

## 《小特集》

## 身体形状の記述とシミュレーション

黒川隆夫\*・篠崎彰大\*\*

**ABSTRACT** Two methods of describing women's two-dimensional and three-dimensional (3D) body shape, and the related simulation studies are stated. The both methods fit a shape model to surface data of a woman, and utilize the obtained model parameters for shape description. In the first method the model is derived by adaptive subdivision of the body surface into tiny subregions that approximate the surface with high precision, and its parameters are the locations of vertices of the subregions. The second method is based on a B-spline surface fitting to the body surface. The coordinates of the resulting control points are the model parameters. Average body shape can easily be given by averaging corresponding parameter values over many women. Abdominal shape change during pregnancy is represented in the principal component space of body shape and possibility of shape change simulation is stated. The body surface can be transformed into planar development through the 3D B-spline model and related to designing patterns of a brassiere. Skin structure and color are also modeled to simulate real skin texture and to map it on the 3D model surface generated by the second method.

## 1. はじめに

人は自分の容貌や体形に一喜一憂するが、それは容貌や体形が多くのメッセージを他人に伝えるためである。そのために化粧やファッションへの気配りは現代人が社会生活を営む上で必須のアイテムとなっている。人が自信をもって社会生活を送れることを支援するという意味で、ファッション産業、そして形成外科や歯科など身体形状と不可分の医学領域の重要性はますます高まっている。そこには人の体形解析とその結果に基づいた製品のデザイン、化粧や着装のシミュレーション、手術のシミュレーションなどの興味深い課題が山積している。これらの課題を工学的に扱うには人の体形を再構成できたり、図形パターンとして扱えるなどコンピュータによる多様な処理を可能とする手法が不可欠であり、特に個人のアイデンティティとも関わる領域であるだけに各個人の形状をできるかぎり正確に記述する方法が要求される。さらに身体形状を独立して扱うだけでなく、身体と製品との関係を表現

し、場合によっては消費者に提示する技術も必要である。

筆者らはこのうち衣服、特に身体にフィットする補整下着をいかにデザインするかに関心をもっている。デザインに際しては市場を構成する女性の体形分析ならびに着用による造形性の吟味が必要であるが、着用者が下着に求める機能とイメージはブラジャー1つをとってみても単にバスタの造形といった単純なものではなく、女らしさ、清潔感、ヘルシー感、サポート感、安心感など感性的なものから、着けやすさ、品質の長期保持などの実用面まで多岐に渡っている<sup>13),25)</sup>。また近年は、基本機能よりも、着けていてもそうと感じないような着用感を求める人が現れるなど要求が多様になり、また同じ人でも着用する場や時に応じて異なる品質を求めるといった具合に変わってきている。女性の求めるこうした品質が購入行動に反映されることになり、それに的確に応えることが「人にやさしいデザイン」の基本といえる。このようなデザインには人を種々の観点から十分に理解することが不可欠であり、身体形状の把握はその重要な一側面を成している<sup>13)</sup>。

本稿では以上のようなアパレルデザインの観点から、個人ごとの身体形状をどのように記述し、それを応用するののかについて筆者らの試みの一部を紹介する。

Description of Human Body Shape and Related Simulation.  
By Takao Kurokawa (Faculty of Engineering and Design, Kyoto Institute of Technology) and Akio Shinozaki (Human Science Section, Wacoal Corporation).

\*京都工芸繊維大学工学学部

\*\*(株)ワコール人間科学研究所

## 2. モデルによる身体形状の記述

### 2.1 身体形状記述に必要な条件

従来の身体計測は人類学的なサイズ計測法である Martin 法に基づいており、測定具を身体に当てることによってなされる。この方法で得られるデータの大部分はサイズ値であって、それらをすべて用いても被計測者の身体形状を再構成することは難しい。つまり形状は2次元ないし3次元的に分布した曲線や曲面の特徴であり、Martin 法で得られるデータとはまったく異なるものと考えなければならない。

それではどのような条件が満たされれば形状を記述したといえるのか。筆者らは様々な角度から検討し、次のような条件を提案してきた<sup>9)-13)</sup>。

(1) 対象が決れば、一定の記述アルゴリズムが設定できること。これによって記述に客観性が生じる。つまり記述者のいかによらず一定の記述が得られることになる。

(2) 記述からは一定精度で元の形状が再構成できること。この条件が満足されて初めて形状の記述ができたといえるのであり、Martin 法はこれを満たさない。

(3) 全体形状の記述から局所形状の記述を容易に抽出できること。例えば顔の形の記述であればその一部である鼻や唇の形に関する記述が簡単に分離できる必要がある。Fourier 記述子は条件(1)と(2)を満たすことはできるが、全体記述から部分形状データを抽出するのに複雑な処理が必要である。

(4) 得られた記述を用いれば、多数の形状間での比較や、形状の統計処理などができること。ある集団の平均身長が計算できるのと同様のことが形状についても可能でなければならない。

(5) 記述アルゴリズムが簡単で、記述に要するデータ量が少ないこと。

(6) 記述がコンピュータでの処理に適していること。

### 2.2 身体形状モデルと形状記述

すでに2.1の条件を満足する身体の2次元形状および3次元形状の記述法を提案してきた。これは、予め身体形状のモデルを導出しておき、それを個人の体表データ(体表上の多数の点の座標値)に当てはめてモデルのパラメータを決定するものである。このパラメータの組が対象とする形状の記述すなわち形状データとなっており、モデルの当てはめからパラメータ抽出までを行うのが条件(1)のアルゴリズムである。図1はこの過程を表したもので、モデルはすべての対象に共

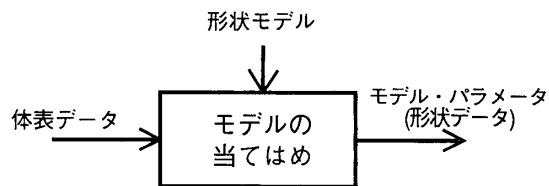


図1 モデルによる形状記述法

通であって、対象ごとの形状特徴はパラメータが表現する。したがってこの方法をパラメトリックな形状記述法と呼べるであろう<sup>11)</sup>。

実は図1の過程は、対象の何らかの性質を計測値によって記述するすべての手法に含まれており、上で述べた形状記述法に特有のものではない。例えば身長計測でいえば、Martin 計測法が身長というサイズ・モデルをもっていて、任意の身体にそれを当てはめることによって1個のパラメータ値が抽出される。これが身長の計測値にはかならない。この値は個人ごとに異なるが、共通のサイズ・モデルを適用することによって同じ意味を付与されており、条件(4)として挙げたように平均値を計算することが可能になるのである。身長とのアナロジーでいえば、図1の過程で抽出される形状データについても複数の対象間での平均値が計算でき、(2)の条件に基づいて平均形状と呼べるものを表現できることになる。

3と4.では上の条件を満足する身体形状の記述法を具体的に述べ、シミュレーションと関係のある応用分野を紹介したい。

## 3. 2次元身体形状の記述とシミュレーション

### 3.1 人体曲線と形状モデルの導出

私たちが体形という場合、鏡に映ったあるいは写真上の身体の輪郭線など2次元の曲線に着目することが多い。そこで本節では、身体を平面に投影した際のシルエットなどを構成する身体各部の曲線を対象として形状モデルを導出する<sup>4),5),17)</sup>。図2は女性の正面像と側面像を対象とした場合の人間工学的に重要な15の曲線を描いたもので、これを人体曲線と呼ぶことにする。鼠蹊溝は着衣の関係で採用できなかった。人体曲線はいずれも2次元身体像上で客観的に決定可能な基準点(端点)によって明確に定義できる<sup>17)</sup>。

形状を記述する最も簡単な方法は、対象曲線を構成の明らかな曲線で近似してそのパラメータを採用することである。筆者らは近似曲線として折線を利用し

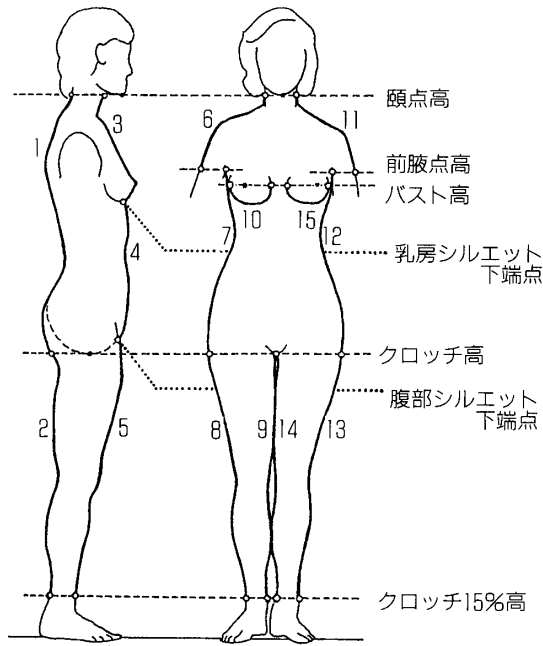


図2 人体曲線の定義

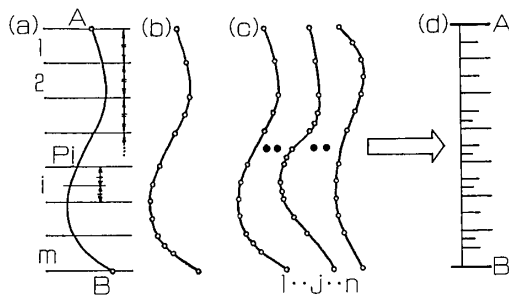


図3 2次元形状モデルの導出. 詳細は本文参照

た. 図3 (a)を人体曲線とし, まず曲線の複雑さに応じて定めた数で, 曲線を垂直方向に等分割する. 分割点を節点と呼ぶことにすると, 節点を順に結べば人体曲線を近似する折線が得られる. 原曲線と折線間の誤差を定義し, 許容値以上の誤差を含む区間についてはさらに曲線を2等分し, 新たな節点を求める(a). この適応的曲線分割を再帰的に反復すれば, 人体曲線を許容誤差内で近似する折線が得られる(b). またその節点を補間すれば原曲線を許容誤差以内の精度で再構成でき, 先の条件のうち(2)を満たすことになる.

同じ手続きを多数のサンプル人体曲線に適用すれば, それらを記述する節点配置(c)が得られる. だがこのままだと曲線ごとに節点配置が異なり, 記述(節点抽出)アルゴリズムが一定とはいえない(図では便宜上各曲線の上下端の高さを揃えているが, アルゴリ

ズムが一定できさえあればこのような正規化は不要であることに注意). そこで全人体曲線について, 抽出手順を異にする節点をすべて集めてみる. (d)はこうして得られた全節点の垂直位置で, どの曲線上の節点集合も含んでいる. 人体曲線上でのこれらの節点配置を形状モデル, また節点座標  $x_i = (x_i, y_i)$  をモデルのパラメータすなわち形状データと考えれば, 冗長ではあるがどのサンプル曲線も記述でき, しかも条件(1)~(3)を満たす. 図1の過程はこれら節点座標値を求める作業に相当する. またモデル導出に用いたサンプル人体曲線の数統計的にみて十分大きければ, 導出された形状モデルはサンプルの母集団の全成員に適用できると考えてよい.

実際に5歳から54歳までの日本女子347名を対象として, 上述の方法で図2の人体曲線を記述する2次元形状モデルを求めたのが図4である. このモデルは173個の節点より成り, 折線を用いれば人体曲線を最大水平誤差5mmで, また黒川らが開発した放物線スプライン<sup>15)</sup>で補間すれば0.6mm程度の水平誤差で再構成が可能である. 節点は各人体曲線を垂直または水平に一定比率で分割する位置にあり, 形状変化の大きい部位に集中している. 人体曲線の性質からみてモデル導出に用いた347名という数は十分と考えられ, 図4のモデルによって日本人女性の人体曲線の99.42%が記述できると考えている<sup>17)</sup>. 人体曲線の両端点の座標があれば, 節点の垂直座標  $y_i$  (乳房部については水平座標) はアルゴリズムによって算出できるので, 記録すべきパラメータの数は181と少なく, 条件(5, 6)も満たされる.

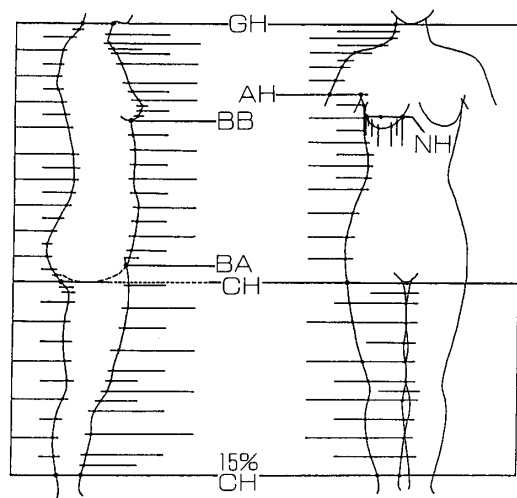


図4 日本人女性の2次元形状モデル. 正面像の左半身の節点は右半身と対称な位置に現れる

### 3.2 平均形状のシミュレーション

前述のとおりモデルの各パラメータは被計測者間と同じ意味をもつので、各種の統計解析手法を適用することができる。その代表例が平均体形の算出であり、広い意味でのシミュレーションの1つとみなせる。すなわち被計測者1と2の節点座標を  $x_{1,i}$  および  $x_{2,i}$  とすれば、

$$x_i = \alpha x_{1,i} + (1-\alpha)x_{2,i} \quad (i=1, \dots, 173) \quad (1)$$

によって被計測者1と2の加重平均形状を算出できる。 $\alpha$  を1から0まで徐々に変化させて形状を再構成すれば1の形状から徐々に2の形状に変化するモーフィングも可能である。また  $\alpha < 0$  または  $\alpha > 1$  に選べば、被計測者1を基準とした2の形状特徴の強調(形状のカリカチュア化または超被計測者2の形状の算出)、あるいはその逆が行える。

また多人数(例えば  $m$  人)を対象とした場合には、

$$x_i = \sum_{q=1}^m \alpha_q x_{q,i} \quad \left( \sum_{q=1}^m \alpha_q = 1, i=1, \dots, 173 \right) \quad (2)$$

によって加重平均形状を算出できる。ここでは  $\alpha_q = 1/m$  として、衣服デザインの分野で必要とされる多数の被計測者の平均形状の例を示す。図5はモデル導出に用いた被計測者を(A)乳房が未形成の未潮者、(B)乳房が形成されている未潮者、(C)既潮未成年者、および(D)成人女性に分類し、側面の各節点座標を平均し、放物線スプラインで再構成したものである。ど

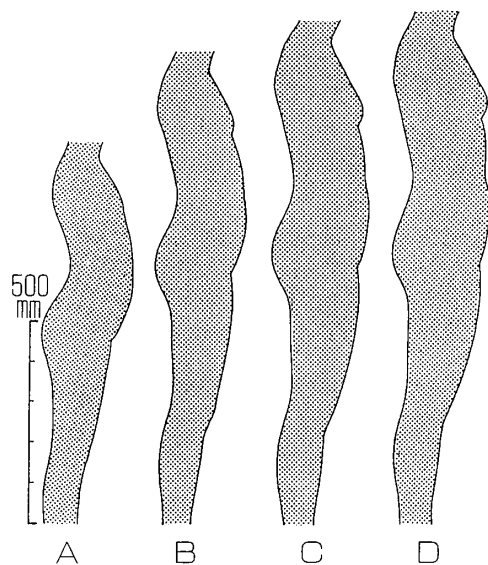


図5 日本女性の平均形状。A: 乳房未形成の未潮者, B: 乳房既形成の未潮者, C: 既潮未成年者, D: 18歳以上の成人女性

のシルエットも各群の体形特徴をよく表現しており、形状記述の平均演算が意味をもつことが明らかである。

この手法を利用して多数の被計測者の年代別、初潮年齢別、出産経験別などの平均形状を求めた結果、多数の事実が明らかになった。例えば、シルエットの年代別平均を重ねることで腹部形状が年齢とともに大きく変化することが判明した。一方ヒップ部は加齢に伴って下垂するという常識に反して、そのような傾向は認められなかった。また初潮が早い人は遅い人よりも身体が一回り大きいことなども判明した<sup>16), 22), 26)</sup>。

### 3.3 体形の主成分分析とその応用

多変量統計解析の1つである主成分分析はデータに含まれる特徴を要約する手法として体形分析に不可欠である。図6は成人女性247名の腹部側面形状の節点を抽出して隣接節点間で  $x$  座標の差分値を求め、それを主成分分析した結果である<sup>5)</sup>。(a)は第1主成分と第2主成分の散布図であるが、因子負荷量より第1主成分は腹部の突出度を、第2主成分は上腹部と下腹部の凹凸のコントラストの大きさを表現することが明らかとなった。実際、散布図における平均値を中心として第1、第2主成分とも  $1.0\sigma$  ( $\sigma$  は標準偏差)、 $-1.0\sigma$  で分類し、5%以上のサンプルを含むカテゴリについて平均シルエットを算出してみると、(b)の5体形が得られた。

ところで上の分析に用いたのとは異なる女性の妊娠の進行に伴う体形変化を同じ散布上に描いたのが図6(a)の軌跡であり、シルエットの変化を描いたのが(c)である<sup>8)</sup>。妊娠中の体形が一般女性に見られる体形を大きく逸脱して推移すること、出産直後は妊娠4ヶ月程度の体形に戻り、徐々に元の体形にまで回復することがわかる。このような事例を多数集めて類型化すれば、妊娠前の体形データから妊娠中の体形変化をシミュレート可能になると考え、現在解析を急いでいる。また同様な方法は年齢に伴う体形変化のシミュレーションにも利用できる筈である。

以上の2次元体形記述法は現在日本人女性の体形分析、体形類型化に用いられるほか、型紙作成、試作下着の評価、官能検査にも役立てられている<sup>13), 18), 22)</sup>。また本アルゴリズムを組み込んだシルエット分析装置が百貨店の下着売場や下着専門店で設置され、体形に関する相談に利用されたり、下着の補整効果を視覚的に確認するための道具として使われたりしている<sup>13), 25)</sup>。

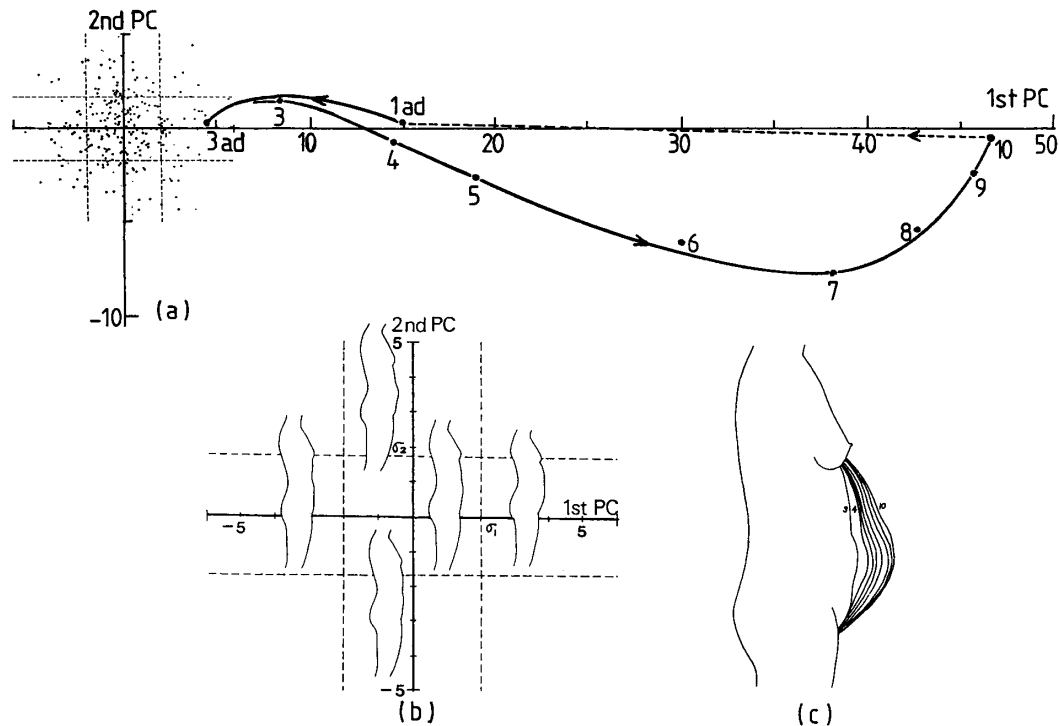


図6 腹部体形の主成分分析と妊婦の体形変化。(a)第1・第2主成分値の散布図と妊婦の体形変化の表現, (b)第1・第2主成分空間における $1.0\sigma$ と $-1.0\sigma$ による分類のうち5%以上のサンプルを含むカテゴリの平均体形, (c)妊婦の腹部体形変化(数字は妊娠月数)

#### 4. 身体の3次元形状モデル

##### 4.1 Bスプラインによる3次元形状モデリング

身体形状は本来3次元的に捉えるべきものである。先の2次元形状のモデリング法は容易に3次元へ拡張可能であり, この方法で黒川らは2種類の顔面形状モデルを提案している<sup>1),9),11),27)</sup>。ここでは衣服デザインへの応用を目的とした体幹部の3次元形状モデルを導出する別の方法を紹介します。このモデルは円筒状の双3次Bスプライン曲面であり, これを体表データにフィッティングして得られる曲面パラメータを形状記述に用いる。このモデルも先の6条件を満す<sup>6),7),11),20)</sup>。

まず体表データに双3次Bスプライン曲面をフィッティングできるように, 体表の点を曲面座標に対応づける。なお体表上には肩峰点, 乳頭点, 腸棘点など17個の基準点と, これらの基準点間の幾何学的操作によりさらに17個の補助基準点が定められており, これらの基準点が被計測者の形状によらず一定の座標値を持つ図8(b)のような $(u, v)$ 平面を作成しておく。最初に, 体内に含まれる3枚の平面を用いて体表を図7の方法で図8(a)の $(r, s)$ 平面と対応させる。次に $(r, s)$ 平面上のすべての点を $(u, v)$ 平面にマッピングする。これには $(r, s)$ 上の基準点を結んで得られる三角形

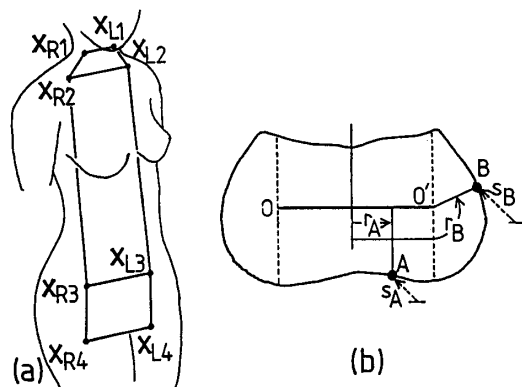


図7 体表データと疑似円筒座標 $(r, s)$ の対応。(a)体内の軸面の定義( $X_{Ri}$ と $X_{Li}$ は上より順に頸高, 頸前点高, 腸棘高, クロッチ高), (b)任意高さにおける体表点AとBに対する $(r, s)$ の定義

が $(u, v)$ 上でも対応する三角形に移るようなマッピングを採用する。点Rを点Uに移す場合, このマッピングは図8の記法を用いて

$$U = \frac{\Delta RBC}{\Delta ABC} A' + \frac{\Delta RCA}{\Delta ABC} B' + \frac{\Delta RAB}{\Delta ABC} C' \quad (3)$$

と表せる。こうして体表データは $(u, v)$ 座標と対応がとれ, 体表データに $u$ と $v$ を曲面座標とする双3次Bスプライン曲面

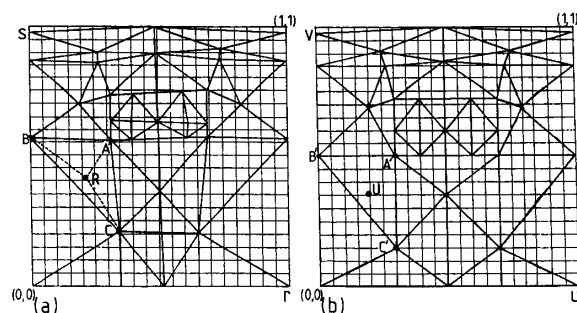


図8  $(r, s)$  平面から  $(u, v)$  平面への正規化.  $(u, v)$  平面は B スプラインの曲面座標.  $(r, s)$  平面の三角形 ABC 内の点  $R$  は  $(u, v)$  平面の対応三角形  $A'B'C'$  内の点  $U$  に移る

$$p(u, v) = \sum_i^I \sum_j^J N_{i,4}(u) N_{j,4}(v) x_{i,j} \quad (4)$$

を最小 2 乗誤差フィッティングできるようにする. ここで  $p(u, v)$  は座標  $(u, v)$  に対応する曲面上の点の 3 次元座標で, 体表データの近似値となる. また  $N_{i,4}$  は 4 階のスプライン関数を表す. なおフィッティング時に  $u=0$  と  $u=1$  に対応する 3 次元曲線(背部正中線)が一致して曲面が滑らかに接続するよう条件設定を行っておく. このとき上記の B スプラインを使用するという前提のもとで  $(u, v)$  平面は体幹部の形状モデルとなり, 体表データにフィットさせたスプライン曲面の制御点の座標  $x_{i,j} = (x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$  が曲面形状を完全に決定するという意味でモデルのパラメータとなる. このパラメータから形状を再構成するのは容易である.

ところで図 8 の (b) には (a) と比べて大きく形が変わった部分がある. これは形状モデルで重要な部位を高精度表現するために, 特に乳房部(中央 2 個の菱形領域)を拡大したことによる. この結果乳房部で制御点が高密度になり, 乳房部に B スプラインの形状表現力が集中されることになる. この方法は逆に乳房部周辺の曲面表現力を低下させるが, 乳房周辺の形状は比較的単調であるから問題とならない.

以上の方法で得られる種々の形状モデルを吟味した結果, 頤点からクロッチ高までの日本人女性の体幹部を対象とする場合,  $I=30, J=25$  とすれば, 許容誤差 2 mm という基準下ではほぼ満足できる形状表現が可能となることが判明した.

#### 4.2 3次元平均形状の算出

式(2)と同様にモデルのパラメータである制御点の座標  $x$  を任意の数の被計測者間で平均すれば, 3次元の平均形状を算出できる. まず本モデルを 2 名の被計

測者の体表データに適用し, コンピュータ・グラフィックス(CG)で再構成した例が図 9 の左右の像である. 両者のパラメータを算術平均して, 同様に表示すると中央の像が得られ, 各部のサイズや形状が平均化できていることが確認できる. さらにこの手法を用いて女性 18 名の平均形状を求めたものを図 10 に示す. 個人の体形にはそれぞれ固有の特徴があるが, 平均化によってそれらが弱められて女性としての特徴のみが残ってくるのがわかる.

#### 4.3 形状モデルを対象とした身体計測

下着デザインのための身体計測項目数は百数十にもなり, 被計測者の心理的, 肉体的負担は大きい. また計測には多くの人間因子が関与し, 計測値への誤差混入は避けられない. 3次元形状モデルはこのような身体計測の状況を大きく変える可能性をもっている. それは予め被計測者のモデル・パラメータを求めておけば, 生身ではなくてモデルを対象として自動計測が行えるからである. 筆者らは高度, 横径, 厚径などの直線状の長さ, 周径や丈などの体表に沿った長さ, 断面積などについて自動計測のアルゴリズムを検討してきた<sup>7),24)</sup>. 現在新 JIS を定めるために全国的な身体計測が実施されているが, そこでも 3次元体表データが計測され, 類似の計画が進められている.

ただこの方法には 1つの難点が存在する. 従来の Martin 法では骨格を中心として計測点が見つけられ, 計測者が触察によって計測点を見つけていた. ところがモデルがもっているのは体表の形状情報と少数の基準点座標であり, 骨格に基礎を置く計測には限られた対応しかできない. 技術革新のなかで身体計測は岐路にさしかかっているといえよう.

#### 4.4 体表の展開

身体の展開図は衣服デザインに必須のデータである. よく用いられるのは伸縮性のない柔らかい紙やフ

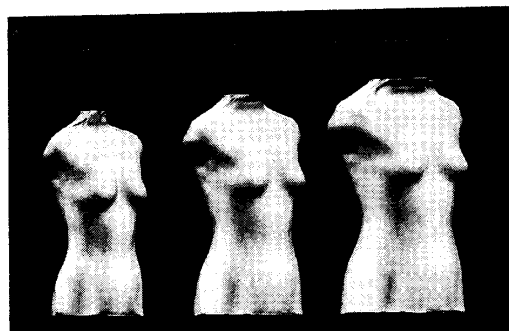


図9 3次元身体形状とその平均化演算. 中央の像は左右の像の平均形状

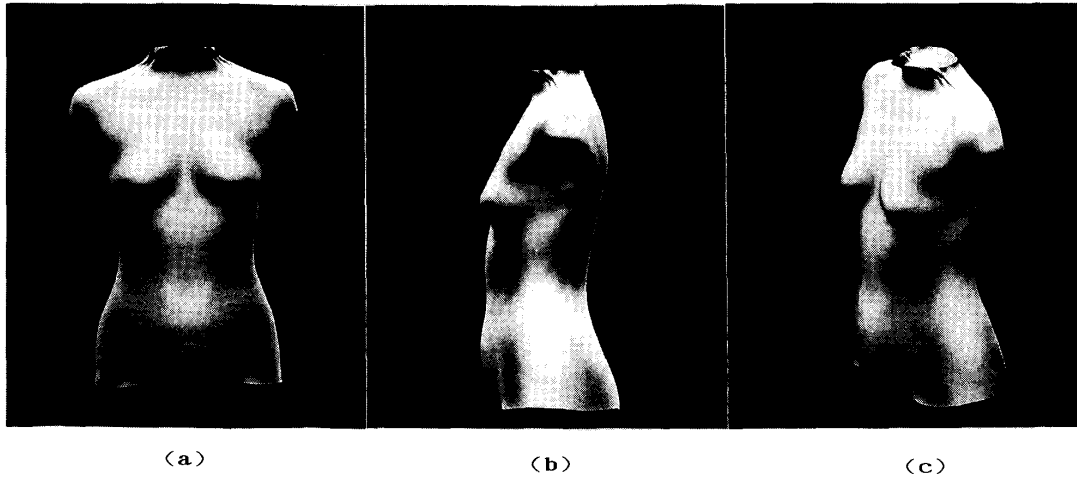


図10 日本人女性18名の平均形状

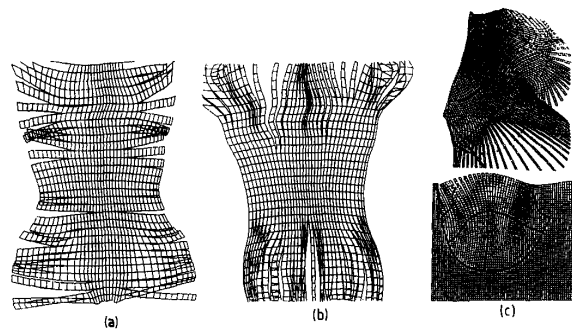
フィルムを身体に張りつけた後、それを剥がして平面状に展開する方法である。4.1のモデルは曲面であるので、この方法をシミュレートするのは極めて容易である。

体表を展開するにはまずBスプラインを曲面座標  $u, v$  に沿って格子状に細分割し、体表を多数の疑似4辺形の集合として表現する。この分割は各疑似4辺形が近似的に平面とみなせるようになるまで反復する。次にこれらを平面上に移し、4辺形のうち適当なものを展開中心として  $u$  または  $v$  方向に接続する。図11(a)と(b)は平面展開の例で、それぞれ同じ部分を  $u$  方向と  $v$  方向に接続したものである。

平面展開図の1つの応用目的に型紙作成がある。外衣については各種の自動型紙作成法が提案され、実用に供されている。しかし身体に密着し、さらに補整機能が重視される下着に関しては身体に関する豊富な知識と経験、デザイナーの感性が求められ、型紙の自動作成はもとより、CAD化も遅れている。上のような微小要素による展開図を型紙に近づけるために従来より各種の要素接続法が提案されているが、筆者らもブラジャーを対象としてコンピュータ処理向きの接続法を検討している。図11(c)は処理の例で、前述の展開中心を乳房部の適当な位置に置くことにより、ブラジャーのカップ部の3枚の型紙に近いものが得られている<sup>19)</sup>。実際の型紙を作成するには布素材の物性値や身体との相互作用を導入する必要があり、残された課題は多い。

## 5. 外力による体形変化のシミュレーション

衣服着用時の形状は身体と衣服の力学的な相互作用

図11 体表の平面展開。(a)  $u$  方向への接続、(b)  $v$  方向への接続、(c) 乳房部の展開によるブラジャー型紙の導出

の平衡点として決定される。この場合の衣服を含めた外観を表現することは着装シミュレーションと呼ばれ、外衣についての研究がある<sup>23)</sup>。しかし身体が受ける衣服圧による変形まではまだ考慮されていない。ところが補整下着では、体形の補整を最大の使命としており、着装シミュレーションにおいては身体形状の変化の導入が不可欠である。筆者らは現在そのための基礎的な検討を行っており、その一部をここで紹介する。

身体の場合、外的な力は主として重力と衣服圧によってもたらされる。これら外力の影響は軟組織の多い乳房部と臀部で大きく、逆に補整効果も上がることになる。実際の組織は複雑であり、しかもその力学的性質はほとんど知られていない。そこで軟組織を有限要素分割してそれぞれをバネによって記述し、それに力を加えた場合の形状変化が実験を通して得られる身体特性と一致するようにモデルの力学的特性を定めるこ

とでこの問題を解決することを試みている。

図12(a)は乳房の無重力時の推定3次元形状に重力を加えた場合のシミュレーションである。正立時の形状をシミュレートするようにモデル特性を定めて、他の姿勢における形状を実験結果(破線)と比較したものを同図(b)に示す。倒立時の場合を除けばシミュレーション結果と実際の形状が比較的良好に一致する。倒立時の不一致はモデルでの乳房と胸部の関係が実際の身体構造を反映していないことに起因すると思われる。このシミュレーション結果から、乳房内部のバネ定数に対して皮膚のバネ定数が相当大きいと推定される。

この手法を発展させることで局所的な外力に対しても生体と同様の挙動をするモデルを求め、着装シミュレーションに結びつけたいと考えている。それには4.の形状モデルにここで力学的モデルを組み込むことが課題である。

## 6. 皮膚のモデルとシミュレーション

### 6.1 皮膚のモデル

4.で紹介したような形状記述からのCGによる再構成像の表示は人の感性との交流のためのインタフェースであり、化粧や着装のシミュレーションにおいては形状の高精度表示だけでなく、皮膚のリアルな表現も求められる。身体をよりリアルに表現することによって、人はより正確に、より直感的に、表示されている身体とその性状を理解できる筈である。

ところがCG表示のための皮膚モデルに関する研究は少なく、CG中の人物像の皮膚はプラスチックの人形の体表のように表示されるのが通例であった。そのなかで石井らによるVoronoi分割を利用した皮膚構造のモデルはリアルな皮膚表面の表現法として興味深い<sup>2),3)</sup>。一方、黒川と島田は皮膚形状だけでなく、皮膚色も重要と考え、皮膚形状モデルと皮膚色モ

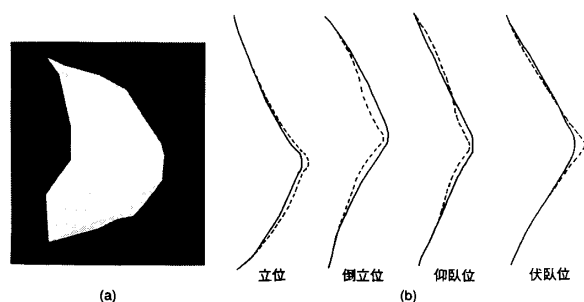


図12 外力に対する身体形状変化のシミュレーション。(a)重力下の乳房形状、(b)各種姿勢における乳房形状(乳頭を通る断面図)。破線は実験結果

デルより成る皮膚モデルを先に開発している<sup>14),21)</sup>。以下は後者の簡単な紹介である。

皮膚の表面は多様な凹凸を成していて、表面を網目状に走る皮溝とそれに囲まれた皮丘を区別できる。皮膚の表面構造は部位によって異なり、個人差、年齢差も大きい。指紋が個人識別の重要な手がかりであることはよく知られている。一方、皮膚の色は皮膚の固有色、血液の透視色、皮膚色素、皮膚中の異常色素などを要素とし、これに人種、性、年齢、体質、健康状態、衣食住などの因子が加わって広範囲に変動する。

皮膚モデルを互に独立した皮膚の表面形状モデルと皮膚色モデルから構成する。両モデルとも多数のパラメータをもち、その値によって皮膚の特性を表現することにする。

#### (a) 皮膚の表面形状モデル

長方形の $(p, q)$ 平面上に皮溝を分布させ、点 $(p, q)$ での高さ $f(p, q)$ によって皮膚の3次元構造を表す。皮膚の解析結果に基づいて、皮溝の基本構造を図13(a)および図14(a)のようなモデルで表現し、これに皮溝の分布と3次元構造に関するパラメータに応じた変形を加えることによって種々の皮膚形状をシミュレートする。設定したパラメータは、単位面積内における皮溝数、主方向からの皮溝の局所的偏位量、初期状態からの皮溝の再帰的分割回数、各方向における皮溝の生起確率、各方向の皮溝の深さ、皮溝の最大深さの6種である。以上のパラメータによって皮膚形状 $f(p, q)$ を生成する方法は次の通りである。

1)皮溝数と分割回数によって図13(a)の基本モデルを生成し、2)皮溝分割点を偏位量と一様乱数に基づいてランダムに偏位させる。この段階でモデルは図

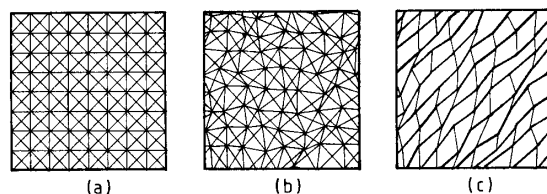


図13 皮溝の平面構造。(a)皮溝の基本モデル、(b)皮溝の偏位、(c)皮溝の生起確率と幅、深さの導入

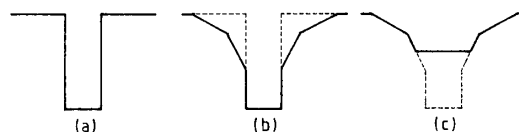


図14 皮溝の断面構造。(a)皮溝断面の基本モデル、(b)断面の平滑化、(c)幅と深さの導入



13(b)のように変化する。3)皮溝生起確率と深さを用いてモデルを同図(c)のように変形する。4)図14(b)のように皮溝の周りの高さを少し下げ、皮丘に丸みや高低の変化をつける。5)最大深さよりも深い皮溝部を図14(c)のように最大値に合わせる。この処理で深い皮溝は幅の広い皮溝に変換される。最終的に得られる $f(p, q)$ をバンプ・パターンとして用いる。

#### (b) 皮膚色のモデル

皮膚色のモデルはディスプレイの3原色に対応するテクスチャ・パターン $c_r(p, q)$ ,  $c_g(p, q)$ ,  $c_b(p, q)$ である。パラメータとして皮膚の基準色、基準色からの偏位値、スポット形状係数、スポット分割限度の4種を定義する。どの色の場合もテクスチャ・パターンの生成手順は以下の通りである。

1)テクスチャ・パターンの要素すべてに基準色を入れる。2) $(p, q)$ 平面の4頂点の色偏位量を基準色からの偏位値と一様乱数から計算する。3)長方形を各辺の中点を用いて4等分し、その頂点のうち偏位量未定義の点の色偏位量を2)と同様に計算する。ただし分割回数がスポット分割限度を越えた後は、新しく求まる点の色偏位量はその辺の両端における色偏位量の間ランダムに入るようにする。この際スポット形状係数を偏位量の算出に用いる。以上の過程を微小4辺形の辺長が1ピクセル間隔になるまで再帰的に反復する。4)最後にすべての点について求められた色偏位量を $c(p, q)$ に加算する。

スポット分割限度はスポットの大きさを決める効果をもち、スポット形状係数はスポットの形を変える効果をもつ。

#### 6.2 皮膚のシミュレーション

モデルの各パラメータに数値を与えれば皮膚形状と皮膚色を独立にあるいは重ねてCG表示することができる。図15(a)は基本モデルに6.1(a)の2)の変形を加えたものである。さらに皮溝の生起確率を導入し、皮溝の深さと幅に変化を加えると(b)のように皮溝の流れに方向性が生じて、皮膚の質感を出すことができる。皮膚色については6.1(b)の処理によって図16(a)のようなテクスチャ・パターンを生成できる。この例は分割回数を9、スポット分割限度を5としたもので、スポットの大きさが比較的小さい。図15(b)の皮膚形状に図16(a)の皮膚色を重ねて表示した例を図16(b)に示すが、リアリティの高い皮膚テクスチャがシミュレートできることがわかる。

さらに身体部位に応じた皮膚テクスチャを作成して、形状パターンをバンプ・マッピング、皮膚色パ

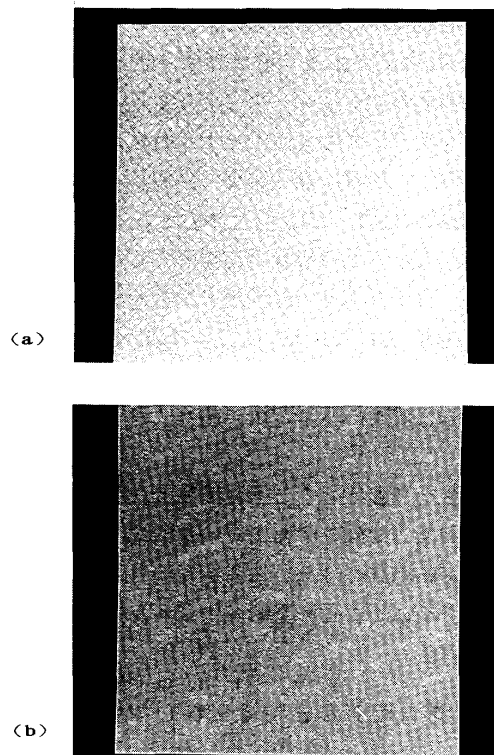


図15 皮膚構造のシミュレーション。(a)皮溝基本モデルの変形、(b)皮溝の主方向の表現

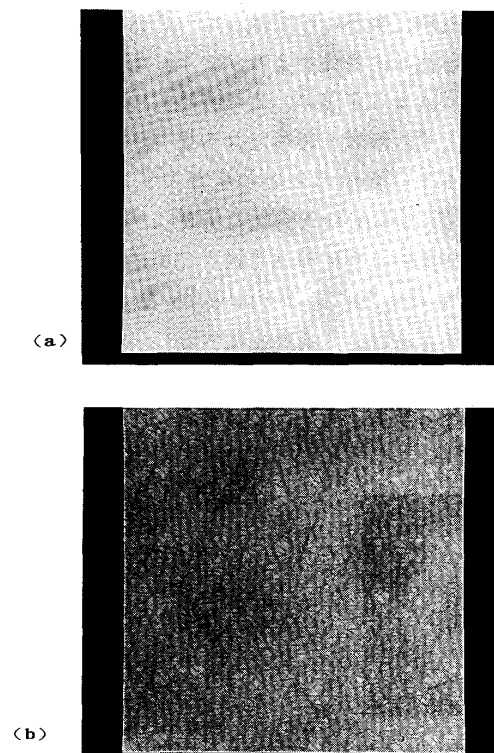


図16 (a)皮膚の色スポットのシミュレーション、(b)(a)と図15(b)の重ね合わせ表示

ーンをテクスチャ・マッピングによって4.の身体形状の再構成像に張りつけた<sup>14),21)</sup>。像を相当拡大しないと皮溝を確認することはできないが、再構成像が小さい場合でも皮膚に凹凸と色の変化が存在することが感じられ、テクスチャ・マッピングを行う以前の表示に対比してリアリティが格段に増大する。

## 7. おわりに

モデルのパラメータによって身体形状を高精度で記述する方法を述べるとともに、身体形状に関連するいくつかのシミュレーションの紹介をした。これらは研究途上にあり、完成された手法や結論でないことを御了解願いたい。身体は一刻も静止状態になく、これ以上の精度で記述することにはあまり意味がないであろう。

ここで紹介した形状記述法は体表データの計測の仕方には依存しない。またこれらのモデルの導出法を身体以外のものに適用することも可能であり、相互に対応点をもつ仮面、壺、古墳、車両、航空機などが有望な対象ではないかと考えている。

身体形状のシミュレーションは非常に興味ある分野であるが、意外に研究が進んでいない。一部のアニメーションのようにそれらしく見えればよいという場合を除けば、生体に関して判明している性質が少ないこと、生体組織の複雑なことがモデリングとシミュレーションの研究にブレーキをかけているようである。この領域での今後の進展を期待したい。

最後に本稿を準備するに当たって図12のデータを提供してくれた京都工芸繊維大学工学部学生山田英司君に感謝する。

## 参考文献

- 1) 広田, 黒川, 山田, 高田, 土屋: 再構成やパターン分析の可能な顔面3次元形状の記述法, 第17回画像工学コンファレンス論文集, 63/66 (1986)
- 2) 石井, 安田, 横井, 鳥脇: 皮膚の質感表現, 人物のモデリングと表示技術セミナー資料, 29/44 (1991)
- 3) 石井, 倉地, 安田, 横井, 鳥脇: ポロノイ分割を利用した皮膚表面の質感表現, 1992 NICOGRAPH 論文集, 58/66 (1992)
- 4) N. Ito, T. Kurokawa, A. Shinozaki and H. Nakano: Measurement of human body form using pattern processing techniques, Proc. 8th Congress of International Ergonomics Assoc., 220/221 (1982)
- 5) 伊東, 芝田, 黒川, 篠崎, 中野: 人体体型の記述および解析のための新しい方法, 昭58日本人間工学会関西支部大会論文集, 33/40 (1983)
- 6) 岸本, 紅野, 黒川, 篠崎: 衣服CADのための人体3次元形状モデル, 1991画像工学コンファレンス論文集, 235/238 (1991)
- 7) 紅野: 人体3次元形状の高精度モデリングとその応用, 京都工芸繊維大学大学院修士学位請求論文 (1993)
- 8) 黒川: 妊産婦の体型変化の解析, Body Lines, 7-3, 64-66 (1985)
- 9) 黒川: 身体形状の計測と記述, 化粧文化, 17, 83/96 (1987)
- 10) 黒川: 人体形状の計測と記述, 機械学会「最近の画像処理技術」資料, 71/74 (1989)
- 11) 黒川: 人体形状のパラメトリック・モデリングとその応用, Proc. International Symposium "Computer World '90", 210/217 (1990)
- 12) 黒川: 人体形状のモデル化とそれを応用した女性の体形分析, 画像ラボ, 2-12, 35/38 (1991)
- 13) 黒川: 人体形状モデルとそれを応用した人にやさしい衣服設計, 感覚計測と繊維製品設計フォーラム資料, 1/9 (1993)
- 14) 黒川: コンピュータ・グラフィックスによる身体表現のための皮膚テクスチャのモデル, 京都工芸繊維大学地域共同研究センター成果報告書, 2, 11/20 (1993)
- 15) 黒川, 榎, 伊東: 特徴点列補間のための放物線スプライン, 計測自動制御学会論文集, 19-9, 713/717 (1983)
- 16) 黒川, 広田, 篠崎, 中野: 下着デザインのための2次元および3次元身体形状の計測と記述, Human Interface News and Report, 2-1, 27/36 (1987)
- 17) 黒川, 伊東, 篠崎, 中野: 人の体型記述の一方法, 計測自動制御学会論文集, 20, 829/836 (1984)
- 18) 黒川, 岸本, 篠崎: 日本女性の体型分析——コンピュータは人の眼に代りえるか——, Human Interface News and Report, 6-3, 180/187 (1991)
- 19) 黒川, 西村: 3次元人体モデルを利用した型紙作成I, 体表展開図からの型紙の導出, 京都工芸繊維大学アパレル科学研究センター研究報告, 9, 148/154 (1991)
- 20) 黒川, 西村: 3次元人体モデルを利用した型紙作成II, 人体形状モデルの導出と日本人女性への適用, 京都工芸繊維大学アパレル科学研究センター研究報告, 10, 132/141 (1992)
- 21) 黒川, 島田: コンピュータ・グラフィックスのための皮膚モデルとそれを用いた皮膚テクスチャのパラメータ表現, Human Interface News & Report, 6-1, 59/64 (1991)
- 22) 黒川, 篠崎, 中野: シルエット (2次元身体形状) 分析装置の下着デザインへの応用, Human Interface News and Report, 2-1, 65/74 (1987)
- 23) H. Okabe, H. Imaoka, T. Tomiha and H. Niwaya: Three dimensional apparel CAD system, Computer Graphics, 26-2, 105/110 (1992)
- 24) 小野, 黒川, 中野: 3次元モデルに基づく人体寸法の計測, 昭58日本人間工学会関西支部大会論文集, 41/48 (1983)
- 25) 篠崎: ハイタッチなものの作り, Human Interface News and Report, 6-4, 315/318 (1991)
- 26) ワコール編: '85ワコールからだセミナー「体型変化とヒップ」資料, 12/23 (1985)
- 27) 山本, 黒川, 土屋: 対象顔面に依存しない曲面構造による顔の3次元形状記述法, Human Interface News and Report, 4, 13/18 (1989)