人体形状の変異と産業応用

持 丸 正 明*

要旨

人体表面の3次元形状の変異（種間差，人種差，世代差，性差，個人差など）を扱うのに，人体形状を発生学・解剖学的な対応に基づいてモデル化し，そのかたちの違いを空間の歪関数として記述する方法がある．これは，20世紀初頭に提案された方法で，20世紀末になり数学的に具現化され盛んに利用されるようになった．ここでは，そのひとつである Free Form Deformation 法を用いて人体形状の変異を可視化するとともに，その変異の特徴を分布図として表現する技術を概説する．また，その技術を人体形状にフィットする製品の設計に応用した研究を紹介し，それをベースにした持続的な人体形状データ蓄積への展望を述べる．

1. D'Arcy Thompson と FFD

D'Arcy W Thompson が 1917 年に著した「On Growth and Form」¹⁾ は，生物の形の変異を数学的に表現し，その説明を試みたもので，20世紀の生物形態学研究者のバイブルと言えるものである．1942年に Thompson 自身が改訂したものが，1000ページを超えるペーパーバック版として 1992年に再版され，現在でも新書が入手可能である．この書籍の最終章に2つの生物の形の差を空間の歪みで表現するアイデアが示されている（図1）．Thompson 自身は作図的にこの歪みを求めていただけで，格子歪みの数学モデルは提案されていない．その後，これを具現化する数学手段がいくつか試みられたが，1991年に Fred L. Bookstein によって提案された“Thin-Plate Spline 法”²⁾ がもっとも決定的な方法であった．これは2つの形態の対応をランドマーク（解剖学的特徴点）によって決定し，対応するランドマーク間の距離を最小にし，かつ，平面内の歪みが連続的になるような変形格子を計算する方法である．ランドマーク間距離を最小にするエネルギーを外部エネルギーとし，格子の歪みを最小にする内部エネルギーとして薄板の変形エネルギーを用い

図1 ハリセンボンからマンボウへ（文献1の図を改変）

た．すなわち，平面内の格子の変形量を第3次元の移動量として考え，3次元的な薄板の変形エネルギー（まさしくスプライン）を最小化したわけである．この方法は，生物の形態分析として現在でもよく利用されている（図2）^{3, 4)}．

Bookstein とほぼ同時期に，コンピュータグラフィックスの分野でも同様の技術が提案された．Thomas W. Sederberg による Free Form Deformation 法⁵⁾（以下，FFD）である．コンピュータ上に記述された3次元形状データの周辺に制御格子点を配置し，それを動かすことで内部の形状をなめら

2005年2月8日受付

* 産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター

〒135-0064 東京都江東区青海 2-41-6

Tel: 03-3599-8194 Fax: 03-5530-2066

E-mail: m-mochimaru@aist.go.jp

キーワード：人体形状，形状計測，多次元尺度法，人間工学

図2 Thin-Plate Splineによる形態分析。下顎第一大臼歯を下顎第三大臼歯に変換（文献3の図を改変）

図3 Free Form Deformationによる足形状変換。平均足を個別足に、平均靴型を個別靴型に変換

かに変形する技術である。3次元形状データ点が制御格子点をベースとしたベジェ関数で記述されており、格子を動かして形状を変化することは容易であるが、目標形状に一致するように変形させるための最適格子変形量を計算するのは容易ではなかった。1992年にHsuらがこれをB-Spline関数に拡張し、最適格子変形量の逆計算問題を解決した⁶⁾。筆者らはこのFFDを人体形状変異の定式化に適用した⁷⁾(図3)。人間の体の形の違い(人種差, 世代差, 性差, 個人差)を空間の歪みとして定式化し、分析・合成・応用しているというものである。

2. 人体形状の相同モデル

筆者らが改良したFFDでは、2つの人体形状を変換するための最適格子変形量を計算するために、外部エネルギーとして2つの人体形状の対応点間距離の2乗に比例するエネルギーを、内部エネルギーとして隣接する格子の移動量に比例する弾性エネルギーを想定した。両者の総和を最小にする格子変形量を非線形最適化問題として解いたわけである。2次元のThin-Plate Splineに比べ、3次元のFFDは格子点数が圧倒的に多くなる。このため、生物の体表面上で発生学

図4 特徴断面に基づく人体形状相同モデル

的・解剖学的に定義できるランドマークの数だけでは十分な外部エネルギーを得られない。そこで、筆者らは発生学的・解剖学的に対応付けられる体表面ランドマークをベースに、人体3次元形状データを同一点数、同一幾何学構造の多面体モデル(ポリゴンモデル)として再構成することとした。筆者らはこれを人体形状の相同モデル化(Homologous Body Shape Modeling)と呼んでいる。

相同モデルの構成には、ランドマークによって決定される特徴断面を利用した。筆者らが人体の形を扱った動機が靴や衣服・メガネなどの工業製品の適合設計にあり、これらの分野では人体の周囲長(特徴断面の周径)がよく利用されていたためである。そもそも、人体はほぼ円筒に近い形状をしており、特徴断面で分割した後、断面内を再分割することで相同モデルを構成する方策は、人体のさまざまな部位に適用できた(図4)。

一方で、特徴断面による相同モデル化には2つの問題があった。1つは対応付けできるデータ点の数に自ずと限界があるということである。足部や胴体部、顔部などそれぞれ数百点の対応頂点で記述することになる。形状のおおまかな特徴は十分に表現できるが、細かい特徴は反映できない。第2は汎用性である。相同モデルは部位ごとに定義が異なり、ソフトウェア化するにも、それぞれ異なるプログラムを開発しなければならなかった。2003年のSIGGRAPH(コンピュータグラフィクスに関する世界最大の学会)に、これを解決する新しい方法が提案された。Allenらによって開発された技術は、細分割曲面という技術で人体の標準ポリゴンモデルのポリゴン数を2倍、4倍、8倍と増やしながら、それを実測した表面データにフィットさせていく方法⁸⁾である。標準ポリゴンモデル上に定義されていたランドマーク位置は、実測したランドマークに正確にフィットする。標準ポリゴンモデルを2ⁿ倍に増やすわけであるから、どの人体データにフィットさせてもポリゴン数は同じ

図5 細分割曲面による足部形状相同モデル

になる。すなわち、ランドマークの対応がつき、同一点数で、同一幾何学構造の形状モデルを構成できることになる。標準ポリゴンモデルが部位などに依存する基本構造情報を持っており、モデル化するプログラム自体は汎用的である。また、細分割曲面でポリゴンを分割するため、数千点から数万点のデータ点の対応を付けることが可能で、特徴断面による相同モデルより精細な形状を表現できる。筆者らもこの方法を改良し、足部の形状モデルを行った⁹⁾。図5(a)が特徴断面による標準モデル(約300頂点)で図中の薄く見えるのが実測したデータ点群である。大きな点として表示されているのは、ランドマークを意味する。(b)は標準モデルを4倍に細分割し、ランドマークと点群にフィットするように変形した結果、(c)は16倍まで細分割してフィットした結果である。頂点数は5000点以上になっている。形状特徴をよく反映した相同モデルが構成されていることがお分かりいただろう。

3. 人体形状の変異

相同モデルはすべてのデータ点の対応がついているので、形状間の距離(非類似度)を容易に計算しうる。複数の人体形状データが得られれば、その距離関係行列を求め、それを再現する形状布置(分布図)を計算することができる。これには多次元尺度法を利用した⁷⁾。この方法を用いて、さまざまな人体形状の変異を定式化できる。図6は、種間差の例としてネアンデルタール人頭蓋骨(アムッド、男性1体)と現代人頭蓋骨(インド人男性6体, インド人女性2体, 日本人男性2体)を相同モデル化し、分布図を計算した結果を示している。第1軸が種間差, 第2軸が現生人類内の人種差に相当している。系統樹上でも現生人類とは異なると考えられているネアンデルタール人は、大きくごつい頭蓋形状で眼窩の上が底のように突出した特徴を持つ。図を見て明らかなように、現生人類の人種差と比べても大きくかけ離れた形状である¹⁰⁾。図7は現代人の人種差(地域差)である。同一足長(250.8~259.3)の北米人の平均足形状

図6 頭蓋骨の種間差

図7 足部3次元形状の人種差(地域差)

図8 日本人頭顔部3次元形状の性差

と日本人の平均足形状(ともに20歳前後のシティランナー)を相互に変換するFFD変形格子を計算すると図8のようになる。同一足長で比較した場合、日本人の足は甲が低く舟状骨が内側に張り出してつま先が外側に振れていることが分かる。一方で、足幅はそれほど大きな差を持っているわけではない。日本人が北米人向けのシューズを履いたとき、小指側がぶつかるのはシューズのウィズ(幅)が細いと言うより、このような足形状の差に起因すると考えられる。

続いて、性差を図8に示す。これは現代人青年男子（20歳代）と青年女子（20歳代）各52名の頭顔部平均形状の違いをFFD変形格子で可視化したものである。プロポーションの差が明瞭になるように、顔の高さで正規化してある。図を見て明らかなように、女性は相対的に下顎骨の幅が狭く頭蓋の幅が広い。また、額の部分が前方にやや張り出し気味になっていることが分かる。

4. 形状の合成と産業応用

上記のような地域差、世代差や性差の定式化は形態学的な興味だけでなく、産業応用としての意義を持つ。いうまでもなく、地域や年齢層を考慮した適合製品の設計・開発である。事実、筆者らの所属する研究センターで独自に計測しているデータの大半は、学術目的ではなく、企業との共同研究によるものである。その一部をご紹介します。

図9は日本人青年男子（20歳代）の顔形状の分布図である。これはメガネフレームの効果的なサイズ分類を目的とした研究の成果である¹¹⁾。顔形状は耳珠から鼻深部までの長さとし、彫りの深さを第1軸、左右の幅と額の前傾斜の特徴を第2軸とするような分布図でその個人差の83%を表現できることが分かった。そこで、この分布を効率的にカバーするような4つのサイズ分類を考え、分布図上に位置する仮想形状をコンピュータ上で合成した。これは分布軸に沿った形状の変異パターンをFFDの空間歪みとして定式化する技術で、これを用いれば分布図上の任意の位置に存在する

図9 日本人青年男子の顔形状分布図と合成した仮想形状

であろう仮想形状を合成できる¹²⁾。大量生産品の設計では特定の個人のデータはあまり重要ではなく、分布の中央や周辺部に存在する仮想形状を合成でき、さらにその仮想形状の出現頻度を確率的に予想できることが重要である。従来の人体寸法に基づく主成分分析では、このような形状の合成が不可能であり、この点が3次元形状をモデル化して扱う最大の効能と言える。ちなみに、この4つの群を代表する平均形状に基づいて新しいメガネフレームが設計され、その有効性を定量的に検証した後、同製品は「co-co-chi」という名称で市販されている。機会があればかけ心地をお試しいただきたい。

量産品への適用の次は個別対応製品の設計応用である⁷⁾。FFDの紹介として掲げた図3が個別対応設計の模式図である。平均的な人体形状と個人の人体形状の変異をFFD変形格子として定式化し、その変形格子を平均形状に合わせて設計された量産製品形状に適用すると、コンピュータ上で個人の形状にあう製品形状を構成できる。図10は平均的な足形状を幅広の足形状に変換するFFD変形格子である。ボール部と呼ばれる親指と小指の付け根の部分は確かに広

図10 足部3次元形状の個人差（平均足から幅広足へ）

図11 FFDに基づく個別対応靴型と従来グレーディング法による幅広靴型。細線が従来法、太線がFFD。

くなっているが、指の高さや踵の幅はほとんど変わっていないことが分かる。これはアロメトリーと呼ばれる生物共通の特徴で、サイズが変わるときに数学的相似変形をせずにプロポーションが変化することを示している。同じ足長サイズで足幅が広がるという変化でも、図のような非相似的な変形が生じており、その3次元的なアロメトリーの情報をFFD変形格子が保持していることになる。靴は靴型という元型をベースに作られるので、ここでは足の個人差に応じて靴型の変換を試みた。図11に示すように、グレーディングと呼ばれる足幅サイズを増やす既存の靴型変換技術と比べると、つま先部が広く薄く、踵部が狭いなど個人の足形状特性をよく反映していることが分かる。

5. 人体形状の持続的な蓄積と再利用

人体3次元形状をランドマーク情報に基づいて相同モデル化し、その集団間の変異や集団内の個人差を統計的に定式化するとともに、仮想形状を合成する技術を紹介した。近年、3次元人体形状計測装置の性能が向上するとともに価格が下がり¹³⁾、これらの装置が店頭で置かれ消費者個人の体を測って、その場で適合製品を検索したり、個別対応するサービスが始まっている。オンデマンド着装品ビジネスである¹⁴⁾。本稿で紹介した相同モデル化技術や統計処理技術などが、すでに市販の3次元人体形状計測装置に組み込まれている。すなわち、形状計測装置を店頭で据えて消費者の体を測れば、消費者にサービスできるだけでなく、消費者集団の特徴を知り、それを製品設計に反映できる技術基盤が整いつつある。筆者らは、このように店舗単位で蓄積される人体形状データを匿名データとしてネットワーク上に蓄積し、消費者自身が自分の形状データにアクセスでき再利用できる（たとえばネットショッピングで靴を買うときなど）インフラの創成を目指している。従来は、研究室単位で数百例のサンプルを集めるのが精一杯であったが、これからは世界規模で数億人のデータサンプルを蓄積できるようになるかも知れない。子どもの頃から成長に伴う形状変化を追跡記録できるようにもなる。蓄積されたデータは即座にモデル化され、個人の3次元形状の特徴を捉えるとともに、集団の統計的特徴を知ることができる。D'Arcy Thompsonから100年。いま、人体形状データの持続的蓄積と再利用の時代が来ようとしている。

参考文献

- 1) Thompson, D. W.: On Growth and Form, Cambridge University Press, (1917).
- 2) Bookstein, F. L.: Morphometric tools for landmark data Geometry and Biology, Cambridge University Press, (1991).
- 3) 近藤信太郎, 名取真人: 幾何学的形態計測によるニホンザル大白歯形態の定量化, Anthropological Science

- (Japanese Edition), 112(1), 9-18, (2004).
- 4) Stayton, C. T.: Morphological Evolution of the Lizard Skull: A Geometric Morphometrics Survey, Journal of Morphology, 263, 47-59, (2005).
- 5) Sederberg, T. W.: Free-Form Deformation of Solid Geometric Models, Proceedings of ACM SIGGRAPH'86 in Computers & Graphics, 20(4), 151-160, (1986).
- 6) Hsu, W. H., Hughes, J. F. and Kaufman, H.: Direct Manipulation of Free-Form Deformation, Computers & Graphics, 26(2), 177-184, (1992).
- 7) 持丸正明, 河内まき子, 福井幸男, 堤江美子: FFDによる形態間距離に基づく足部三次元形態の特徴分類, 人間工学, 33(4), 229-234, (1997).
- 8) Allen, B., Curless, B. and Popović, Z.: The space of human body shapes: reconstruction and parameterization from range scans, ACM SIGGRAPH2003, (2003).
- 9) 稲垣知大, 浅田友紀, 倉賀野謙, 鈴木宏正, 持丸正明, 河内まき子: 解剖学的特徴点による点群からの足形状の再構成と人体寸法の抽出, 精密工学会春季大会学術講演会, (2004).
- 10) 河内まき子, 持丸正明: ネアンデルタール人頭骨の成長復元, 古代文化, 50(3), 41-50, (1998).
- 11) 持丸正明, 河内まき子: 適合メガネフレーム開発を目的とした3次元顔形状分類, バイオメカニズム 16, 87-99, 東京大学出版会, (2002).
- 12) Mochimaru, M. and Kouchi, M.: Statistics for 3D Human Body Forms, SAE Digital Human Modeling for Design and Engineering 2000, 2000-01-2149, (2000).
- 13) Kouchi, M. and Mochimaru, M.: Development of a low cost foot-scanner for a custom shoe making system, 5th ISB Footwear Biomechanics, 58-59, (2001).
- 14) 持丸正明, 河内まき子: デジタル人体形状に基づく着装品のオンデマンド製造, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 8(4), 407-412, (2003).

持丸 正明 (もちまる まさあき)

1993年慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程修了。同年博士(工学)。同年工業技術院生命工学工業技術研究所入所。組織改編により、2001年より産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究ラボ。2003年よりデジタルヒューマン研究センター・副センター長。人体形状・運動の計測とモデル化、産業応用研究に従事。バイオメカニズム学会、日本機械学会、計測自動制御学会、IEEE Computer Society, Society of Automotive Engineers等各会員。