

個別適合メガネフレームの設計・販売支援技術

— あなただけの製品をだれにでも提供できるビジネス創成を目指して —

持丸 正明*、河内 まき子

あなただけに適合する製品を、だれにでも提供できるようなユニバーサルデザインビジネスの創成をグランドチャレンジとして、メガネフレームを具体例に、効率的にサイズ分類された製品の中から、ユーザ個人の顔のサイズに適合し、かつ、個人の感性に適合するフレームを選び出すシステムの研究について述べる。顔形状計測、サイズ適合、感性適合の要素技術は、すべて頭顔部相同モデルデータベースを基盤として統合した。このシステムが実店舗で運用されれば、それによりデータベースが拡充し、その統計データが製品設計・販売に再利用されるという持続的な循環が産み出される。

1 はじめに

ユニバーサルデザインの考え方のひとつに「One Fits All」というものがある。あるひとつの製品ですべてのユーザをカバーするという設計思想である。不特定多数のユーザが使いうるもの、たとえば、公共空間や公共物などはこの設計思想に適している。一方で、「One Fits All」はものづくりメーカーにとっても魅力的な考え方である。1種類の製品を大量生産すれば多様なユーザニーズをカバーできるからである。しかしながら「One Fits All」がすべての製品に当てはまるわけではないことも、また明らかである。たとえば、1種類・1サイズの靴で、すべてのユーザニーズに適合するのは極めて難しい。このように、特定個人が使用するような製品について、ユーザは「自分の体つきや使い方、個性」に適合することを強く求め、その製品が「他人の体つきや使い方、個性」にも適合するかどうかには興味がない。むしろ、公共物などに「One Fits All」のものが増える分だけ、個人使用物に対する個人適合への要望が強くなり、個人適合製品が価値の高いものと認識されることになる。

職人の技量とノウハウ、経験によって個人に適合する製品をつくる方法は大量生産よりも長い歴史がある。しかしながら、その方法は職人個人の技量や経験に依存しており、多様なユーザに対応する高価値な個人適合製品を、迅速かつ大量に提供する方法にはつながらない。そこで、製品の適合性に関係する人間特性を明らかにし、その人間特性の個人差に対して工学的手段を適用することで、個人適合製品を迅速かつ大量に提供する方法を創成することが本研究の目標である。すなわち、本研究のグランドチャレンジは「あなただけに」適合する製品を「だれにでも」提供でき

る新しいユニバーサルデザインビジネスを創り出すことにある。これは「One Fits All」を越えるユニバーサルデザインの設計思想を実現することにほかならない。

2 研究シナリオ

個人に適合する製品を提供する手段にはいくつかの方策があり得る。第一は、ユーザをグループ化してグループごとにサイズを用意する手段 (Population Grouping)、第二は、製品に多様な調節機能をつけユーザがこれを使って調整することで適合させる手段 (Adjustable Product)、第三は、ユーザの個人特性に応じて市販製品 (第一や第二の手段で用意された製品) から適切なものを選定・推奨する手段 (Finding Well-fitting Product)、第四はユーザの個人特性にあわせて製品全体あるいはパーツなどを設計・製造する手段である。第四の手段は伝統的な個別対応と似ているが、これを工学的手段で実現する (Mass Customization)。それぞれの手段の特徴を図1に示す。参考として旧来の大量生産 (Mass Production) と伝統的な個別対応生産 (Traditional Customization) を両端においた。図中の線は、それぞれ製品のコスト、提供に要する時間、ユーザの満足度を示している。あくまでも手段の得失を説明するための概念図であり、スケールに定量的な意味はない。

Population Groupingは靴や衣料品などで行われている手段であり、ワンサイズ商品に比べると生産・流通コストが多少かさむが、店頭在庫で対応できる場合が多く、提供に時間を要しない。Adjustable Productは、自動車シートやオフィスチェアなどに見られる手段で、調整機能の分だけ製造コストがかさむ。いずれにせよ、これらの手段は

適合するサイズを選択や調整をユーザ自身の判断に委ねる手段であり、ユーザの判断が適切でない場合には十分な適合性能を発揮できない。このことを示す筆者らの研究を紹介する^[1]。十分なサイズバリエーションのあるシューズを用意し、その中からユーザ自身が「もっとも適合する」と判断するシューズを選ばせる実験を行った結果、足の細いユーザはゆるめのシューズを選び、足幅の広いユーザはきつめのシューズを選ぶ傾向があることが明らかになった。シューズの足囲サイズバリエーション(D、E、EEなど)は通常の市販製品には用意されていないため、ユーザは標準足囲サイズ(E)のシューズの適合感に「慣れて」しまったためと考えられる。実際にユーザが「適合している」と判断したシューズは、きつめであれば血行を阻害し、ゆるめであれば、靴内ずれが増大して衝撃吸収性能が低下することが確かめられている。

製品の選択をユーザ任せにせず、店頭でユーザの特性を測り適切な商品を選定・推奨するようなサービスを含めた手段が、第三の Finding Well-fitting Product である。サービスが付加される分だけ、第一、第二の手段よりコストがかさむ。また、多様な商品をすべて在庫として用意できない場合もあり、提供には商品取り寄せの時間を要する。Mass Customizationは、インソール（靴の中敷き）の個別対応などに見られる手段で、店頭でユーザの特性を測り、そのユーザ特性に応じたパーツをその場で設計・製造して提供する。パーツの設計・製造に相応の時間がかかる場合があり、提供には時間を要する。また、専用の製造工程を持つ必要があり、その分、コストもかさむことになる。

ユーザの満足度は、完全な個別対応部分を持つ Mass Customization が最も高くなると想定されるが、このシナリオをいきなり実現するのは困難である。それは2つの障壁による。第一は提供者側の投資の壁である。Mass Customizationを実施するには、製品の一部を個別対応可能なパーツ構成にする必要があり、さらにそのパーツを迅速かつ低価格に製造する手段を準備しなければならない。

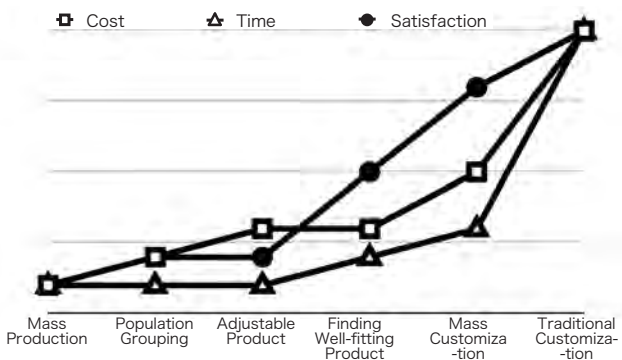


図1 個人に適合する製品の提供手段

これらの基盤整備に対する投資額は小さいものではなく、提供者側で容易に決断できるものではない。第二はユーザ側の投資の壁である。Traditional Customizationで製造された商品に高い投資をするユーザ層は存在する。一方で、Mass CustomizationというMass Productionより高価な商品を購入するユーザ層は顕在化していない。この市場を顕在化するには、Mass Customizationより低額の投資で、Mass Productionより高度な適合感を体験させることが有効な戦略であると考えている。そこで、本研究ではMass Customizationの前段階である Finding Well-fitting Productを具現化することで、ユーザ体験を実現することを目標とした。情報技術を活用した Finding Well-fitting Productシステムは、ユーザの人体特性と商品選択行動をログ情報として蓄積でき、その情報がMass Customizationの基盤ともなりうる。ユーザ体験は、ユーザの投資意欲形成に繋がり、それによって提供者側の投資意欲も高くなる。

本研究は、メガネフレームの個別適合性向上を具体例として、Finding Well-fitting Productを具現化するための要素技術の開発と技術の連携を目的とする。メガネフレームなど眼鏡矯正具類の市場規模は年間約1千億円（2002年度）で、海外輸出の比率が高く国際競争力のある産業である。メガネフレーム販売店舗は全国で15,000店ほどになる。これらの店舗で運用するシステムイメージとそれを構成する要素技術を図2に示す。ユーザはメガネフレーム店舗で、自分の顔写真を複数方向から撮影する。この多視点画像からユーザの顔の3次元形状モデルを構築し、その寸法情報に基づいて、あらかじめ用意されたサイズグループのどれに最も近いかを判断し、適切なサイズのメガネフレームを選定する。このようなシステムを具現化するための要素技術として、店頭で簡易に顔を計測するための計測技術（簡易計測）、さまざまな顔形状に適合するメガネフレームのサイズバリエーションを設計し、個人に適合するサイズを推奨す

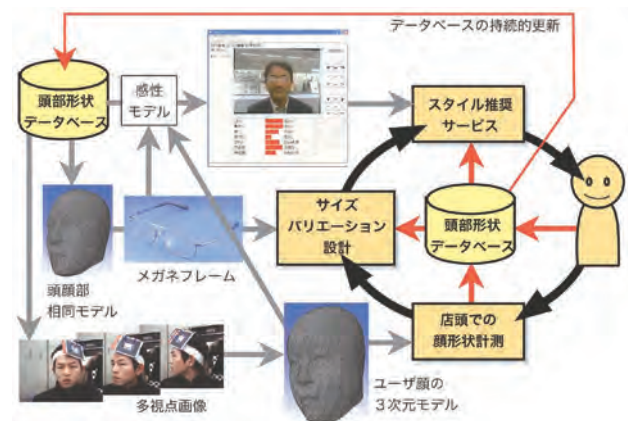


図2 個別適合メガネフレームの販売支援システムと要素技術

る技術（サイズ適合）が必要となる。図2ではさらに、自分のメガネをかけたまま、違うメガネをかけた自分を見る仮想装着とユーザ自身の顔形状とメガネフレームの組合せが第三者に与える印象を提示することで、ユーザの感性に適合するフレーム選択を支援する技術も付加している。このようなスタイル推奨（感性適合）は、Traditional Customizationにおいてノウハウとして付加されていたものである。ここでは、これを形式知化して実現する。本研究では、簡易計測、サイズ適合、感性適合の3つの要素技術を頭顔部形状データベースを基盤として開発するとともに、図2の右側のシステム運用サイクルを通じて基盤データベースが持続的に拡充していくシナリオを考えた。本論文では、基盤となる頭顔部形状データベースと、サイズ適合、簡易計測、感性適合の3つの要素技術開発について述べ、それらの要素技術の連携、産業的有効性について検討し、今後を展望する。

3 技術要素

3.1 頭顔部相同モデルとデータベース

本研究で用いられる技術要素は、頭顔部相同モデルとそのデータベースを共通技術基盤とする。ここでは、まず、人体形状の計測と相同モデルに関する一般的な考え方を述べ、その後、頭顔部形状計測技術と頭顔部相同モデルについて述べる。

人体形状計測技術としては、体表面にレーザ光や可視光によるパターンを投影し、その反射光を投射方向と異なる方向のカメラで撮影して三角測量の原理で反射点の3次元位置を計算する方法が一般的である^[2]。このような計測技術によって得られるデータは、人体表面上の大量の（通常は数十万点から数百万点の）座標値と、数十点の解剖学的特徴点座標値である。解剖学的特徴点は、個人間を対応付ける生物学的な特徴点であり、形状計測に先立って専

門の技量を持つオペレータが被験者の体表面を触察してマーキングした点である。人体形状計測装置では、このマーキングした点の座標値を別途取得できるようになっているものが多い。このようにして得られた人体形状データのうち、個人間で座標点の対応がついているのは解剖学的特徴点のみであり、体表面データ点座標は個人ごとにデータ点数が異なっている。それゆえ、形状データの個人間比較は容易ではなく、平均化などの統計処理も難しい。そこで、すべての個人の人体形状を解剖学的に対応付けられた同一点数、同一位相幾何構造の多面体（ポリゴン）で表現する方法を提案した。これを人体相同モデルと呼ぶ。人体相同モデルではk個の座標列で形状を表現できるため、 $k \times 3$ の要素を持つ頂点ベクトル \mathbf{T} で1つの個人形状が記述される。m人分の人体相同モデルデータがあれば、平均頂点ベクトル $\bar{\mathbf{T}}$ は容易に計算できる。また、頂点ベクトル $(\mathbf{T}_1 \sim \mathbf{T}_m)$ で構成される行列 $\mathbf{M} = [\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{T}_m]^T$ を主成分分析すれば、固有ベクトル \mathbf{P} が取得できる。m人のデータは固有ベクトル空間上の主成分得点 $\mathbf{A}_1 \sim \mathbf{A}_m$ として表現できる。主成分得点 \mathbf{A} の上位n成分で、十分な説明率が得られたとすると、これは、m人の人体形状の個人差が、n次元の固有ベクトル空間に圧縮して表現されたことになる。このような個人差の圧縮は、製品のサイズ適合を考える場合にはサイズバリエーションの効率化として有効な手段となるだけでなく、固有ベクトルと主成分得点を用いて任意の人体相同モデルを復元することも可能となる。 $\mathbf{P}(n)$ 、 $\mathbf{A}(n)$ をそれぞれ固有ベクトル \mathbf{P} 、主成分得点 \mathbf{A} の上位n成分とすると、人体相同モデルは

$$\mathbf{T} = \bar{\mathbf{T}} + \mathbf{P}(n) \times \mathbf{A}(n) \quad (式1)$$

で計算できることになる。

頭顔部の形状計測については、レーザ光やパターン光投影を用いる市販製品がある。しかしながら、市販製品には、耳の後ろの形状が計測できない、解剖学的特徴点が取得できない、相同モデルが自動的に構成されないなどの技術的課題があった。筆者らはこれを解決するために、可視光を投影し、12台のカメラによって死角を低減して耳裏形状まで計測できる頭顔部形状計測装置を独自開発した^[3]。この頭顔部形状計測装置を用い、52名の日本人男性（20歳代）の頭顔部形状を計測した。得られたデータは約百万点のデータ点座標値と、データ点のカラー情報、および、約80点の解剖学的特徴点座標値で構成される（図3(a)）。ここでは、これらのデータに基づき、458頂点、838ポリゴンからなる多面体で外耳形状を含まない頭顔部全体形状を表現した（図3(b)）。これを頭顔部相同モデルと呼ぶ。

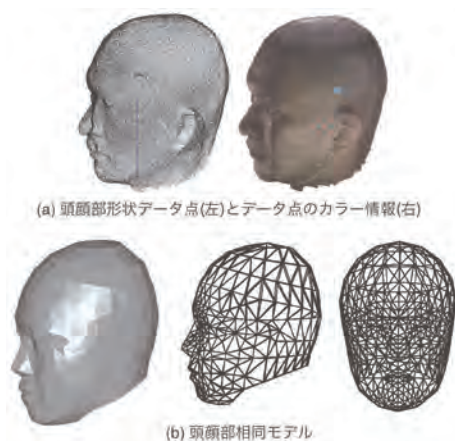


図3 頭顔部形状データと相同モデル

3.2 サイズバリエーション設計^[4]

メガネフレームにもサイズバリエーションが存在する。ただし、従来のサイズバリエーションはメガネの玉（レンズ）の幅とつる（ temples ）の長さが比例的に変化するという単純なもので、実際のユーザ層の顔サイズバリエーションに適合していなかった。そこで、図4の頭顔部相同モデルのうち、メガネフレームが適合する中顔部211頂点からなる中顔部相同モデル（図4）を用いて、個人差を効率的にカバーするサイズバリエーション設計を行った。個人差を効率的にカバーするためには、3.1節で述べたように主成分分析を用いて個人差を固有ベクトル空間に圧縮する方法がある。ただし、主成分分析法は線形空間への圧縮であるため、圧縮効率は必ずしも高くない。そこで、ここでは非線形な圧縮を可能とする多次元尺度法を利用した。個人間の形状の違いを表すために、i番目の個人の相同モデルとj番目の個人の相同モデルとの対応する頂点間の距離の総和として形態間距離 D_{ij} を式2のように定義した。

$$D_{ij} = |T_i - T_j| \quad (式2)$$

ここで、 (T_i, T_j) はそれぞれi番目の個人の頂点ベクトル、j番目の個人の頂点ベクトルを意味する。m人のデータがある場合、 ${}_m C_2$ 個の形態間距離 D_{ij} が計算され、 $m \times m$ の頂点ベクトル間距離行列が得られる。この距離行列を多次元尺度法で分析すれば、距離関係を再現する多次元空間における布置 Q_m が得られる。中顔部相同モデルの場合、多次元尺度法であれば5次元解で95%を越える説明率が得られる。主成分分析で同等の説明率を得るには15成分以



図4 中顔部相同モデル

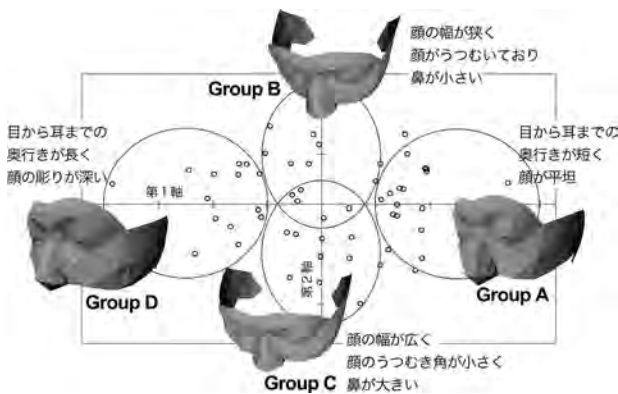


図5 日本人男性の中顔部形状分布図

上が必要であることと対比すると、多次元尺度法の圧縮率が高いことが分かる。多次元尺度法で計算した5次元解のうち、第1、第2次元の散布図を図5に示す。第1軸を頭部寸法の重回帰式で定式化した結果、第1軸は顔の前後方向の長さや顔面の彫りの深さの特徴を示していることがわかった。同様に、第2軸は顔の左右幅と顔面のうっむき方向の傾斜特徴を示している。この2軸で日本人の顔形状特徴の83%を説明できる。なお、第3軸は鼻形状、第4軸は瞳孔間距離と顔の幅の関係を示しており、メガネフレームの適合性とは強く関係しない。

生産・流通の採算性から男性のみで4つのサイズバリエーションを用意することと決め、日本人の顔形状分布を効率よくカバーするように、個人差の最も大きい第1軸を3分割、そのうち人数の多い中央のグループを第2軸に分割することで図5中に示した4つのサイズグループを設定した。それぞれのグループを代表する平均形状を計算し、そのデジタル顔形状データに基づいて適合フレームを設計、試作した（図6）。試作フレームの有効性を検証するために、顔形状データベースの被験者とは異なる男性被験者38名（平均年齢24.5歳）の被験者について、15箇所の頭顔部寸法に基づく重回帰式から分布図上の布置を推定してサイズグループを決定し、そのサイズグループに適合するフレームと既存フレームをかけさせる評価実験を行った^[4]。38名の被験者は4つのグループにほぼ均等に散らばるように選定した。該当するグループの平均形状と個人の主要寸法の差は±3 mm以下であった。実験では、左右からの圧迫力計測、顔を振ったときのメガネと顔の相対ずれ量計測、主観評価を実施した。この結果、試作した適合フレームは既存フレームに比べて高いフィット感を与えることが分かった（ $p < 0.01$ ）。また、適合フレームは既存フレームより左右の圧迫力が小さく（ $p < 0.01$ ）、圧迫力が低くても相対ずれ量には差がみられないことが確かめられた。このことから、ユーザ個人が4つのサイズグループのどこに近いかを判別することで「左右からの締めつけ力が小さくとも相対ずれが起きず、フィット感が良好な」フレームを提供できることが分かった。

3.3 多視点カメラ画像からの頭顔部3次元形状復元^[5]

ユーザ個人の頭顔部寸法15箇所計測することで、上記の重回帰式によりユーザ個人が形状分布図のどこに位置するかを知り、適切なサイズのフレームを提供できることが分かった。しかしながら、この頭顔部寸法の計測には頭顔



図6 試作した適合メガネフレーム

部の解剖学的特徴点の触察など専門的な技量が必要であり、実際の店頭での運用には問題があった。また、頭顔部寸法データのみではユーザ個人の3次元形状復元が難しく、図2のようなコンピュータグラフィクス表示などにも利用できない。また、3.1節で使用した頭顔部形状計測装置は大型かつ高額で店頭での利用には適さなかった。そこで、本研究では従来の形状計測技術とは発想を異にする、新しい人体形状計測技術の開発を試みた。

3.1節で述べたとおり、人体形状を相同モデル表現して主成分分析することで、人体形状の個人差を低次元空間で表現できるようになる。これは、個人の頭顔部形状特性を記述するのに、数十万点から数百万点の座標値情報は必ずしも必要ではなく、数十個の主成分得点があればよいことを意味する。そこで、相同モデルから得られた頭顔部平均形状を初期値とし、個人差を記述するための主成分得点を未知数として、主成分得点によって合成された3次元頭顔部形状と多視点から撮影した画像の画像特徴とのずれを評価し、両者の誤差が小さくなるように主成分得点を最適化する技術を開発した。あらかじめ光学校正された多視点のカメラで顔画像を撮影すれば、その顔画像と整合する3次元頭顔部相同モデルが生成できることになる。具体的には、3.1節の式1のA(n)を未知数として頭顔部3次元形状を合成し、これを多視点カメラの画像平面に投影し、多視点カメラ画像から得られる形状特徴（輪郭エッジ、顔パーツエッジ）と投影した頭顔部3次元形状の形状特徴の一致度を評価した。この形状特徴の差を最小化するような主成分得点A(n)を最適化計算することで、多視点カメラ画像にもっともフィットする頭顔部3次元形状を得た（図7）。3.1節で述べた頭顔部形状計測装置を用いて計測した頭部ダミーを、多視点カメラによる計測結果と比較した結果、誤差は平均で2 mm程度であった。

この技術は、正しくは形状計測技術ではなく、相

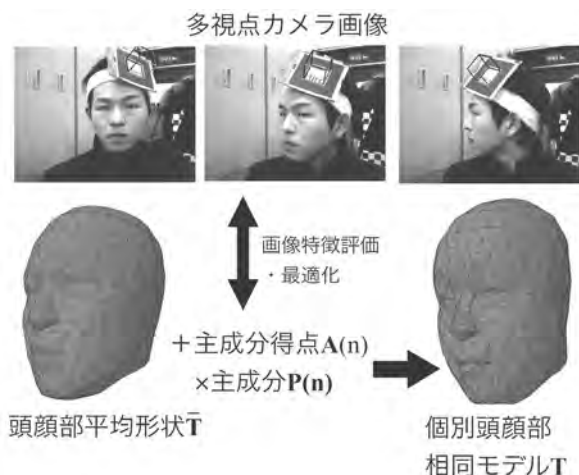


図7 多視点カメラ画像からの頭顔部形状復元

同モデルデータベースに基づく多視点カメラ画像からの人体形状復元技術である。結果的には多視点カメラ画像から2 [mm] の精度で頭顔部形状相同モデルを取得していることになり、形状計測技術と同様の機能を持つ。カメラと光源との三角測量を行っているわけではないため計測対象にパターン光を投光する必要がなく、複数台のカメラを設置し、同時にシャッターを切ることで瞬時に計測を完了できる。得られるデータはすでに相同モデルであり、すぐにそこからサイズ適合のための情報を得ることができる。また、計測対象の一部がカメラの死角になったとしても形状データが欠落することはない。

3.4 感性モデルによる印象推定^[6, 7]

3.2節で構成したメガネフレームを、3.3節で開発した計測技術を用いて取得したユーザ個人の頭顔部形状に応じて提供することでサイズ適合を実現できる。ここではさらに、顔のかたちとメガネフレームのかたちの組合せが与える印象を評価するための感性モデルの要素技術開発について述べる。

メガネをかけた顔が与える印象の表現には、言葉を用いることとした。事前アンケートで抽出した42個の感性用語に関する予備実験の結果を因子分析し、印象を表現する対語4組「優しい-こわい」「涼しい-暑苦しい」「明るい-暗い」「若い-老けた」を抽出した。これに、共同研究企業が独自に実施したマーケット分析結果から得た「おしゃれな-ダサイ」「自然な-不自然な」「おおらかな-神経質な」の3つの対語組を加えた計7組を用いた。これらの感性用語の印象得点が、顔形状とメガネ形状の関数としてモデル化できるという仮説にしたがい、異なる顔に異なるメガネをかけた画像に対する印象得点を実験から取得し、そのデータに基づいて上記関数を同定した。

被評価者となる青年男性の顔画像には、頭顔部相同モデルデータベースから日本人の顔の個人差をカバーするように合成した仮想顔画像を用いた。3.2節で用いた多次元尺度法の4次元各軸上で±3標準偏差の布置、および、その中間布置に位置する頭顔部相同モデル形状を合成し、これを前額面に投影して18個の2次元顔モデルを得た。3.1節で述べた頭顔部相同モデルには、印象に大きな影響を与える眉や口唇が含まれていなかったため、頂点色情報を有する特定個人の頭顔部3次元形状オリジナルデータを頭顔部相同モデルに一致するように変形させ、前額面に投影して2次元正面画像を構成した。この正面画像の色情報を参考として、頭顔部相同モデルを前額面に投影した2次元モデルに、眉や口唇を加えた2次元正面顔モデル（図8）を構成し、これに別途入手した青年男性の平均テクスチャ^[8]をマッピングして、18個の仮想正面顔画像を用意した。メガネは素材・形状で分類した12個を用いた。また評価者

1人当たりの回答時間を30分以内にするためにメガネをかけた顔画像216個（顔18×メガネ12）のうち18個を選んだ画像セットを12パターン選定し300名の青年女性に評価させた。評価者にはランダムに選ばれた1パターンを提示し、インターネットを使ったWebアンケートで評価実験を行った。評価方法はVisual Analog Scale法を採用し、評価者は△マークをドラックして得点入力をする（図9）。得られた印象得点を顔の形状特徴とメガネの形状特徴から推定するモデルを、重回帰分析（ステップワイズ法）によって構成した。目的変数に感性用語7組の得点、説明変数に顔の実寸・示数100個、メガネフレーム実寸・示数25個、メガネ玉型主成分得点5個を用いた。すべての感性用語において重相関係数0.784～0.901を得ることができた。重回帰式の変数には、すべての用語で顔寸法、メガネフレーム実寸・示数、メガネ玉型主成分得点が含まれていた（表1）。

実験で得られた感性モデル（重回帰式）の推定誤差ならびに実写顔画像への適用可能性を検証するために、(1) 実験で使用しなかった仮想顔 (2) 平均に近い仮想顔 (3) 変形した実写顔 (4) 実験で使用した画像にメガネを合成したメガネつき顔画像を12個用意した。このメガネつき顔画像を59名の評価者に提示して、同様のWebアンケートシステムを用いて印象得点を取得した。(4)の結果から検証実験の評価者が評価実験と同質であることを確認した上で、(1) (2)の結果を分析した。残差分析による推定誤差は、いずれの感性用語についても±10%程度であった。また(3)の実写顔画像での推定誤差も±10%程度の範囲に入り、実

写画像への適用も可能であることが確認できた。

3.5 感性モデルによるスタイル推奨システム

3.4節の感性モデルを組み込んだスタイル推奨システムを開発した。これは、図2上方のスタイル推奨部分に特化したもので、2次元のシステムとなっている。PCに接続されたUSBカメラから取得したユーザの正面顔画像から、図8の2次元正面顔モデルを自動的に構成する。ここでは、別途計測したユーザの瞳孔間距離を入力することで、画像の実寸換算を行っている。実寸換算はユーザの座位置とカメラの位置関係を事前に校正しておけば、あえて入力する必要はない。システムにはあらかじめ3.4節の実験に用いた12個のメガネフレームの画像と形状データが登録されており、ユーザの2次元正面顔モデルが得られれば、その顔寸法・示数と、登録されているメガネフレーム実寸・示数、メガネ玉型主成分得点から、即座に12個のフレームとユーザの顔を組み合わせ合わせた場合の印象得点が計算される。12個のメガネフレームの印象得点を相対得点化し、メガネフレーム画像と顔画像の合成画像とともに画面に提示した（図10）。

4 要素技術連携のポイント

本研究の目的は、メガネフレームの個別適合性向上を具体例として、Finding Well-fitting Productを具現化するための要素技術の開発と技術の連携、統合を実現することである。ここでは、図2のようなイメージを具現化すべく、頭顔部形状に適合するメガネフレームのサイズバリエーションを設計する技術、店頭でユーザ個人の頭顔部形状を取得す

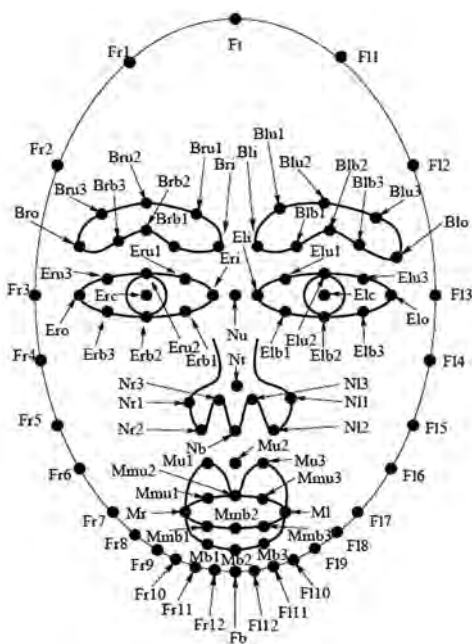


図8 2次元正面顔モデル

メガネの感性評価アンケート 17



左端のことばと右端のことばが対義語になっています。この顔かこのメガネをかけた写真は、左右のどちらのことばに、どの程度当てはまると感じますか？どの程度当てはまると感じる位置に▲を移動して下さい。

明るい |-----▲-----| 暗い
 自然な |-----▲-----| 不自然な
 涼しい |-----▲-----| 暑苦しい
 おしゃれな |-----▲-----| ダサい
 優しい |-----▲-----| こわい
 おおらかな |-----▲-----| 神経質な
 若い |-----▲-----| 老けた

次へ進む

図9 Webアンケート画面

表1 感性モデル（重回帰式）に含まれる変数個数

	相関係数	顔寸法	メガネ寸法	玉型PCA
優しい—こわい	0.892	11	3	1
涼しい—暑苦しい	0.901	8	5	2
明るい—暗い	0.821	8	1	1
若い—老けた	0.784	8	3	2
おしゃれな—ダサい	0.834	5	6	2
自然な—不自然な	0.871	5	3	1
おおらかな—神経質な	0.863	9	1	1

る技術、さらに、顔形状とメガネ形状の情報からその組合せが与える印象得点を推定する技術を開発した。3章で述べた要素技術は、いずれも同一の頭顔部相同モデルとデータベースに基づいており、オフラインのデータレベルでは統合を実現している。また、3.5節で述べたとおり、技術の一部はデモンストレーションできるシステムとして完成している。

これらの要素技術の連携において、もっとも重要な基盤は頭顔部相同モデルとそのデータベースにある。フレームのサイズバリエーション設計も、多視点カメラによる頭顔部形状計測も、また、感性モデルもすべて頭顔部相同モデルとデータベースに基づいており、個々の技術と頭顔部相同モデルのデータベースを併せ持たなければ、システムは稼働しない。事実、3.2節で述べた多視点カメラによる頭顔部形状計測技術は、別の計測技術によってあらかじめ測られたデータベースがなければ計測ができない。この点で技術としては不完全に見えるが、逆に、データベースをもっている事業者にとっては、データベースの優位性を活かすことができる技術と言える。すなわち、本研究で開発した要素技術は、いずれも頭顔部相同モデルデータベースを必要とするもので、それは、データベースを有する事業者の優位性を確保するという事業戦略に基づくものである。

本研究のシナリオ自体も、この要素技術の選択の規範となった事業者の優位性をさらに高めるものとなっている。事業者が、本研究で開発した要素技術の統合システムを実際に店舗に設置して運用すれば、事業者は販売サービスを通じて、大量の顧客の頭顔部3次元相同モデルを蓄積していくことができる。これは、次のメガネフレーム設計におけるサイズグループ分類に活かせるだけでなく、より信頼性の高い多視点カメラ計測の実現にも繋がる。



図10 感性モデルによるスタイル推奨システム

5 評価と展望

個々の要素技術の精度、信頼性については3章各節で述べたとおりである。ここでは、本研究の産業的・社会的有効性について論じる。3.2節で述べたサイズバリエーション設計技術は、4つのサイズバリエーションとサイズ適合を具現化した製品として共同研究先の企業から市販され、その後も、同企業が他の製品群にサイズバリエーションの理論を適用しており、産業的な有効性が認められているものと考えられる。3.3節で述べた多視点カメラ画像からの頭顔部3次元形状復元は、機能的には形状計測技術と同様であり、顔部にレーザー光などを投光することなく、高速に隠れなく頭顔部形状を取得できる点で、従来のパターン光投影式の人体形状計測技術よりも優れている。取得できる形状の精度は2 mmで、従来技術の精度0.5 mm^[3]よりも劣るが、サイズ適合や感性適合の目的であれば十分な精度である。システムは多数台のデジタルカメラだけで構成でき、プロジェクターとカメラの精密な配置と時間制御を必要とする従来技術よりも省スペースで低価格なシステム構築が可能となる。顔に投光しない、省スペースで低価格である、高速である、データの欠落がなくすぐに相同モデルが取得でき、サイズ適合や感性適合に利用できるという特徴は、店頭に設置する計測システムとして、従来技術に勝る大きな優位性であり、産業的な有効性が高い。3.4節で述べた感性モデルとそれを実装したシステムは、研究室でのデモンストレーション運用実績しかないが、システム体験者の反応は良好であり「メガネフレーム選びが楽しい」というコメントが得られている。

サイズバリエーション技術により既存の生産設備での効率的なサイズ適合を実現したことと、多視点カメラによる形状復元技術により低価格な計測システムを可能としたことで、実店舗でのシステム運用に関する提供者側の投資の壁をほぼ克服できたと考えている。このシステムを実店舗で運用すれば、ユーザの顔形状情報と感性検索ログ、メガネ選択行動に関する一貫したデータを蓄積することができ、これらのデータの蓄積が最終的なMass Customizationの基盤となりうる。一方、ユーザ側においても、サイズに適合するだけでなく感性にも適合するものをさがすという技術を実現したことが、付加価値製品に対する投資意欲の向上に繋がるものと思われる。このようなユーザ側と提供者側の投資意欲の連鎖が「あなただけ」に適合する製品を「だれにでも」提供できるように新しいユニバーサルデザインビジネス創成の第一歩になると期待している。

このようなシステムが実店舗に導入されていくことは、サイズ適合に関するユーザの投資意欲の形成だけにとどまらず、社会基盤としての意義があると考えている。3.1節で述

べたように、従来、人体形状の個人差に関する情報は専用の装置や技量を備えた公的機関が、拠点集中型で横断的にデータを収集し、それを外部に提供するかたちで整備されてきた。1992年から94年にかけて、(社)人間生活工学研究センターが実施した34,000人の人体計測や、2004年から06年にかけて、やはり(社)人間生活工学研究センターが実施した8,000人の人体寸法・形状計測事業などがその好例である。世界的に見ても、欧米人4,000人を計測したCAESARプロジェクトなど集中型・横断的なデータ収集が一般的である。これに対して、われわれが目標とするシステムは、ユーザの人体形状データを複数の店舗分散型で縦断的(同一ユーザの時系列変化を追跡する)に蓄積できる可能性を秘めている。人体形状データベースという社会の知的基盤整備を、税金に駆動された集中型・横断的計測から、ビジネスに駆動された分散型・縦断的計測に切り替えていく足掛かりになりうると期待している。蓄積された多数の人体形状データは、個人情報を持たない統計データとして、3.2節のサイズバリエーション設計に、3.3節の形状計測に、そして、ユーザの購買履歴と形状データの相関統計データが再び3.4節の感性モデルに再活用されることになる。今後は、企業とともに、オンラインのシステム統合、ユーザインタフェース開発、持続的・縦断的に蓄積されるデータベース管理システムの開発に関わり、実店舗でのシステム運用を目指したい。

キーワード

人間計測、感性工学、サービス工学

参考文献

- [1] M.Kouchi, M.Mochimaru, H.Nogawa and S.Ujihashi: Morphological fit of running shoes, *Perception and Physical Measurements, the 7th Symposium on Footwear Biomechanics*, 38-39(2005).
- [2] 持丸正明, 河内まき子: 人体を測る一寸法・形状・運動, 東京電機大学出版局, 東京 (2006)
- [3] 持丸正明, 河内まき子, 大矢高司: 人体形状の高速・隠れなし計測装置の開発, 第19回センシングフォーラム, 47-52(2002).
- [4] M.Kouchi and M.Mochimaru: Analysis of 3D face forms for proper sizing and CAD of spectacle frames, *Ergonomics*, 14-47, 1499-1516(2004).
- [5] 伊藤洋輔, 斎藤英雄, 持丸正明: 単眼カメラ画像列からの解剖学的顔形状データベースを用いた顔形状復元, *MIRU2006 画像の認識・理解シンポジウム*, 764-769(2006).
- [6] M.Mochimaru and M.Kouchi: A KANSEI model to estimate the impression ratings of spectacle frames on various faces, *SAE Digital Human Modeling for Design and Engineering Symposium 2005*, 2005-01-2693(2005).
- [7] 田中久美子, 河内まき子, 持丸正明: メガネフレームのスタイル適合性の感性モデル, 第8回日本感性工学会大会, 東京 (2006).

- [8] 向田茂, 蒲池みゆき, 尾田政臣, 加藤隆, 吉川左紀子, 赤松茂, 千原國宏: 操作性を考慮した顔画像合成システム: FUTON - 顔認知研究のツールとしての評価 -, *電子情報通信学会論文誌*, J85-A-10, 1126-1137(2002).

(受付日 2007.10.2, 改訂受理日 2007.11.30)

執筆者略歴

持丸 正明 (もちまる まさあき)

1993年、慶應義塾大学大学院博士課程修了。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、産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究ラボ、副ラボ長。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(現職)。人体形状・運動計測とモデル化、その産業応用に関する研究に従事。市村学術賞、産総研理事長賞など受賞。著書に「人体を測る一寸法・形状・運動」。

河内 まき子 (こうち まきこ)

1979年、東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。同年、東京大学助手。1982年、理学博士。1987年、工業技術院製品科学研究所・主任研究官。改組により、1993年より、生命工学工業技術研究所。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。2007年、上席研究員。人体形態計測とモデル化、その産業応用研究に従事。ISB Footwear Biomechanics Basic Research Award など受賞。

査読者との議論

議論1 研究の位置づけ

質問 (赤松 幹之)

個別適合の方法として Population Grouping、Adjustable Product と Finding Well-fitting Product、Mass Customization と Traditional Customization を適合方法として並べてありますが、Finding Well-fitting Product は Population Grouping の適合度を高めるための方法であって、Adjustable Product と Mass Customization の間に位置する方法ではないのではないのでしょうか。むしろ、Population Grouping、Adjustable Product のいずれもがユーザの主観的判断にゆだねられているために、真の適合に至らない欠点を補うための支援的な方法とみなすのが良いのではないのでしょうか。また、この手法は Mass Customization の基盤ともなるといえるのではないのでしょうか。

回答 (持丸 正明)

有益なコメントをありがとうございました。まさしく、御指摘の通りであり、原文では Finding Well-fitting Product が、Population Grouping、Adjustable Product と並ぶ手段として書かれていましたが、実際には、Population Grouping、Adjustable Product の欠点を補うための支援方法を含めた手段と言うべきです。そこで、原稿を修正し、Population Grouping、Adjustable Product を紹介した後、筆者らの研究例を例に選択をユーザに委ねるだけでは十分な適合性能を発揮できないことを述べ、それを補うために Finding Well-fitting Product というサービスを付加する手段があるという展開に変更いたしました。

また、コメントの後段は、「Finding Well-fitting Product を続けることで、ユーザ特性と製品特性の適合に関するエビデンスデータが蓄積され、それ自体が Mass Customization の基盤ともなる」という意味かと思えます。これも、まさしくその通りであり、御指摘の通り、投稿時原稿で十分に述べられていない部分でありました。本論文の「研究シナリオ」と「評価と展望」の箇所において述べることにしました。

議論2 グループ設定と評価実験の妥当性

質問 (赤松 幹之)

顔形状分布の第1軸と第2軸の空間の配置から、4つのグループを

設定していますが、グループ分けの考え方を具体的に説明するとどのようになるのでしょうか。また、38名の被験者が2次元分布上にどこに配置される被験者なのか、また平均形状と被験者の差異がどの程度なのか、などの評価実験の妥当性の検証は行っていますか。

回答（持丸 正明）

(1)「効率よくカバーする」について

そもそもガウス分布状になっている個人差をいくつかのタイプで対応しようと言うところに無理があります。理論的にはタイプが多ければ多いほど、個別のフィット性は向上するわけで最適値は存在しません。そこで、本研究では「製造・流通の採算性から想定される最大限のサイズバリエーション」を企業側に検討いただき、「4サイズ」という結論が導かれました。次は4サイズという制約の中で、いかに個人差の分布をカバーするかという課題です。ここでは、バリエーションがもっとも大きな第1軸を3つに、さらに、その中間について第2軸方向に2つに分けることで、2次元分布図をカバーするようにグルーピングしました。図5を見ていただくと、AとDの範囲が大きく、BとCが小さくなっています。これはサイズごとの出荷量に極端なばらつきが出ないようにするために、それぞれのグループを構成する人数がほぼ同数になるようにグルーピングしています。この考え方については、引用文献[4]に記載されていますが、本文中にも一部記載しました。

(2) 評価実験について

38名の被験者は2次元分布図のサイズグループにできるだけ均等に配置するように選定しました。38名については3次元形状を計測していないため、サイズグループを代表する平均形状との形状差は分かりませんが、寸法レベルでは ± 3 [mm]程度の差異に収まっています。これらについては参考文献中に記載されていますが、本文中にも追記しました。

議論3 頭部形状の計測項目について

質問（赤松 幹之）

3.3節の1行目に、「頭顔部寸法15箇所計測すること」という記述がありますが、どのようなプロセスを経て、これを決定したのでしょうか。

回答（持丸 正明）

詳細は原著論文に記載されていますが、頭部の寸法項目50項目程度を被験者すべてについて実測し、ステップワイズの重回帰分析によって項目を減らしました。ただし、機械的に15に減らしたわけではなく、実際には計測しやすい項目を選ぶことを繰り返し、最終的に15項目に絞り込んでいます。スペースの都合から本論文では詳細な説明を省きました。

ちなみに、当初はこの15項目を店頭で計測することで、3次元顔形状を計測しなくてもメガネが選べるというシナリオでした（引用原著論文にその旨記載）。しかし、店舗の反対にあい、断念しました。やはり、顔の寸法をノギスで接触計測するというのは無理がありました。そこで、低価格の3次元計測技術開発を行うことにしました。

議論4 今後の展開

コメント（赤松 幹之）

「評価と展望」の中の評価の部分に、良い面ばかりでなく、やり残した部分、研究者自身として不満足な部分、また技術的にまだブレイクスルーできていないところなどを書いていただきたく思います。

回答（持丸 正明）

ご指摘の通り、研究として不十分なところ、シナリオとして未完成なところがあります。研究としては、感性評価の顔モデルにおける髪型の問題が大きいです。髪型によって印象がかなり変わることは予備実験で分かっていたのですが、自然に髪型を変更するすぐれたCG技術がなかったことなどもあり、今回は見送っています。また、サイズバリエーション設計技術においても、全体的な大きさと形状の話だけでなく、鼻パッドや耳当て（モダン）の曲率設計、それらが顔と当たったときの圧力分布や触覚を推定する有限要素モデルなどもやり残した仕事です。シナリオ全体として未完成であるところは、この推奨システムを運用しながら蓄積される商品選択履歴データと商品満足度データの効果的な活用技術です。これがなければ、単なる販売支援システムに過ぎず、形状や感性データを持続的に蓄積しながら、サイズ設計や感性推奨技術をアップデートしていくサイクルが形成できません。これらについては、本研究で述べたようなシステムが実社会で実用化された後に、フィールドデータを使って研究していくつもりです。

議論5 研究成果の応用範囲について

質問（赤松 幹之）

同様な適合化システムは、メガネ以外にも、靴や衣服などにも適用可能と思われますが、本質的に共通の手法で良いのか、それともメガネに特徴的な面があるのでしょうか。

回答（持丸 正明）

人体形状を計測し、あらかじめサイズバリエーション設計された製品群の中から適切なサイズを選ぶという手段は汎用性が高いと考えています。すでにスポーツシューズに適用され、実用化されています。ただし、衣服となると、3次元形状計測するために店舗で脱衣しなければならないという技術的障壁が大きく、あまり普及が進んでいません。衣服に普及させるためには、着衣のまま体形を計測する技術開発か、あるいは、店舗ではない場所で体形を測るビジネス連携が必要になると考えています。

一方で感性の側面は、メガネやスポーツシューズではスタイルデザインとフィッティングの独立性が高い（テクスチャや飾りのようなスタイルデザインが多い）ですが、ファッションシューズや衣服では両者の関係が密接であり（カッティングやドレープなどフィッティングに影響するスタイルデザインが多い）、本研究のように体形の適合性と、感性の適合性を独立にモデル化して推奨する技術では対応しきれないと思われます。後者のような事例で、ファッション性（感性）とサイズ適合性を両立させるのは、将来的な課題です。