研究論文

質感の測定技術・表現技術の研究（第 2 報）

阿部 淑人* 中部 昇**

Development of Texture Analysis and Synthesis Method for Product Appearance Engineering, Part 2

ABE Yoshito* and NAKABE Noboru **

抄 録

質感の高い製品を生産するにあたっての企画から設計・製造の流れを改善するための取り組みとしてデジタルプロトタイピング技術の開発に取り組んだ。コンピュータグラフィクスによって正確に外観上の質感を表現するための技術課題として形状のモデリングや質感のサンプリング，背景画像の取得など 5 つを検証しおおむね所期の目的を満たすことができた。

1. 緒 言

従来から品質項目として意識されてきた精度や強度，信頼性，機能性などは付加価値の源泉であるが近年はそれらに併せて可愛い(Cawaii)，格好良い，有名ブランド，使い勝手，質感などの特性も付加価値を高める要素として認識されてきている。大半の工程が手作りによる伝統的工芸品にかぎらず大量生産される工業製品でも，質感が品質上重要な位置を占める製品は多い。

しかしながらその企画・設計から製作において，実体以外で質感をうまく表現し理解する手法が確立していないために工程間で誤解が生じたり，多くの試作を行うために多大な時間と費用を要するというなどの課題があった。

機構部品・製品の設計・製造において 3 次元形状の寸法や強度などの共通尺度や表現方法が必要なように，質感部品・製品の設計・製造においては質感の共通尺度や表現方法が必要である。従来は客観的な共通尺度や標準的な表現方法がないままにそれぞれの主観に頼っていたと考えられる。その解決のため質感尺度の測定技術，表現技術，シミュレーション技術，デジタルプロトタイピング技術の開発を目指した。

本研究所でこれまでに導入した設備【多角度分光測色計とリアルタイムレンダリングシステム [1]（高速で写実的なコンピュータ・グラフィックス（CG）システム)】により，質感測定と質感表示について一部実現のめどが立っていたが，まだ実現しなければならない課題が多いため 2 か年計画で研究開発を行った [2]。

2. 研究内容

本研究ではまず，実物の質感測定と仮想的な試作品の表示（CG によるデジタルプロトタイプ）のための技術の確立を目指した。

(1) CAD データのない手工芸品の形状データを迅速にモデリングしパーツ化する技術の開発
(2) さまざまな表面修飾材料や製品パーツの質感データを迅速にサンプリングしテクスチャマップ化する技術の開発
(3) デジタルプロトタイプの臨場感を高めるために背景画像を安価に取得する技術の開発
(4) (1)～(3)のデータを用いて高品位なデジタルプロトタイプを表示する技術の開発
(5) 表面修飾や部品製造の工程における質感品質の測定と制御を実現する技術の開発

おもに(1)～(3)を 1 年目の課題として実施し，(4) ～(5)を 2 年目の課題として実施した。

* 下越技術支援センター

** 研究開発センター

2.1　形状データのモデリング

大量生産する工業製品の設計製造では 3 次元 CAD が普及しているために形状データが設計段階で用意されることが多いが，伝統的工芸品の製作では実体やイメージスケッチなどがあるだけで数値データが存在しないことが多い。そこで形状データのモデリング手法について 3 種類を比較検討する。

まず第 1 は実体の 3 面写真図をもとにした 3 次元モデリングツールによる方法，第 2 にはレーザースキャナによる方法，そして第 3 にはスカルプトソフトウェアによる方法である。

2.2　質感データのサンプリング

実体を使わないで外観のデザインレビューを的確に行うためにはリアリティの高い CG が不可欠であり,形状データと併せて質感データ(テクスチャマップ）がないと写実的 CG は生成できない。そこで本研究では実体のテストピースを撮像した画像をもとにカラーマップ（拡散反射画像)，グロスマップ （鏡面反射画像)，ノーマルマップ （法線方向画像）の 3 テクスチャマップを自動生成するシステムを開発することとした。テストピースを撮像し分析することによって特徴量を抽出しその特徴量をもとに質感データを合成するもので，撮像サブシステムと分析サブシステム，合成サブシステムが必要である。

2.3　背景画像の取得

外観のデザインレビューのために臨場感を高めるには写実性の高い製品 CG が実背景に溶け込んでいる必要がある。大規模な映像プロダクションでは数百万円～数千万円程度のパノラマカメラ例えば PanoScan®や SceneCam®，iStar® などを用いて周囲の背景画像を取得しているが今回はより安価で簡便な方法を模索することとし，デジタルカメラ NEX-5N とパノラマ雲台 Panoland による方法と，3 眼式パノラマカメラ GiroCam による方法，2 眼式パノラマカメラ Ricoh Theta による方法を比較検討した。

2.4　高品位な CG の高臨場感表示

形状モデルデータと適切な質感データ（テクスチャマップ）があれば写実性の高い製品 CG が生成できる [3]。これを実背景に溶け込むようにする方法と臨場感高く表示する方法について検討を行なった。レンダリング（CG 生成）については操作性と生成能力の高さを指標として CG ソフトウェアの nStyler, Maxwell Render, KeyShot を比較検討する。また，高臨場感表示のため通常の液晶ディスプレイ（LCD）などによる表示に加えて，ヘッドマウントディスプレイ（HMD）式と，3D プリンタで出力した単色素体へのプロジェクションマッピング（PM）式を検証する。

2.5　製造工程での品質制御

企画・設計での質感シミュレーション技術の活用にとどまらず製造工程でも安定した質感の品質制御ができないと不十分である。そのためには制御可能パラメータ（原因項目）と質感の測定結果の関係を明らかにし，その関係性から導き出した制御方式を適用する必要がある。

本研究においては，本格的に生産工程での適用までは先々の検討課題として複数条件で製作したテストピース類を多角度分光測色計などで測定することによって原因と結果の関係を把握するまでを目指す。

3.　研究・検証の成果

3.1　形状モデリング手法の比較検討結果

3 次元モデリングツールとしては，造形分野で普及している Rhinoceros®を用いて実証を行った。手順としては実体の 3 面写真の撮影を行い,それをツール上の最下位レイヤーに貼付し，外形を直線や円弧あるいは NURBS 曲線や Bezier 曲線などでトレースした後に立体化するということを，パーツごとに繰り返して全体をモデリングした。幾何学的な形状や単純な形状

であれば比較的簡単にすみ，パーツごとの分解も容易であるというメリットがある。また，実体がなくとも形状イメージが確定していればモデリングが可能である。図 1 にビアカップとティーポット，お猪口のモデリング結果の画像を示す。

3 次元スキャナとしては非接触式のレーザースキャナや接触式の CNC 測定器あるいはハイブリッド式など多様にあるが，本用途では寸法精度的にそれほど要求が高くないことから簡便で安価なことを優先して簡易式のレーザースキャナ NextEngine® HD Pro を用いて実証を行った。NextEngine は投光部と受光部の入った小型ボックス 3D Scanner HD Pro と，回転ステージ MultiDrive，点群データ編集ソフト ScanStudio HD Pro からなるレーザースキャニングシステムである。PC にソフトウェアをインストールして USB インターフェースで接続し起動すると自動でステージを回転させながら順次点群データを取り込み断片的な点群データを合成して形状データを生成する。急須程度の小型物であればオートスキャンが可能であるため手軽に形状モデリングができるというメリットがあるが，一体構造で表面修飾が複数個となるような製品の場合にはパーツに分解する編集操作が別途必要である。また，金属光沢を有するような材料あるいはガラスのような透明な材料などについては取得が困難であるという弱点がある。光沢材料などの場合には表面に制汗スプレイ（例えば AG^{+}など）などの白色微粉末を噴霧するとスキャン性が向上する。図 2 と図 3 に NextEngine によるモデリング途中の様子とモデリング結果を示す。

スカルプトツールとはコンピュータのタッチパネルディスプレイなどを用いて仮想的に粘土細工のように形状を造形する CG ツールで自然物などの形状モデリングに適している。普及版のツールとして ZBrush®を用いて検証を行った。これはスカルプト単体のツールでなく通常の 3 次元モデリングやレンダリングもできる統合 3 次元 CG ツールである。金工や彫刻などの工芸品の造形に通じるところがあるため新商品の企画・設計時のモデリングに適していると考えられる。図 4 に片口のモデリング結果例を示す。

前述のとおり 3 種類のモデリング手法について比較検討を行ったがそれぞれ一長一短があり用途によって使い分けることが現実的であることがわかった。単純な幾何学的形状の組合せで造形できる製品の場合には CAD などの 3 次元モデリングツールを用いるのが適している。表面修飾が複数に分かれることなく単一のテクスチャで表現できる物体であって複雑形状（ただしできるだけ凹部のない形状）についてはレーザースキャナを用いるのが適している。また，企画・設計時に試行錯誤的に造形を行うにはスカルプトツールを用いるのが適している。

図 1　Rhinoceros によるモデリング結果

図 2　NextEngine によるモデリング

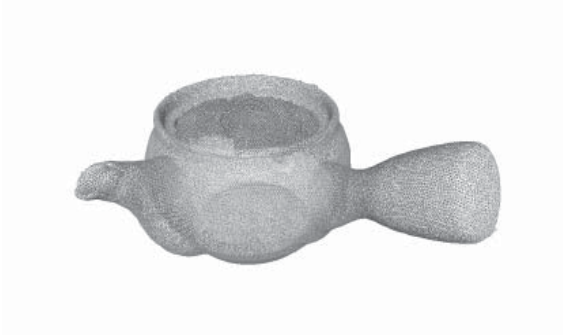

図 3　NextEngine による急須のモデリング結果

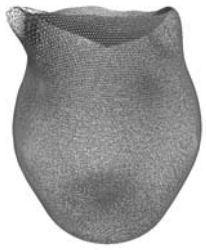

図 4　ZBrush による片口のモデリング結果

3.2　テクスチャマップの分析合成システム

テクスチャマップを合成するにはテストピースに表現された模様や凹凸などを正確に分析し合成のために必要な情報を抽出する必要がある。抽出されたパラメータをもとに所定のアルゴリズムによって拡散色，鏡面反射色，凹凸の各テクスチャマップを合成する。分析のための撮像サブシステムの設計を昨年度いったん完了したが，分析が想定以上に困難なことが判明し現在は再設計中である。合成サブシステムについては鎚起銅器の無数のパターンを生成できるソフトウェアと木目金と呼ばれる断層模様を発生できるソフトウェア，竹塗りや磯草塗，青貝塗など 40 種類以上の漆塗りの無数のバリエーションを生成できるソフトウェアを実装した。

鎚起銅器のテクスチャマップは鎚を打つことをモデル化し 2 次元の非等方的ガウス波形を連続的に平板上に叩きこむことを模擬して作成した。非等方的ガウス波形は

$$D(x,y) = A\exp(-\frac{p^2}{2\sigma_x^2} - \frac{q^2}{2\sigma_y^2})$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x-u \\ y-v \end{bmatrix}$$

で表され，A は振幅，(u,v)は中心位置，σ^2は各分散，θ は軸の回転角である。これらのパラメータを適切に揺動しながら凹凸（高低）を濃淡で表現した画像を作成する。図 5 には非等方的ガウス波形（上下逆）の例を示す。この濃淡画像に適切なカラールックアップテーブルを適用すると拡散色と正反射色のマップを生成できる。凹凸データとしては高低を濃淡で表したデプスマップと法線方向を 3 原色で表したノーマルマップがある。本研究ではおもにノーマルマップを生成した。

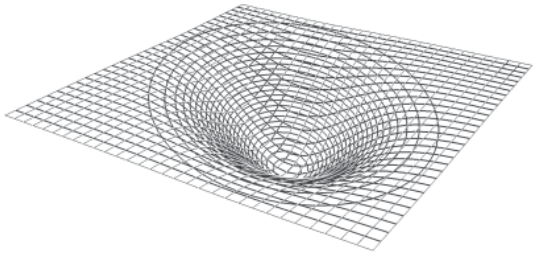

図 5　非等方的ガウス波形の一例

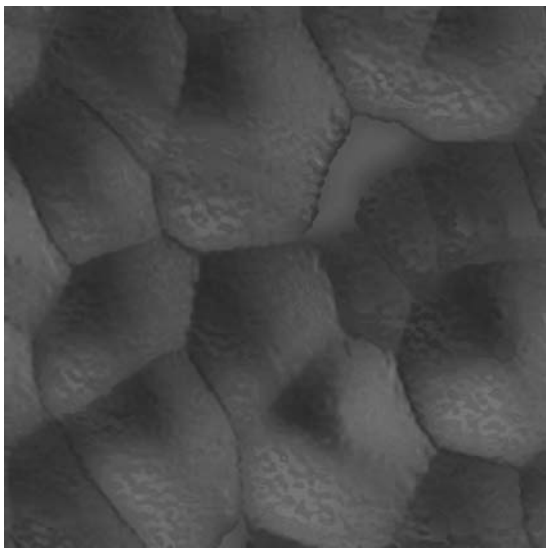

図 6　鎚打模様のノーマルマップ

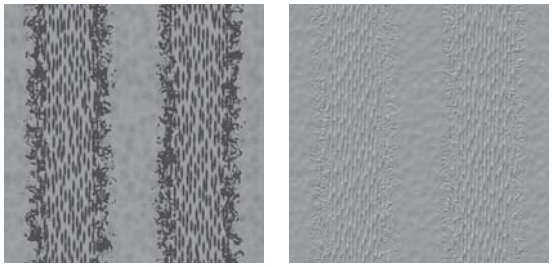

図 7　テクスチャマップの一例

図 8　人工テクスチャを適用した CG 画像

図 9　螺鈿と蒔絵で仕上げたスマホケース

図 6 には鎚打模様のノーマルマップを拡大した様子を示す。法線の XYZ 各成分を RGB 各成分で表現している。図 7 には鎚起銅器のために生成した拡散カラーマップ（左）とノーマルマップ（右）の例を示す。図 8 には図 1 の形状に漆塗りと鎚起銅器の人工テクスチャマップを適用した CG 画像例を示す。また，図 9 には紗綾形の地紋に四君子の丸という伝統的和模様 [4]をモチーフにした螺鈿と蒔絵の漆塗りの CG を示す。金箔の光沢や質感はもとより貝殻の薄膜干渉による発色パターンを写実的に合成することができた。

3.3　背景画像の取得方法検証

安価に背景画像（360°×180°）を取得する方法としてパノラマ雲台にデジタルカメラを装着して複数枚画像を撮像して合成する方法と 3 眼式および 2 眼式パノラマカメラで自動生成する方法を比較検討した。結論としては複数枚の合成方式は高精細な画像が得られる反面撮像に多くの時間を要し合成ミスによる継ぎ目の顕在化などの課題が残り，3 眼式はそれに比べると短時間で撮像できることと 3 ショットでハイダイナミックレンジ（HDR）撮像が可能なことが特徴である。2 眼式はさらに簡便な撮像が可能で装置も小型であるため使い勝手が良い。HDR 画像を得るためには個別に HDR 合成を行う必要があるが景色によっては背景用として HDR でなくとも利用可能なため簡便さを優先して当面は 2 眼式を採用することにした。

図 10 パノラマカメラ（左:GiroCam　右:Theta）

図 11　パノラマ画像例

図 10 にパノラマカメラの外観画像を，図 11 にパノラマ画像例を示す。GiroCam は斜め上を向いた 3 眼により水平 360° 垂直 180°（うち有効は上部 120°）の 6000 画素×3000 画素のパノラマ画像が撮像でき，Theta は水平方向を向いた 2 眼により水平 360° 垂直 180°（ほぼ死角なし）の 3584 画素×1742 画素のパノラマ画像が撮像できる。

3.4　高精細 CG の高臨場感表示結果

図 12 には図 8 と同様の CG を実写背景と合成した様子を示す。レンダラの比較では品質と操作性のバランスからおもに KeyShot を選出した。他方，より一層臨場感を高める方法として 3 次元 HMD 方式と素体 PM 方式を検証した。

図 13 は Oculus Rift というヴァーチャルリアリティ（VR）用 HMD に Leap Motion というジェスチャー認識デバイスを組合せた表示システムである。図の奥側左手に表示用のステレオ画像があり，これらがそれぞれ手前左手にある 2 つのレンズから見える。また手前右手にある黒い箱がジェスチャー認識デバイスである。

この表示と操作のために Processing[5] というソフトウェア開発環境でソフトウェアを開発した。HMD にはあらかじめレンダリングされた周回画像をジェスチャーで操作できるようにした。

図 14 には 3 次元プリンタで出力した竹塗りの一輪挿しの素体（左）とマッピング後（右）の様子を示す。3D プリンタに出力した同一の形状モデルに竹塗のテクスチャを用いてレンダリングした CG 画像（図 15）を投影したものである。建造物の壁面などの大きな構造物へ投影する一般的なプロジェクションマッピングと比べて，細部の焦点調整や位置調整などで難点があるものの，素体単体と比較してテクスチャが付加された分素材の表情が向上し 3 次元プリンタの試作品に足りない質感を補うことができることがわかった。

図 12　CG と実写背景の合成例

図 13　3 次元 HMD 方式

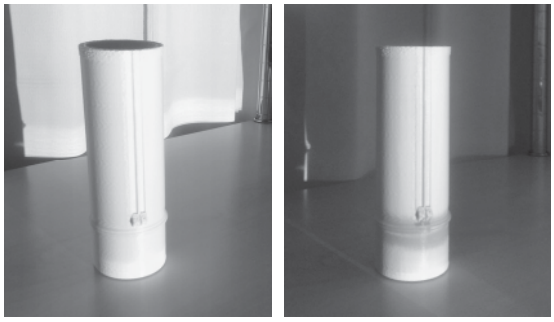

図 14　プロジェクションマッピング方式

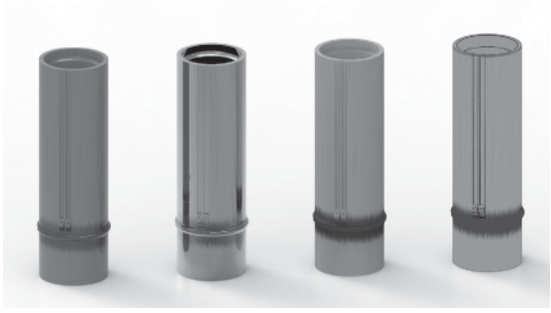

図 15　竹塗の一輪挿しモデル

3.5　質感品質の測定と制御

品質の管理においては測定と制御が不可欠である。一般的には原因項目を変化した時の結果項目を測定し因果関係を明らかにして制御方式が決定される。前節まで説明を行ったテクスチャ（模様）については自然あるいは人工の揺らぎや自己組織化作用に基づくため数値での管理は困難である。模様のないおおむね一様な部分についてはDIN6175-2で規定される多角度分光測色値を尺度として用いることが可能と思われる。これは分光測色計 BYK-mac によって測定できる値で，高級乗用車の塗装に使用されるパールやメタリックなどエフェクト塗料の定量評価に使用されている[6]。

表1に紫金色と呼ばれる表面処理銅板の測色例を示す。鉛直からみて 45°の角度から投光し正反射方向からの偏角（Aspecular Angle）ごとにCIELAB値を測定してある。±15°の値からは青緑系の正反射色であることがわかる。また45°の行から拡散反射色は，赤紫がかった濃墨であることがわかる。

表1　紫金色銅板の多角度分光測色例

Aspecular	*L**	*a**	*b**
-15°	75.16	-6.17	-11.94
15°	70.15	-6.64	-11.76
25°	42.57	-3.83	-7.79
45°	20.03	0.43	-1.85
75°	11.73	2.40	0.98
115°	8.34	2.38	1.25

4.　結　　言

(1) 伝統的工芸品を始めとする質感製品のデジタルプロトタイピング技術を開発した。

(2) テクスチャマップの分析合成システムの完成と質感品質マネジメントシステムの構築に向けて引き続き研究開発を行う必要がある。

参考文献

1) T. Akenine-Moeller and E.Haines, *Real-Time Rendering Second Edition*, A. K. Peters, Ltd, MA，2002.

2) 阿部ほか，“質感の測定技術・表現技術の研究 ”，工業技術研究報告書，No.42，2013, pp.68-71.

3) M. Phar and G. Humphreys, *Physically Based Rendering Second Edition*，Morgan Kaufmann, MA，2010.

4) 京千代紙と和の紋様セレクション，インプレスジャパン，2009.

5) www.processing.org

6) G.Kigle-Bockler ， "Standardized Color Management System"，*BYK User Meeting*, Tokyo International Forum，Feb. 2012.