t U$$

$$P_u = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{20} & P_{10} & P_{00} \\ P_{21} & P_{21u} & (P_{01} + P_{10})/2 & P_{00} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} P_{12} & P_{12u} & (P_{01} + P_{10})/2 & P_{00} \\ P_{03} & P_{02} & P_{01} & P_{00} \end{bmatrix}$$

$$X = [(1-x)^3 \quad 3(1-x)^2x \quad 3(1-x)x^2 \quad x^3],$$

$$x = w/(v+w)$$

$$U = [(1-u)^3 \quad 3(1-u)^2u \quad 3(1-u)u^2 \quad u^3]$$

である。同様にv方向は、

$$Sv(u, v, w) = Y P_v^t V$$

$$P_v = \begin{bmatrix} P_{03} & P_{12} & P_{21} & P_{30} \\ P_{02} & P_{02v} & (P_{21} + P_{20})/2 & P_{30} \\ P_{01} & P_{01w} & (P_{21} + P_{20})/2 & P_{30} \\ P_{00} & P_{10} & P_{20} & P_{30} \end{bmatrix}$$

$$Y = [(1-y)^3 \quad 3(1-y)^2y \quad 3(1-y)y^2 \quad y^3],$$

$$y = u/(w+u)$$

$$V = [(1-v)^3 \quad 3(1-v)^2v \quad 3(1-v)v^2 \quad v^3]$$

である。w方向は、

$$Sw(u, v, w) = Z P_w^t W$$

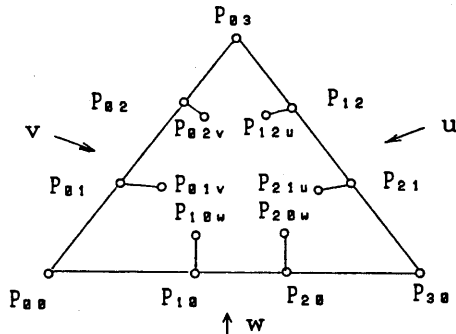
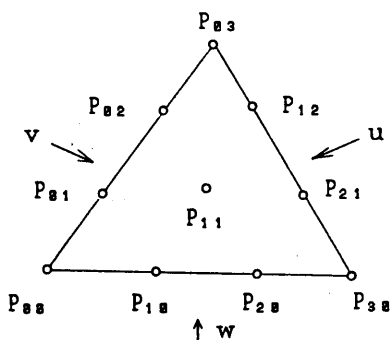


図7 3辺形パッチの制御点

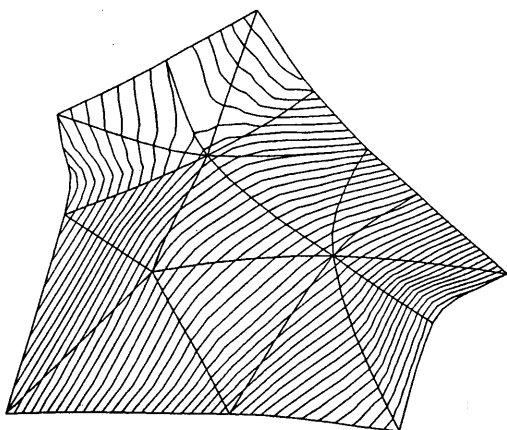


図8 3辺形パッチの表示

$$P_w = \begin{pmatrix} P_{00} & P_{01} & P_{02} & P_{03} \\ P_{10} & P_{11w} & (P_{21}+P_{12})/2 & P_{03} \\ P_{20} & P_{21w} & (P_{02}+P_{12})/2 & P_{03} \\ P_{30} & P_{21} & P_{12} & P_{03} \end{pmatrix}$$

$$Z = [(1-z)^3 \quad 3(1-z)^2z \quad 3(1-z)z^2 \quad z^3],$$

$$z = v/(u+v)$$

$$W = [(1-w)^3 \quad 3(1-w)^2w \quad 3(1-w)w^2 \quad w^3]$$

である。

全体の曲面は、これらの曲面 S_u 、 S_v 、 S_w の相加平均とした。

$$S(u, v, w) = (S_u + S_v + S_w) / 3$$

したがって、厳密にいうと接平面の連続性は失われるが、オリジナルの3辺形Bezierパッチに比べ、かなりなめらかに曲面パッチを接続できる。

実際の生成手順は、始めにパッチの分割状態を

考え、頂点の座標値を入力する。ここでは、生体の頸部から肩部にかけての形状[7]について、図2の基準点を中心にパッチの分割状態を考えた。次に頂点の法線ベクトルを、周囲の頂点の位置関係などから決める。次に境界曲線の制御点を決める。頂点のとなりの制御点の位置する平面は、頂点の接平面上に位置するので、境界曲線の制御点を計算した後、その制御点を頂点の接平面に投影する。さらに3辺形パッチ内部の制御点を計算する。

実際に3辺形パッチを生成して等高線表示した例を図8に示す。パッチが大きいため、鎖骨周辺の凹凸は表現できてない。全体的には、外周が自由端になっているため、外周での法線ベクトルが決定できれば、より正確な形状が生成できる。

6. 幾何的諸量の計算

曲面モデルが生成されると、任意の方向から表示したり、隠線消去を行ったりできる。隠線消去表示は、 u v 曲線や等高線表示の際、そこが局所的に可視部分か不可視部分かをその都度調べて、可視の場合だけ表示するものである。4辺形パッチの場合、 ds/du と ds/dv の外積から面の法線ベクトルが計算できる。

等高線表示は、パッチを細かい3角形平面で近似し、切断平面との交点を算出表示することにより、実現できる。水平面 ($z = \text{一定}$) で切断するのが普通だが、 $x = \text{一定}$ または $y = \text{一定}$ の平面で切断すると図9のような表示が得られる。

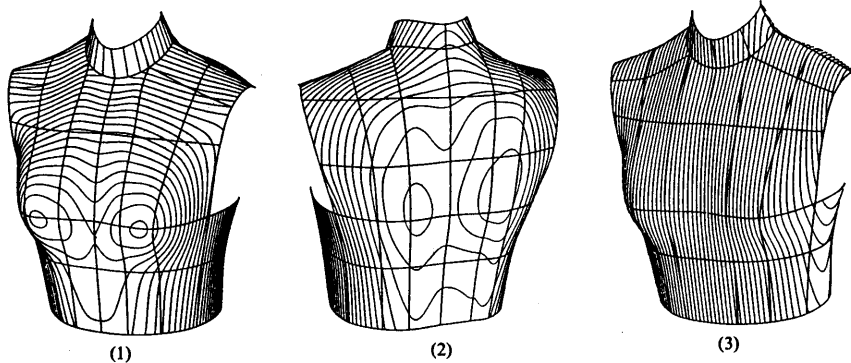


図9 等高線の表示例

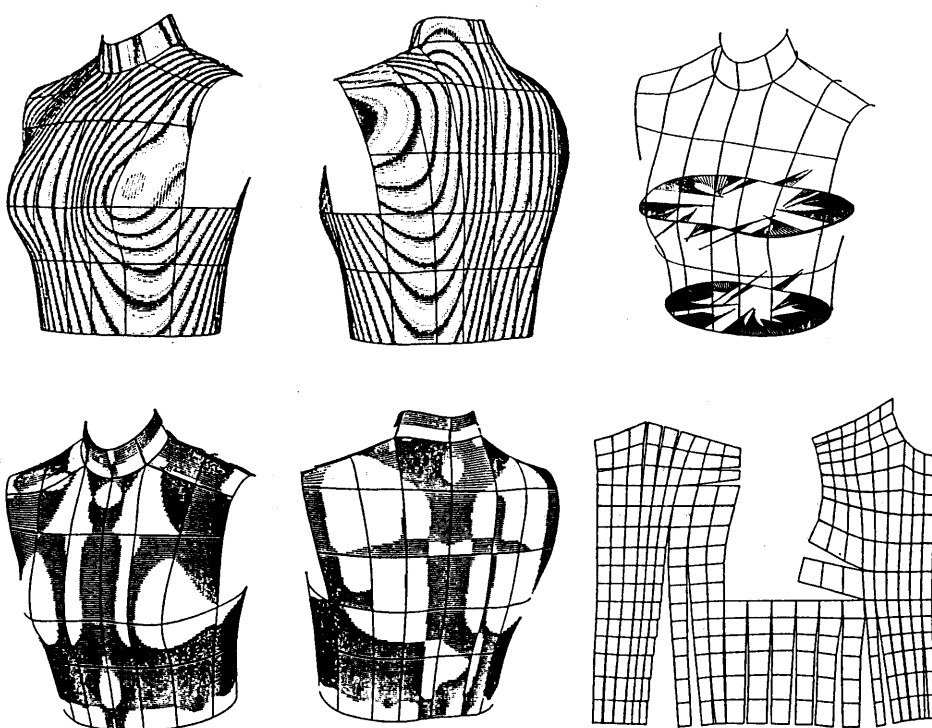


図10 各種幾何的情報の算出・表示

モアレのシミュレーションを行って表示したのが図10（左上）である。これは一種の等高線表示である。

図10（右上）は曲面モデルと水平面との断面をつくり、この断面を自由曲線で近似し、その自由曲線の曲率半径を表示したものである。

図10（左下）は、曲面パッチのガウス曲率を計

算・表示したものである。曲率が負の部分に陰をつけた。曲面式の1次偏微分、2次偏微分が計算できるので、ガウス曲率や平均曲率が計算できる。

4辺形パッチ曲面モデルの体幹部全体を展開したのが図10（右下）である。これは、被服構成の作図法に合うように展開したものである。各パッチは平面で近似し、展開する際にパッチの境界（

$u=0, u=1, v=0, v=1$) をとなりのどのパッチにつなげるのか、あるいはパッチの境界を水平または垂直に置くのか、ということを決めて、そのデータファイルを作成しておく。

7. おわりに

モアレ写真で得られた、立位静止状態にある人体体幹部の3次元情報から、コンピュータを用いて様々な自由曲面モデルを生成処理するシステムを開発した。これは、モアレ写真で生成される等高線図をデータとして入力し、必要に応じて曲面モデルを生成し、計測・解析に利用するシステムである。

なお使用したシステム構成は、当初のうちは大型コンピュータを使用していたが、パーソナルコンピュータの技術の進歩により、パソコンだけですべての処理が行えるようになった。使用した装置は、NECのPC-9801VXであり、図の出力にCANONのLASER SHOT B-406を使用した。またコンパイラはTurbo Pascal Ver 4.0を使用した。

ところでデジタイザによるモアレ縞の入力作業が大変なので、今後はできればモアレ写真をイメージスキャナで入力して、座標値を得るようにしたい。また基準点のマーキングや入力を行わなくても、陥凹点や突出点、尾根線、谷線などを自動的に算出して、その上に頂点が位置するように曲

面のモデリングを行えば、大量のデータ処理がより容易に、高速に行える。

最後に、有益な助言をいただき、モアレ写真を提供していただいた大妻女子大学の芦沢玖美教授に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 長島、磯田：幾何モデルを利用した3次元形状処理、情報処理学会第23回大会講演論文集(1981)
- [2] S.Nagashima et al. : Generation of Surface Model of Human Trunk and its Applications, J. Human Ergol., 12, 27-38, (1983)
- [3] 佐藤、堤：擬距離による人体の形状解析、PR U86-3、電子通信学会(1986)
- [4] 穂坂、木村：3次元自由形状設計制御理論とその手法、情報処理, 21, 5(1980)
- [5] H.Chiyokura, F.Kimura : Design of Solids with Free-Form Surfaces, Computer Graphics, 17, 3(SIGGRAPH'83), (1983)
- [6] 程、出澤、相馬：等高線型形状モデルから格子点モデルへの変換、情報処理研究会報告, 21-4, (1986)
- [7] 堤、長島：自由曲面による人体対幹部形状モデルの生成、人類学雑誌, 94, 2, 163-175(1986)