デジタルスタイルデザインに関する研究*

—感性、印象の融合、パターンの連結に基づくシボデザインシステムの開発—

荻戸 康暉** 青山 英樹*** 森 幸雄†

Study on Digital Style Design

- Development of Wrinkle Design System Based on KANSEI, Fusion of Impression, and Connection of Patterns -

Koki NOZOMUTO, Hideki AOYAMA and Yukio MORI

Since wrinkle-texture can give different impressions and functions to a product, it has the important design role. The current method to design wrinkle-texture is to copy surface-patterns of natural objects such as leather and a pear. However, it is difficult to design various patterns that satisfy the sensibility of designers and customers because the copied wrinkles are limited in diversity. In addition, since designed wrinkle-texture sizes are small as compared to the target surface of a products, same patterns must be repeated to obtain a large wrinkle-texture area. For these problems, this study has developed three systems: a system to easily and promptly design wrinkle-textures based on KANSEI of designers and customers, a system to design wrinkle-textures by fusing wrinkle-textures having different impressions, and a system to design large size wrinkle-textures by comfortably connecting small size wrinkle-textures.

Key words: digital style design, wrinkle-texture, KANSEI, neural network, CNN, texture synthesis

1. 結 言

皮革表面の皺模様であるシボは、家電製品・情報機器のプラスチック製キャビネットや自動車の内装プラスチック製品などの意匠デザインとして使用されている。シボは、製品の意匠的価値を高めるとともに、成形におけるウェルドラインやヒケの防止、金型の研磨などの二次加工工程の短縮、塗装行程の省略、製品利用時における傷の目立ち防止などといった実用的な利点をもっている¹⁾²⁾。

シボは、主に皮革の皺模様や梨などの表面模様を転写することにより形成される。シボは、人工物に自然物の印象を付与することにより高級感を生み出すことができるが、そのデザインは実在するものからの選択的な手法となり、要求する模様が獲得できない場合がある。デザイナーは、自身の感性に基づき製品に使用するシボをサンプルから選択するが、要求する印象のシボサンプルがない場合、独自にシボを生成するか、既存のシボを編集生成する必要がある。しかしこの作業には多大な時間・コストを要する。

シボのサンプルは、大きなものでA4(210×297 mm)程度の寸法である。製品におけるシボ形成面がシボサンプル寸法より大きい場合、シボサンプルを接続してデザインすることになるが、境界線において模様の不連続が発生する問題、あるいは模様の繰り返しが見え不自然な模様になる問題が示されている³⁾。

本研究では、上記の問題を解決するため、サンプルシボを基にして、シボデザイナーおよびシボ形成製品ユーザの要求に応じたシボを簡便に生成(編集)するため、以下の三つのシステムの開発を行った。

- (1) 要求する印象を呈するシボを感性に基づいてデザインするシステム
- (2) 異なる印象のシボを融合し、新たな印象を呈するシボをデザインするシステム
- (3) 一定サイズのシボを不自然な接続部分を生じることなく連結し、要求サイズのシボを生成するシステム

2. 感性に基づくシボデザイン

感性に基づくシボデザインシステムは、要求するシボの印象を重み付きの感性語により表現し、その印象を呈するシボをデザインする。シボデザイナーとシボ形成製品ユーザでは、シボを感性で表現する際に、言葉が異なる可能性がある。このため、デザイナー用とシボ形成製品ユーザ用のそれぞれの感性語を抽出し、それぞれのシボデザインシステムを開発した。開発したシステムでは、次の(1)~(3)に示すプロセスでシボをデザインする。

- (1) シボサンプルをシステムに入力する。
- (2) 入力されたシボに対する要求印象について、感性語の重み(数値)を入力する。
- (3) 入力されたシボを要求の印象を呈するようにデザインする。
システム開発において、シボ画像の2次元フーリエ解析から得られるパワースペクトルの特徴量をニューラルネットワークによって抽出するとともに、シボが要求印象を呈するようにパワースペクトル特徴量を操作し、そのパワースペクトルの逆フーリエ変換により画像を生成することにより、要求する印象を呈するシボをデザインする手法を採用した。

2.1 シボサンプルのデジタル画像作成

シボをシステムに入力するために、30のシボサンプルを用意し、一眼レフカメラ(Nikon製D810)により撮影しデジタルデータを得た。そのデジタルシボ画像を、トリミングにより2048×2048ピクセルの画像とした。図1は、得られたシボ画像例を示している。

* 原稿受付 令和3年3月9日

掲載決定 令和3年6月30日

** 学生会員 慶應義塾大学大学院(神奈川県横浜市港北区3-14-1)

*** 正会員 慶應義塾大学(神奈川県横浜市港北区3-14-1)

† 南条装備工業株式会社(広島市南区西荒神町1-8)

Fig. 1 Samples of wrinkle-texture images

2.2 感性語の選定

複数の重み付き感性語を用いて、シボの印象を定量的に表現・評価する。感性語の選定にあたり、シボの印象を表す言葉（形容詞）を5名のデザイナーに自由に書き出してもらい、それによって書き出された131語について類義語をまとめることにより、53の感性語候補を抽出した。53の感性語候補について、5名のデザイナーによりKJ法⁴⁾を適用し、意味が対になる2語×5組のデザイナー用感性語を（さらさらーぬめぬめ、しっとりー乾いた、繊細ー単調、深いー浅い、やわらかいーかたい）を決定した。

また、11名のシボ形成製品ユーザ（20歳代）に対して、特徴的なシボを6個提示し、デザイナーから抽出した53の感性語候補に関し、シボ印象を表す感性語として適しているかについて、5段階評価アンケートを行った。その評価平均点が3点より大きい語を抽出した結果、12語（凸凹、あらい、くっきり、ざらざら、かたい、がさがさ、細かい、滑らか、緻密、乾いた、ゴツゴツ、やわらかい）が抽出された。さらに、その12の感性語について、10のシボサンプルに関する印象を5段階で評価するアンケートを行い、その結果のクラス分析より12の感性語が3つのクラスに分類でき、各クラスからアンケートの評価平均点が最も高かった語を代表語として選び、シボ形成製品ユーザ用の感性語として3語（凸凹、ざらざら、細かい）を決定した。

2.3 シボ印象のパワースペクトル特徴パラメータの導出

(1) 感性データの収集

シボデザイナー5名を被験者として、シボサンプル30個に対して、2語×5組のデザイナー用感性語について官能評価実験を行った。また、31名の20歳代を被験者として、シボサンプル30個に対して、シボ形成製品ユーザ用の感性語3語について官能評価実験を行った。

(2) 2次元フーリエ変換によるシボ印象特徴の抽出

シボは凹凸や溝の繰り返し模様によりその印象を呈しているため、シボ印象の特徴を2次元フーリエ変換により抽出できる⁵⁾。シボのデジタル画像をグレースケールに変換し、2次元フーリエ変換によりパワースペクトル画像を得た。

図2はシボのデジタル画像例を示しており、同図に示される画像の任意の画素位置 (x, y) における輝度値を $B(x, y)$ とすると、周波数 u, v をパラメータとする2次元フーリエ変換値 $F(u, v)$ は、式(1)で表される。

$$F(u, v) = \iint_{-\infty}^{\infty} B(x, y) e^{-i2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (1)$$

図3は、周波数 f を中心からの距離として、周波数のパワースペクトルを輝度値として表している。図3の結果より、

Fig. 2 Wrinkle-texture

Fig. 3 Power Spectrum Picture (PSP)

(a) Division of PSP

(b) Power Spectrum Curve

Fig. 4 Method of analyzing the wrinkle-texture

図4(a)に示すように、同心円状（離散周波数領域）に分割した領域内のパワースペクトル値の平均値とその領域の周波数より、周波数 f とパワースペクトル P の関係を求めた。この周波数 f とパワースペクトル P の例として、図4(b)に、両対数曲線（周波数－パワースペクトル曲線）として示している。

30個のシボサンプルについて、図4(b)に示すようなパワースペクトル曲線を導出し、異なる印象のシボに対して、シボ画像のパワースペクトル曲線の横軸 $\log f$ が0.7~3.1の範囲で変化することが分かった。パワースペクトル曲線におけるシボの特徴領域 $\log f$ が0.7~3.1の範囲で $\log f$ を0.1ずつ分割し、分割した範囲ごとにその $\log P$ の平均値を算出し、この24の数値をシボの印象を表すパワースペクトル特徴量とした。

2.4 シボ印象（重み付き感性語）からパワースペクトル特徴量を導出するニューラルネットワークの構築

30個のシボサンプルに対して、5名のデザイナーより2語×5組のデザイナー用感性語について、31名の20歳代シボ形成製品ユーザよりシボ形成製品ユーザ用の3つの感性語について、5段階（1~5点）で官能評価するアンケートを実施した。シボサンプルに関して、それぞれの感性語の重み（評価値）をニューラルネットワークの入力とし、各シボサンプルの2次元フーリエ変換より得られたシボ印象を表す24のパワースペクトル特徴量をニューラルネットワークの出力として、ニューラルネットワーク構築の学習データとした。すなわち、学習データは、デザイナー用ニューラルネットワークに対して5名×30サンプルで150個、シボ形成製品ユーザ用ニューラルネットワークに対して31名×30サンプルで930個である。

ニューラルネットワークの構造は、入力層が1層、中間層が2層、出力層が1層とした。デザイナー用のノード数は、入力層が10個（2語×5組の感性語）、中間層が20個、出力層が24個（24のパワースペクトル特徴量）、シボ形成製品ユーザ用のノ

Fig. 5 Result of wrinkle-texture design

ード数は、入力層が3個（3個の感性語）、中間層が6個、出力層が24個（24のワースペクトル特徴量）とした。活性化関数は、出力層以外がシグモイド関数、出力層がソフトプラス関数を用いた。学習回数は6000回とし、学習アルゴリズムはバックプロパゲーションを用いた。

2.5 感性に基づくシボデザインシステムを用いたデザインプロセス

以下の(1)~(3)のプロセスにより、要求する印象を呈するシボをデザインする。

(1) プロセス1

シボサンプルの中から要求するシボに類似していると思われるシボをシステムに入力し、ワースペクトル曲線を獲得する。

(2) プロセス2

デザイン実行者（デザイナーあるいはシボ形成製品ユーザ）が要求するシボを各感性語に関して数値（1~5）で表現し、その数値を2.4で構築したニューラルネットワークに入力して、24のシボ印象ワースペクトル特徴量を導出する。

(3) プロセス3

プロセス1で導出されたワースペクトル曲線を、プロセス2において導出された24のシボ印象ワースペクトル特徴量に修正することにより得られたワースペクトル曲線を逆フーリエ変換⁹⁾し、シボを生成する。

2.6 システムの実行結果

図5は、システムによりシボをデザインした例を示している。図5(a)は、シボ形成製品ユーザによる「凸凹」の評価平均値が最も低かったシボサンプルについて、「凸凹」の要求値を5に変えてデザインした結果である。入力したシボサ

Fig. 6 Power spectrum features

Fig. 7 Image style transfer

ンプルと比較し凹凸感が強調されていることが分かる。図5(b)は、シボ形成製品ユーザによる「ざらざら」の評価平均値が最も低かったシボサンプルについて、「ざらざら」の要求値を5に変えてデザインした結果である。入力したシボサンプルと比較し細かな溝や凹凸が強調されている。図5(c)は、シボ形成製品ユーザによる「細かい」の評価平均値が最も低かったシボサンプルについて、「細かい」の要求値を5に変えてデザインした結果であり、入力したシボサンプルと比較し溝部分の輝度が小さくなり、全体的な輝度値の差が小さくなっている。

重み付き感性語で表現されたシボの印象と、24個のワースペクトル特徴量の関係について検討する。図6は、学習したニューラルネットワークにより出力された24個のワースペクトル特徴量を示している。図6における黒線は、全ての感性語の重みを1にした時の出力であるワースペクトル特徴量を示している。同図の赤線は、「凸凹」の重みを1から5に変化させた時のワースペクトル特徴量結果である。また、同図の緑線、青線は、「ざらざら」、「細かい」の重みを1から5に変化させた時のワースペクトル特徴量結果をそれぞれ示している。

これらの結果より、感性語ごとにワースペクトル特徴量の変化が異なり、それぞれ表す異なる印象が、ワースペクトル特徴量の変化となって表れている。「凸凹」の重みを大きくすると、低周波領域、すなわち大きな模様が強調されている。「ざらざら」の重みを大きくすると、「凸凹」と比較して高周波領域、すなわち細かい模様や質感が強調される。また、「細かい」の重みを大きくすると、「凸凹」と低周波領域が弱まっていることが分かる。

システムの有用性を確認するため、評価実験を行った。評価実験では、シボ形成製品ユーザ用システムに関して、シボ形成製品ユーザ用の感性語（3語）に関して入力値を変化させ

Fig. 8 Wrinkle image style transfer

て生成した試料を5枚ずつ用意し、12名の20歳代被験者により、その感性語に対し当てはまる順位を回答する順位法を用い、評価結果をフリードマンの検定法を用いて判定した。検定の結果、全ての感性語で99%有意であることが確認された。アンケートによって得られた順位が、シボを生成する際に本システムに入力した印象の順位(重み)と一致しているかを調べるため、スピアマンの順位相関係数による評価を適用した。その結果、全ての感性語で、スピアマンの順位相関係数が0.9以上となり、有意性が確認できた。

3. 印象の融合によるシボデザイン

ある印象を呈するシボに対し、それとは異なる印象を融合した新たなシボを生成するシステムを開発した。

3.1 印象融合方法

異なるシボの印象を融合する方法として、画風変換を採用した。画風変換は2015年にGatyら⁸⁾によって提案された手法であり、図7に示すように、同図(a)のコンテンツ画像に写る物体の配置をそのままに、その画像の画風を同図(b)に示すスタイル画像の画風に転写変換し、同図(c)に示す画像を生成する技術である。同技術は、畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を基礎として、誤差逆伝播法により少しずつ画像を修正し、新たな画像を生成する手法である。本研究では、CNNとして学習済みネットワークVGG-16によ

り印象融合システムを構築した。コンテンツ画像とスタイル画像の融合において、Gatysらはコンテンツ画像とスタイル画像の損失を最小化することにより二つの画像の融合を行っている。このときコンテンツ画像の損失とスタイル画像の損失に対して、それぞれ重み係数 α と β を与えている。重み係数 α に対して β を大きくすると、スタイル画像の画風が強く反映される。

3.2 印象を融合したシボデザイン結果

図8は、構築したシステムにより印象を融合し、シボをデザインした結果を示している。コンテンツ画像およびスタイル画像のサイズを1024×1024ピクセルとし、グレースケールに変換して印象融合システムに入力した。実行環境は、Google ColaboratoryのGPU(メモリ12GB)を使用し、2000回繰り返し計算を行った時の処理時間は48minであった。図8に示すデザイン生成において、コンテンツ画像とスタイル画像に対する重み係数 α と β について、 α/β を全て0.005とした。同図に示す結果より、コンテンツ画像として入力したシボに対し、スタイル画像として入力したシボの質感や細かい凹凸感が付与されていることが確認できる。

印象の融合によるシボデザインシステムの評価のために、シボに関わるデザイナー5名に対し実行結果を提示し、実際の意匠デザインにおける同システムの有用性を5段階(1~5点)で評価するアンケートを実施した。その結果、平均が3.6点

となり、システムの有用性について概ね肯定的な意見を確認した。一方、画像の鮮明化に対する要求や、感覚的な融合制御を可能にしてほしいなどの意見もあり、今後の改良も必要である。

4. シボ連結システム

一定サイズのシボサンプルを連結し、要求される寸法のシボを生成する。本研究では、大きさが $60 \times 60 \text{ mm}$ のシボサンプルを、撮影画素数 2048×2048 ピクセルで撮影した。

4.1 色むらの補正

シボサンプルを撮影する際に、光源の状態により、シボ表面からの光の反射によって色むらが発生し、シボを連結した時に、色むらによって連結画像全体の輝度の変化が不均一になり、自然な印象が損なわれる。そのため、撮影シボ画像の色むらの補正を行った。図9(a)に示すように、シボの画像を縦横に8分割し、各分割範囲の輝度値の平均値を求めた。輝度値の分布は撮影環境に依存するが、本研究の撮影環境では、同図(b)に示すように、各分割領域の中心位置を x, y 値、輝度値の平均値を z 値として、輝度値を位置の2次曲面として定義した。この2次曲面式を用いて、各画素の位置から輝度値を算出し、各画素の輝度値から算出された輝度値を減算し、色むらの補正を行った。

4.2 シボ連結法

シボを連結するため、吉本ら¹⁰⁾のイメージキルティング法に基づくテクスチャ合成法を採用した。図10は、イメージキルティング法によるシボ連結の概要を示している。イメージキルティング法は、画像の不自然な接続を低減するため、画像を接続する際に境界面を重ね合わせ、その重複領域において隣り合うピクセルの輝度値の差が小さくなるような経路を縫うように探索し、その経路で繋ぎ合わせ、画像を接続する手法である。具体的には、以下の(1)~(10)の手順によりシボ連結を行った。

- (1) 連結の基となるシボサンプル画像から、1/4 サイズのパッチをランダムに切り取り、要求寸法シボ画像（生成シボ画像）の隅に配置する。
- (2) 連結の基となるシボサンプル画像から、1/4 サイズのパッチをランダムに切り取って、既に配置されているパッチに対して、その1/8が重複するように配置する。
- (3) 重複部分において、重複している画像の各ピクセルの輝度値の差を算出する。
- (4) 重複部分において切断経路を探索する際に、接続部分の2つの画像の輝度値の差が小さい経路を探索するため、図11に示すように、注目ピクセルから探索方向の次のピクセルの列（あるいは行）において、注目ピクセルに接するピクセルから2ピクセル離れたピクセルの範囲内（計5ピクセル）から順次ピクセルAを選択する。
- (5) 図11に示すように、注目ピクセルから探索方向の次の次のピクセルの列（あるいは行）において、上記(4)で選択したピクセルAから2ピクセル離れたピクセルの範囲内でピクセルBを選択し、ピクセルAとピクセルBの輝度値の差の和が最小となる組み合わせを選択する。
- (6) 上記(5)で選択されたピクセルを注目ピクセルに接続されるピクセル（切断経路）として決定する。
- (7) 上記のプロセス(4)~(6)を繰り返すことにより、重複部分の切断線を決定する。
- (8) 上記(7)において、パッチの境界線部分（切断部分）の輝度値の差が大きくなるようにするため、境界線の輝度値の差に閾値を設け、閾値を超えた場合、パッチの選択をやり直す。
- (9) n 段目の横方向のパッチの連結が終了したら、 $n+1$ 段目の横方向のパッチの連結を行い、 n 段目と $n+1$ 段目

Fig. 12 Results of concatenation of wrinkle images

の切断経路の探索は、横方向のパッチの連結部分の探索と同様の方法で行う。

- (10) 上記のプロセス(2)~(9)を、要求シボ寸法が得られるまで繰り返す。

4.3 システムの実行結果

上述した手法により色むら補正とシボ連結のシステムを

構築し、その実行結果を図 12 に示す。図 12(a)は、連結の基となるシボサンプル画像を示しており、図 12(b)は、シボサンプル画像を処理することなく 4 枚を並べた結果、図 12(c)は、開発したシステムにより、シボサンプル画像の色むら処理を行い、1/4 サイズのシボをランダムに切り取り、連結して生成した結果を示している。図 12(b)と図 12(c)を比較すると、提案システムで出力された図 12(c)の方が境界線の模様と輝度の状態が違和感なく、自然なシボを生成できていることがわかる。これにより提案システムの有用性が確認できた。

5. 結 言

本研究では、デザイナーおよびシボ形成製品ユーザが要求するシボを、感性に基づき容易にかつ迅速にデザインすることを可能とするニューラルネットワークシステムを構築した。同システムでは、デザイナーおよびシボ形成製品ユーザのシボに対する印象を感性語により表現し、シボ画像の 2 次元フーリエ解析から得られるパワースペクトルの特徴量をニューラルネットワークによって要求する印象を呈するように制御し、得られたパワースペクトルの逆フーリエ変換によりシボをデザインする。

学習済み畳み込みニューラルネットワーク (CNN) による画風変換を利用し、異なる印象のシボを融合し、新たなシボをデザインするシステムを開発した。同システムでは、基本となるシボ (コンテンツ画像) に対して印象を付与したいシボ (スタイル画像) を融合する。

イメージキルティング法に基づくテクスチャ合成法を用いて、一定サイズのシボを違和感なく連結し、要求するサイズのシボを生成するシステムを開発した。

参 考 文 献

- 1) 中塚暁志, 青山英樹: デジタルスタイルデザインに関する研究—シボ (テクスチャ) デザインシステムの開発—, 精密工学会誌, **75**, 7 (2009) 847.
- 2) 三浦憲二郎, 臼杵深: デジタルデータに基づくシボ加工技術と ModelingNano プロジェクト, 精密工学会誌, **82**, 11 (2016), 933.
- 3) 鈴木宏正, 原雄司, 瀬戸康史, 森田 修史: 革シボのデザイン及び加工のデジタル化に関するフィージビリティスタディ, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, **B46** (2010) 161.
- 4) 松井啓之: 発想法, 計測と制御, **46**, 4 (2007), 292.
- 5) 秋山 涼, 青山英樹: デジタルスタイルデザインに関する研究—要求する印象を呈する木目模様の生成法—, 精密工学会誌, **80**, 5 (2014) 484.
- 6) 氏原真代, 波田野浩, 福田賢一, 福田寛, 画像数学入門 三角関数 3 訂版, 医療科学社, 157.
- 7) https://www.icice-hbkb.org/files/ad_base/view_pdf.html?p=/files/02/02gun_01hen_02.pdf (アクセス: 2021 年 3 月 9 日)
- 8) Leon A. Gatys et al.: A Neural Algorithm of Artistic Style, arXiv:1508.06576 (CVPR2015 (2015) 1).
- 9) Leon A. Gatys et al.: Image Style Transfer Using Convolutional Neural Networks, Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (2016), 2414.
- 10) 吉本慎吾, 佐藤寛幸, 湯浅哲也, 赤塚孝雄: パッチ手法によるサンプル画像からの広範囲テクスチャ合成法の改善, 日本知能情報ファジィ学会誌, **19**, 2 (2007) 189.