

パーツごとの肌状態を考慮した肌微細構造の画像計測とCG表現

安江 志織[†] 伊藤 貴之[†] スリニバーサナラシンハン^{††} 豊田 成人^{†††}

[†] お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究所 〒112-8610 東京都文京区大塚2-1-1

^{††} カーネギーメロン大学 5000 Forbes Avenue Pittsburgh, PA 15213

^{†††} 資生堂グローバルイノベーションセンター 〒220-0011 神奈川県横浜市西区高島一丁目2番11号

E-mail: [†]{yasue.shiori,itot}@is.ocha.ac.jp, ^{††}srinivas@andrew.cmu.edu, ^{†††}naruhi.toyoda@to.shisedo.co.jp

あらまし 我々は皮溝・皮丘・毛穴などの肌微細構造をCGで表現する研究に取り組んでいる。旧来の実装ではポリゴンとして生成し表示してきたが、ポリゴン生成の所要時間とデータ量が大きいことが問題となっていた。また、顎を撮影した画像だけを参照して肌微細構造モデルを生成していたため、顔のパーツごとによる肌状態の違いに起因する混合肌などの状況を表現できていなかった。そこで我々は、顔を構成する22か所（撮影点と呼ぶ）における肌画像を撮影して肌微細構造の特徴量を推定し、撮影点周辺の微細構造を補間する手法を開発した。さらに、微細形状をポリゴンではなく変位マップで表現する実装を開発し、独自に実装したシェーダープログラミングと汎用CGソフトウェア Houdini を用いて2通りのレンダリングを試みた。本論文では、以上の方針にもとづく肌微細構造の画像計測およびCG表現の処理手順と実行例を示し、今後の展望を議論する。

キーワード 肌微細構造、画像計測、変位マッピング、ポリゴン、GPU

1 はじめに

肌状態は顔の印象に大きく影響するため、人々は肌の見た目に関して非常に敏感である。また、肌状態は肌形状によってキメやシワ、ハリ、水分量、毛穴の大きさといった多くの要因により変化する。この肌の微細な形状を表現することは、科学技術の多様な分野においてとても興味深い。特に、肌表現においてはCG(コンピュータグラフィックス)やCV(コンピュータビジョン)、美容、医療に関する研究が活発に発表されている[1]。この中でも特に化粧品業界では、店頭などのカウンターで、カメラや専用機で撮影した拡大画像をもとにした肌状態の分析・診断が広く実施されている。またCGの最近の研究では、得られた拡大画像から肌の微細構造を表現する手法[2]も発表されている。

我々は、多様な肌状態に対応する肌微細構造を自在に表現したいという考え方から、3次元モデリング技術を用いて肌状態に応じた微細構造を表現し、肌質感の変化をシミュレートする研究に取り組んできた[3]。この研究では、マイクロスコープカメラで顎を撮影し得た1枚の拡大画像から、毛穴・皮溝・皮丘といった微細構造を認識し各種特徴量を抽出し、それを参考する形で肌微細構造の3次元形状モデルのサンプルを生成する。このサンプル形状における特徴量を調節することによって、多様な肌状態・質感の表現が可能となる。また、肌微細構造をポリゴンで表現し3次元の顔モデルに貼り付けることによって、顔の微細な形状表現を可能にする。

しかし当時の実装では、顔全体の微細構造を表現するためのポリゴン数は約500万～1000万個におよび、これをファイル出力すると1GB以上となっていた。さらにポリゴンの生成と貼り付けに汎用PCで1時間以上を要し、ファイルの入出力に

も大きな時間を要していた。そこで、店頭等での実用化を目指すためにはデータ量の削減と処理の高速化を図る必要があった。

また、整った肌や荒れた肌では毛穴・皮溝・皮丘に明確な特徴があるが、その中間的存在である乾燥肌や、乾燥と脂っぽさがある混合肌では、毛穴・皮溝・皮丘の特徴が多様であり、さらに部位によってこれらの特徴も変化する。我々の従来の研究ではその点を考慮した結果を出していなかった。そこで我々は混合肌の再現や、部位ごとの特徴の再現を目指した。

本研究ではまず顔を11のパーツに分割し、合計22点を撮影して肌微細構造の特徴量を推定し、撮影点の特徴量をもとに周辺の微細構造を補間することで、パーツごとの肌状態の違いの表現を試みた。これらの特徴量は肌のCG表現のために用いるだけでなく、肌状態の傾向を分析するためのデータベース構築の材料として活用することもできる。さらに我々は、肌微細形状の表現にポリゴンを用いる代わりに、変位マッピングというCG技術を利用して微細形状の凹凸を表現する実装を開発した。レンダリングはシェーダー言語 GLSL による独自実装と、汎用CGソフトウェア Houdini¹で実施した。

我々は実験例として「混合肌らしいと判定される肌」と「混合肌らしくないと判定される肌」の肌微細構造の違いを計測・表現できるかについて取り組んだ。15名の女性被撮影者の顔の22点を撮影して特徴量を推定し、そのパーツごとの差が大きい被撮影者・差が小さい被撮影者を1名ずつ選出し、それぞれの肌微細構造をCGで再現してその差異について検証した。本報告では、これらの実験において提案手法による画像生成結果および処理時間を我々の従来の実装と比較し、その改善について考察する。

1 : Houdini, <https://www.sidefx.com/ja/>. 参照: 2020-1-1

2 関連研究

美容分野における既存の肌分析手法は、大きく以下の2つに分類される。

- マイクロスコープなどの専用機器により得られた肌の接写画像から分析する方法
- レプリカを使用し肌の形状を転写したものから分析する方法

肌接写画像から分析する方法として、荒川らはマイクロスコープによって皮膚表面の拡大画像を撮影し得た画像から皮丘・皮溝・毛穴を認識し抽出する手法を提案している[4]。拡大画像における毛穴・皮溝の赤みに着目し、各微細構造について独自の方法を適用し抽出している。また、年代や季節による微細構造の変化の計測実験も行っており、算出した数値と美容技術者による視感評価との相関が高いという結果が得られている。

レプリカを使用した肌分析手法として、小林らは採取したレプリカの輝度値から得られたグレースケール画像を解析に用いている[5]。この手法では皮溝検出に十字二値化法[6]と短直線マッチングを使用し、96種類の定量的指標に対して重回帰分析を用いて視感評価を推定する手法を採用している。その結果、半数以上の画像にて、重回帰分析からの推定値と実際の視感評価が一致したという結果が得られている。レプリカは肌分析を行う際に形状情報を取得する手法として広く使用されている。しかし、シリコン製のレプリカ剤を乾燥させた上で厳密な環境のもとで測定する必要があることから、手間と時間がかかるため、多くの被験者を対象とする場合は適さない。また、以上の研究はいずれも、肌の形状を数値化し視感評価結果と比較することを目的としており、微細構造の形状を独立に変化させることによる顔全体の影響の評価は目的としていない。

CG技術によって肌微細形状を表現する研究も活発に発表されている。Haroらは顔のパートによって肌質が異なることに着目し、多様な顔領域の肌形状をレプリカを使用して取得し、法線マップに変換して画素単位のバンプマッピングを施すことでCGで肌を表現している[7]。この他にも、高精細な撮影機器で顔全体や肌を撮影したものから高さ情報を持つ画像を生成し、変位マッピングでよりリアルな肌表現を可能にした手法もある[8][9][10]。これらはいずれも、計測結果として得られた微細形状から肌を表現しているため、多様な肌状態を表現するためには、それぞれの肌状態に応じた肌形状の計測結果が必要となる。これに対し、近年、敵対的生成ネットワーク(GAN)を使用し、撮影した複数の顔モデルのテクスチャからフォトリアリスティックにテクスチャを合成する研究も発表されている[11][12][13]。これにより、微細形状を高解像度に合成することが可能となっているが、微細形状ごとに数値を調整して形状を変化させることはできない。

Vanderfeestenらは、肌画像からシワを抽出し、得られたデータからシワモデルを生成し変位マッピングする方法を開発している[2]。画像からシワの特徴量とシワの分布を推定することにより、同じ分布で異なる特徴量を適用した新たなシワモデルの

生成に成功している。しかし、手の甲を撮影した画像を用いて開発されており、顔の肌画像での応用は言及されていない。また、皮溝に類似したシワの特徴量推定に留まっており、見た目に大きく影響する毛穴や、肌状態、特に乾燥の程度を表現するのに必要不可欠な皮丘の検出と特徴量推定はされていない。

3 処理手順

本章では、マイクロスコープカメラによる拡大画像から肌微細構造を画像計測し、その結果をもとにCGを用いて肌微細構造を再現する処理手順を示す。

3.1 肌画像撮影

まず顔を図1のように、額・右目・左目・鼻・右内頬・左内頬・右外頬・左外頬・鼻下・口・頸の11のパートに分割する。そして青点のように撮影点を割り振り、合計22か所を撮影する。

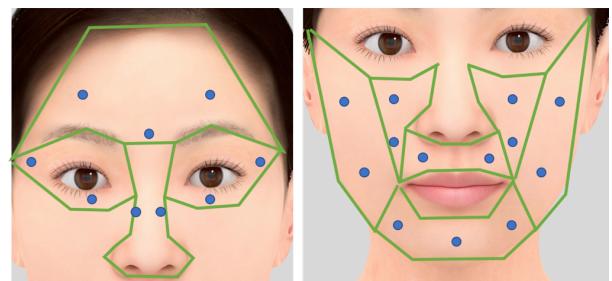


図1 分割した11のパート(緑枠内)と撮影点(青)。

撮影には肌や頭皮のカウンセリング用に開発されたMORITEX社のマイクロスコープカメラi-SCOPE USB2.0²に50xPLレンズを装着したものを使用した。このカメラは、光反射の有無を選択して撮影することができるモードが搭載されている。本手法では、肌拡大画像から各微細構造を認識する必要があるため、皮丘と皮溝の判別がより明確な反射ありモードで撮影した画像を使用した。

3.2 肌画像からの肌微細構造の特徴量推定

次に、撮影した画像から毛穴・皮溝の特徴量を推定する。この推定には我々による既存研究[3]を適用する。

3.2.1 毛穴・皮溝検出

まず入力画像に白黒二値化処理を適用する。現時点では、二値化のための閾値は我々の経験に基づき手動で設定している。続いて、この白黒画像に対し、図2(左)に示すように、円形領域をテンプレートとして画像内の黒領域を探索する。本手法では、テンプレートの最小半径と最大半径を各画像ごとに設定している。この処理によって抽出された円形の黒領域を本手法では毛穴とみなす。また、図2(右)に示すように、毛穴以外の画素において細く伸びる黒領域を検出し、これを皮溝とみなす。ここでは16方向の黒い線分のいずれかを引いた円をテンプレートとして探索している。皮溝検出においても、テンプレートの半径を事前に設定している。

2: i-SCOPE USB2.0, <https://www.moritex.co.jp/products/cosmetic/i-scope.php>. 参照: 2020-1-1.

3.2.2 輝度値算出

続いて、毛穴、皮溝として認識された箇所の輝度値を算出する。検出された毛穴と皮溝を白黒画像の上に重ねて表示した結果を図3(左)に示す。この図において、シアンの円が毛穴、マゼンタの線分が皮溝を表す。本手法ではシアンおよびマゼンタの図形が重なった位置の輝度値をそれぞれ算出する。この輝度値計算には、肌拡大画像にコントラスト制限付き適応ヒストグラム平坦化(CLAHE: Contrast limited adaptive histogram equalization)[14]を適用した画像を使用する。CLAHEとは、画像を小さな領域に分割し領域ごとにヒストグラム平坦化を行う適応ヒストグラム平坦化に、ノイズの過剰な增幅を抑えるためにコントラストに制限を設けた手法である。本手法では、入力画像を 8×8 の小領域に分割し、ヒストグラムのビンの上限値を2.0に設定してOpenCVでグレースケール画像を生成した。生成したグレースケール画像と輝度値を算出する毛穴、皮溝の位置を重ねて表示したものを図3(右)に示す。以上の処理により得られた輝度値から毛穴、皮溝の深さを推定する。

なお本研究では処理を簡略化するために、同じ半径の毛穴は同程度の深さである可能性が高い、また同じ方向の皮溝は同程度の深さである可能性が高い、とみなす。そこで本手法では、毛穴は半径ごと、皮溝は角度ごとに輝度値を集計し、各半径における輝度値の平均値から各半径の毛穴の深さを、各角度における輝度値の平均値から各角度の皮溝の深さを推定する。

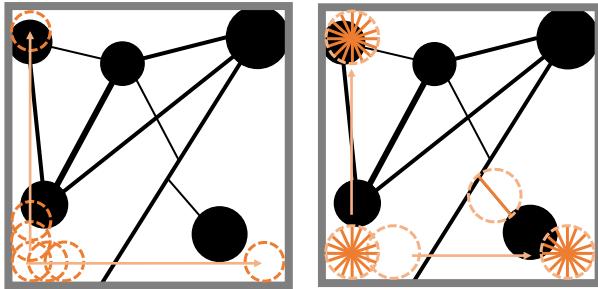


図2 (左) 毛穴検出、(右) 皮溝検出.[3]

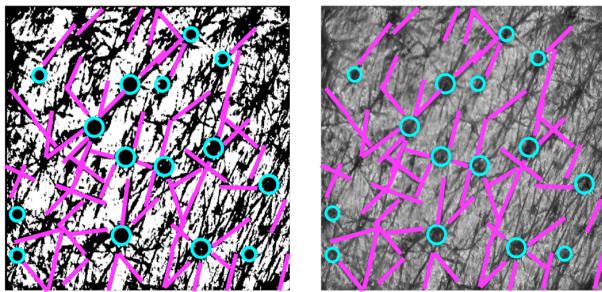


図3 (左) 白黒画像と毛穴・皮溝検出位置。(右) グレースケール画像と毛穴・皮溝検出位置。

3.2.3 ヒストグラム

以上の処理により得た特徴量をヒストグラムに記録する。特徴量のヒストグラム生成には既存研究[15]を適用する。ヒストグラムを生成することで、肌画像から得られた乾燥や加齢等の肌状態の特徴をCG形状生成に反映できる。

ヒストグラムに記録する特徴量の一覧を表1に示す。検出した毛穴の位置から毛穴平均距離を、輝度値から深さを算出する。

また、検出した皮溝の角度分布から角度別皮溝数エントロピーを算出する。更に、白黒画像から白領域を特定し、白領域の平均画素数を皮丘の平均面積として算出する。なお、毛穴探索時の半径の最大値と最小値は画像によって異なることから、本手法では半径別の毛穴数と深さの段階数はヒストグラムによって異なるものとする。

表1 ヒストグラムに記録する特徴量

毛穴	総毛穴数、半径別毛穴数、平均距離、半径別深さ
皮溝	角度別皮溝数(15段階)、幅別皮溝数(20段階) 幅別深さ(20段階)、角度別皮溝数エントロピー
皮丘	平均面積

この処理を22枚の画像について適用し、各々の画像に対応した22個のヒストグラムを生成する。

3.3 CG生成のためのパターン生成

次に肌微細構造のパターンを生成する。

3.3.1 パターン生成

パターンとは毛穴・皮溝・皮丘の配置と接続構造のことであり、この生成も既存研究[3]を適用する。図4にその原理を示す。図4(左)に示すように、この処理ではまず多数の毛穴をランダムに生成し、続いて図4(中)のように毛穴を接続する三角メッシュを生成し、三角形辺を皮溝、三角形領域を皮丘とする。本手法では、毛穴の大きさや皮溝の深さ、皮丘の高さなどをパラメータとして、パターンを生成している。現時点では、これらのパラメータのうち毛穴の半径・平均距離・深さ、皮溝の幅・角度・深さ、皮丘の平均面積の各値を、3.2.3節で説明した処理によって生成したヒストグラムから参照している。パターン生成の際、皮溝の交点全てを毛穴として表現すると実際の肌画像と比較して違和感が生じる。図5は実際の肌画像であり、左の肌画像は毛穴が多く見受けられる一方、右の肌画像はほとんどが皮溝の交点である印象を受ける。よって、肌状態によっては全ての皮溝の交点が毛穴のように見えるわけではないため、図4(右)のように、ヒストグラムの毛穴数に応じた割合で毛穴半径を大幅に小さくすることで皮溝の交点を表現する。

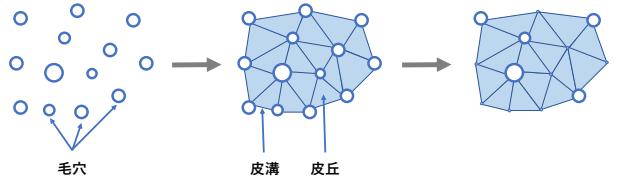


図4 肌微細構造の表現のためのパターン生成[3]

3.3.2 補間

パターン生成の過程において参照するヒストグラムがない部分、つまり図1に示した22か所の撮影点の中間に位置する部位では、同じパート内の撮影点における特徴量からの補間にによって特徴量を算出する。図6に原理を示す。図6はある1つのパート内を表しており、青の領域は撮影点、オレンジの領域

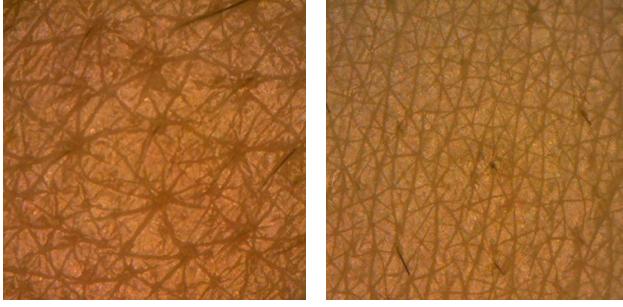


図 5 肌拡大画像の例

は撮影点の中間で補間の対象となる点、緑の枠はパートの境界を表している。本手法ではパートによって異なる肌状態を表現するために、撮影していない点であるオレンジの領域における特徴量の値を求めたい場合は、同じパート内である緑枠内の青で示した撮影点の特徴量数値を用いる。適用可能な補間方法には三角形分割補間やスプライン補間などがあげられる[16]が、現時点では式1に示すように、撮影点からの距離で重み付けをした逆距離加重法でヒストグラムを補間している。式1において、 n は同一パート内のヒストグラム数、 h_i は撮影点 i におけるヒストグラムの値、 d_i は撮影点 i から補間の対象となる点までの距離を表す。

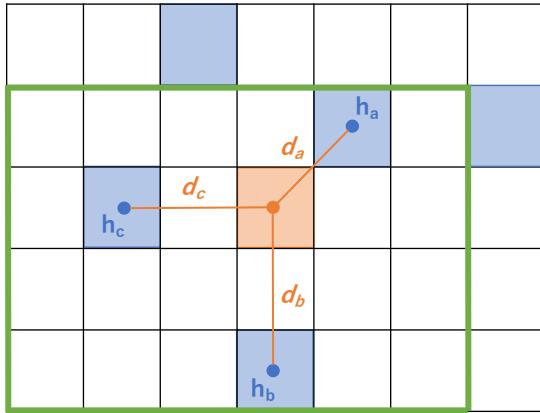


図 6 同一パート内からの特徴量補間算出の概要図

$$h = \frac{\sum_{i=0}^n (\frac{1}{d_i})^2 h_i}{\sum_{i=0}^n (\frac{1}{d_i})^2} \quad (1)$$

3.4 CG 生成のための変位マップ生成

図4に示す方法でパターンを生成したのちに本手法では、ポリゴンの代わりにこのパターンを格子で覆い、各格子点での高さ（または深さ）を計算する。この格子をグレースケール画像に変換し、格子点の高さを画素値とすることで、変位マップを生成する。格子点の座標値を \mathbf{g} としたとき、その点における高さ・深さ h の算出には以下の3種類の関数を実装する。

(1) ある毛穴の中心点 \mathbf{c}_p と \mathbf{g} との距離 d_p が毛穴半径 r_p 以下である場合には、その格子点は毛穴内部にあるとして、 d_p

と r_p の関数によって深さを算出する。

(2) ある皮溝を表す線分と \mathbf{g} との距離 d_f が皮溝幅 w_f 以下である場合には、その格子は皮溝内部にあるとして、 w_f と d_f の関数によって深さを算出する。

(3) (1), (2) のいずれにも該当しない場合には、格子点 \mathbf{g} を内包する皮丘を特定し、その皮丘の中心点 \mathbf{c}_r と \mathbf{g} の関数によって高さを算出する。

3.5 変位マッピングによる描画

生成した変位マップを用いて、顔の3Dモデル上で微細構造を表現する。我々は、シェーダー言語 GLSL を適用したシェーダープログラミングによる独自実装での高速描画と、汎用CGソフトウェアである Houdini を用いた高品質描画を試みた。

3.5.1 GLSL による独自実装

GLSL による独自実装では、対象オブジェクトのメッシュを細かく分割する「テッセレーション」という処理を事前制御している。概要図を図7(上)に示す。テッセレーションは、微細な変位と詳細な形状変化を表現するための重要な処理であるが、描画処理が重くなる要因でもある。我々の実装では、顔全体を見られる遠距離に視点があるときには粗く、微細構造を認識できる近距離に視点があるときには細かく分割するように、我々の経験に基づいて表2に示すようにテッセレーションの解像度を顔中心から視点までの距離 d_{face} から導出することにした。解像度設定の概要図を図7(下)に示す。ここで経験的に $d_{f1} = 0.18w_{face}$, $d_{f2} = 0.27w_{face}$ とした。 w_{face} は顔形状モデルの左右方向の幅である。

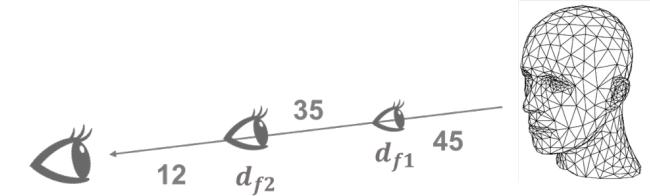
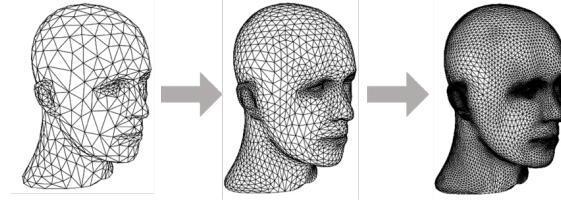


図 7 (上) テッセレーションの概要図。 (下) 解像度設定の概要図。

表 2 テッセレーションの解像度

距離	$d_{face} \leq d_{f1}$	$d_{f1} < d_{face} \leq d_{f2}$	$d_{f2} < d_{face}$
解像度	45	35	12

また、レンダリング時の画素値算出には、Blinn-Phong 反射モデルによるフォンシェーディングを採用している。変位マップ生成時に、毛穴・皮溝は暗い、皮丘は明るい肌色が、深さと高さに応じて段階的に変化するようテクスチャマップを生成し、これを画素値計算に用いる。

3.5.2 Houdini によるレンダリング

Houdini を使用したレンダリングでは、変位マッピングと並行して、表面下散乱を導入する。変位マッピングは Principled Shader を使用し、Displacement タブ内でマップを指定、Effect Scale で変位度合いを調節する。テッセレーションに関しては、1画素あたり 1 ポリゴンになるように分割パラメータを自動調整する。また、表面下散乱は肌の高品質な表現のために搭載されている Skin Shader を使用する。表面下散乱はサンプリング数が低いとノイズが発生するため、サンプリング数を既定値の 3 から 20 に増やし、ノイズが少なくなるよう調整した。

4 実 行 例

前章で示した処理手順によって肌の微細構造を計測し表現した結果を示す。

4.1 画像計測

本実験では、15 人（20 代 12 人、50 代 3 人）の女性の肌拡大画像を撮影し、本手法で特徴量を抽出した。続いて各パートの撮影点における特徴量を比較し、その差を各パートの肌状態の差とみなすこと、どれだけパート間の肌状態が異なるか、言い換えればどれだけ混合肌であるかを分析した。ただし、鼻は構造上皮溝がなく、毛穴が目立つ傾向がみられたため、本論文では比較の対象外とした。

なお、各微細構造の特徴として、毛穴が目立って存在する領域は局所的である一方、皮丘一つ一つの面積が小さい肌や皮溝角度のばらつきが大きい肌は、乾燥していない肌である可能性が高く、そのぶん肌特有のツヤがみられる可能性が高い。そこで本実験では、顔全体にわたって変化が現れやすく、乾燥による変化も見受けられる皮溝と皮丘に着目し、撮影画像ごとに算出した、皮丘一つ一つの大きさの平均を表す「皮丘平均面積[17]」と、皮溝の角度のばらつき、言い換えればキメが整っているかを表す「角度別皮溝数エントロピー」の 2 つの特徴量を比較用いた。

統いて測定結果から、パート間の特徴量の差の大きい被撮影者と小さい被撮影者を探査した。本実験では、各被験者の任意の異なるパートを撮影した写真ペアに対して「皮丘平均面積の差を正規化した値 a 」と「皮溝角度分布エントロピーの差を正規化した値 e 」を求め、さらにこの値の原点からのユークリッド距離 $v_{ae} = (a^2 + e^2)^{0.5}$ を求めた。15 人の被撮影者の各々において v_{ae} が最大となる値を散布図にプロットした結果を図 8 に示す。縦軸が角度別皮溝数エントロピーの差、横軸が皮丘平均面積の差であり、原点から遠い点ほどパートごとの肌状態の差が大きく、近い点ほど肌状態の差が小さいことを示している。図 8 により、 v_{ae} を最大とする皮丘平均面積・角度別皮溝数エントロピーの値は被撮影者によって大きく異なることから、人によってパートごとの肌状態の差は多様であることがわかった。なお、今回の実験において「20 代は差が小さく 50 代は差が大きい」というような年齢によるパートごとの肌状態の差の影響は見受けられなかった。

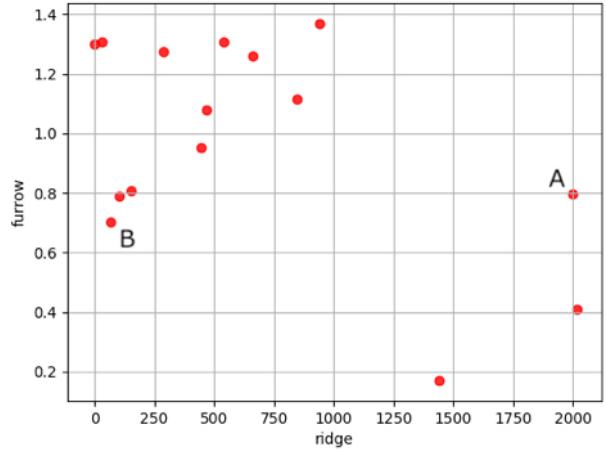


図 8 分析結果

以上の結果において「 v_{ae} の最大値が大きい被撮影者」は混合肌らしい肌であり、「 v_{ae} の最大値が小さい被撮影者」は顔全体において一様な肌状態であると考えられる。そこで本実験では v_{ae} の最大値が大きい被撮影者（図 8A）のデータを「整っていない肌の代表」として選出した。また、 v_{ae} の最大値が最も小さい被撮影者（図 8B）のデータを「整っている肌の代表」として選出した。

4.2 レンダリング

前節で選出した A, B について、GLSL による独自実装と Houdini の 2 通りで変位マッピングした結果を示す。なお、実行環境は Apple Mac Pro (CPU: Intel Xeon E5 3.5GHz 6-Core, GPU: AMD FirePro D500, RAM: 16GB) である。

4.2.1 独自実装での描画結果

独自実装による顔全体の描画結果を図 9 に、これを異なるパートにおいて微細構造が見えるまで拡大した描画結果を図 10 に示す。いずれも A と B を入力データとした描画結果を比較するものであり、図 9 は顔全体を、図 10 上段は A、下段は B それぞれ異なるパートを拡大して描画した結果である。

図 9 より、顔全体が収まるほどズームアウトした状態での描画結果からは、両者の肌状態の違いは明確に視認できないが、混合肌である A の方が、微細形状による凹凸が細かい部分と荒い部分の差が大きいように見受けられた。

混合肌である A について異なるパートを描画したもの拡大した図 10 上段では、右の描画結果は左上から右下に流れる皮溝が多い印象を受けた。また、皮溝が潰れたことによる皮丘の連結も多数見受けられることから、皮丘一つ一つの大きさや皮溝の角度分布に大きな差があることがわかった。実際、皮丘平均面積は（左）343.80pixel と（右）946.09pixel であり、角度別皮溝数エントロピーは（左）2.28 と（右）1.84 であった。毛穴に関しては左の描画結果の方がや目立つ印象を受けた。

一方で、混合肌ではない B について異なるパートを描画したもの拡大した図 10 下段では、右の描画結果の方が皮丘の連結や毛穴の大きさが少し目立つが、毛穴間距離や皮溝の角度分布はほとんど同様な印象を受けた。実際、皮丘平均面積

は(左)210.31pixelと(右)342.19pixel、角度別皮溝数エントロピーは(左)2.33と(右)2.26であり、混合肌であるAより差が少なかった。

また、図10で使用したA、Bそれぞれの異なる2つのパートにおける皮丘面積のヒストグラムを図11に示す。図11(上)がA、(下)がBのヒストグラムであり、縦軸は全体における皮丘の個数の割合、横軸は皮丘の面積を表している。また、青とオレンジのグラフがそれぞれ図10の(左)(右)の皮丘面積分布を表している。混合肌ではないBの方が、2本のグラフ間の差が少ないように見受けられる。以上により、顔のパートによって肌状態が大きく異なる複数の被撮影者から抽出した特徴量を用いることで、本手法によってパートごとに多様な肌状態を有する肌を表現できることがわかった。

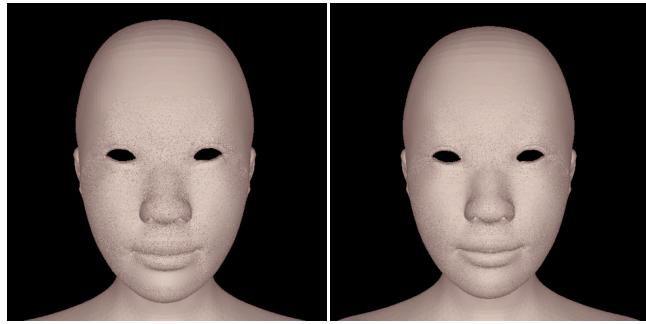


図9 GLSLを用いた独自実装による顔全体の描画結果。(左)データAを用いた描画結果。(右)データBを用いた描画結果。

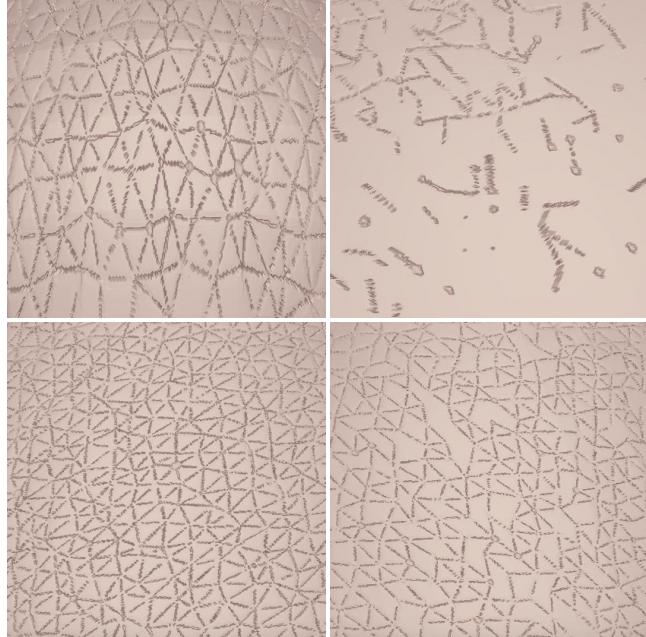


図10 GLSLを用いた独自実装による顔の部分拡大描画結果。(上段)データA。(下段)データB。

4.2.2 本実装での計算時間

従来手法[3]および本報告で示す独自実装における顔全体描画の計算時間をまとめた結果を表3,4に示す。ここで表3における「肌の生成」は、パターンからポリゴンを生成することで2次元平面上に微細構造を生成する処理、「顔モデルへの貼り付け」は、生成した微細構造を顔の3Dモデルに貼り付けレンダリングする処理に相当する。また、表4における「マップ生成」

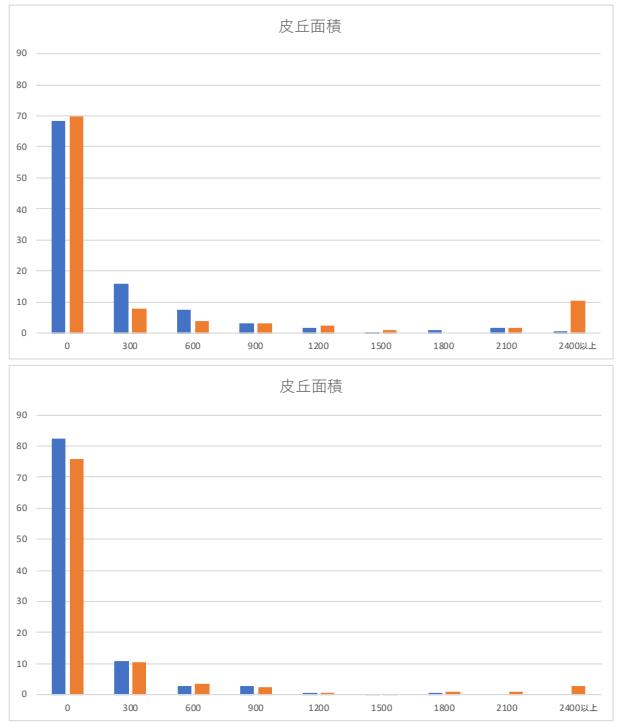


図11 皮丘面積のヒストグラムの比較。(上)データA、(下)データB。

は顔全体を覆う5200×4000の変位マップ生成に要した時間であり、「レンダリング」はCPUによる顔モデルと変位マップの読み込み、さらにGPUの処理全体を含む。従来手法では顔全体のモデル生成および描画に約80分かかっていたのに対し、本実装では変位マップ生成に12分弱、レンダリングに約3秒となった。変位マップの導入によってレンダリングの時間が大幅に短縮されているものの、フレームごとのテッセレーションと画素値計算の処理により、フレームレートは顔全体描画時で約15fps、拡大描画では約1fpsとなり、キメが見えるまで拡大するとかなり描画速度は遅くなることがわかった。

表3 従来手法の計算時間(秒)

肌の生成	顔モデルへの貼り付け	合計
4809.0	125.4	4834.4

表4 本実装での計算時間(秒)

マップ生成	レンダリング	合計
707.04	3.25	710.29

4.2.3 Houdiniでの描画結果

Houdiniでの描画結果を図12、図13に示す。図12は顔全体の描画結果を、図13は上段がA、下段がBの異なるパートにおいて微細構造が見えるまで拡大して描画した結果である。顔全体を描画した場合はまだAとBの差を明確に視認することはできないが、表面下散乱による特有の光反射が表現できた。また、拡大描画すると各々の肌状態を表現できていることがわかる。図13上段から、Aはパートによって皮丘の大きさに大きな差があり、皮溝の角度分布や皮溝の長さにもばらつきが見受けられた。一方で、図13下段より、Bは皮丘の面積や毛穴数に多少の差があるものの、皮溝の長さや角度分布にはあまり

差が見受けられなかった。

我々は Houdini 上で Principled Shader と Skin Shader の 2 種類のシェーダーを組み合わせたレンダリングを試みたが、人間の肌に近い表現のために使用した Skin Shader は表面下散乱を表現しているため、1 フレームに約 2 時間とレンダリングに非常に時間がかかった。また、独自実装による描画結果と比較して、同じ変位マップを使用しても表面下散乱の影響で微細構造の凹凸感がやや弱く、ブラーがかかったように感じられた。

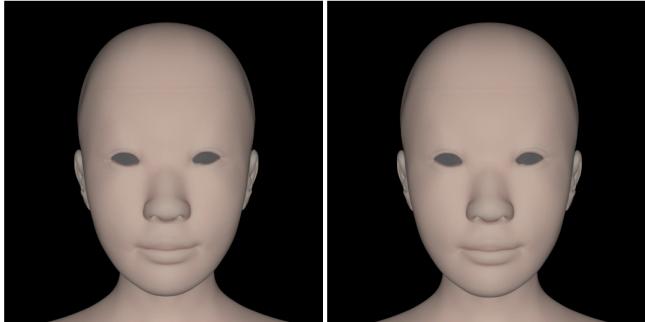


図 12 Houdini での描画結果。(左) A の顔全体。(右) B の顔全体。

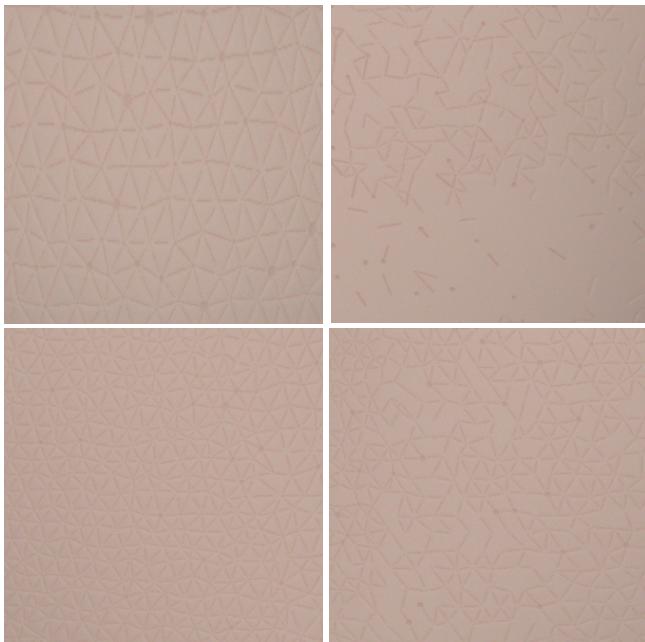


図 13 Houdini による部分拡大描画結果。(上段) データ A. (下段) データ B.

4.2.4 従来手法との比較

ポリゴンを生成する従来手法 [3] と本手法の結果を比較した結果を図 14 に示す。(a)(b)(c) は顔全体の描画結果、(e)(f)(g) は肌画像 (d) のデータをもとに描画した結果である。従来の描画結果では毛穴の輪郭や皮溝が不自然に目立っていたのに対し、変位マッピングを使用した本手法ではそれに比べて自然な凹凸を再現できた。また図 14 上段に示す顔全体の描画結果にて、ポリゴンを生成する従来手法では顔のハイライトにアーティファクトがみられたが、本手法ではそれが解消された自然な描画結果となっており、微細形状の細かな凹凸によって生成される肌独自の光反射と艶が表現できていることがわかる。拡大描画結果においても、皮丘の凸部と毛穴・皮溝の凹部が滑らかに表現

できた。また Houdini の Skin Shader を使用することで、人間の肌特有の光反射である表面下散乱を再現し、より実際の肌に近い質感を表現できた。

5 まとめ

我々は肌微細構造の画像計測と CG 表現の研究の一環として、各パートを撮影した計 22 枚の画像から肌微細構造の特微量を推定することで、顔のパートごとの肌状態の計測と表現を試みた。また CG 表現の実装において、ポリゴンの代わりに変位マッピングを適用し、GLSL を用いた独自実装と、汎用 CG ソフトウェア Houdini を用いて 2 通りのレンダリングを試みた。この試みにより、毛穴や皮溝、皮丘の特微量をパートごとに個別に設定することで、顔全体にわたるパートごとの肌状態の違いを表現できるようになった。また、独自実装においては従来手法と比較し計算時間が約 1/7 となり、GPU を使用した描画所要時間を 3 秒程度に抑えることができた。また、2 通りのレンダリングによって従来手法 [3] よりも自然な描画結果が得られた上に、Houdini では人間の肌特有の光反射である表面下散乱を導入でき、より現実の肌に近い質感を表現できた。

一方で、現時点での実装ではうまく特微量を抽出できない肌撮影画像もあった。例えば、表面が白い毛穴や油分が多い毛穴は、マイクロスコープカメラで撮影すると明るく写るため二値化によって白画素になってしまい、毛穴として認識されなかつた。また、額や頬先など皮膚下の筋肉の影響を受け皮溝が流れてしまっている肌や、皮溝が途切れ消失てしまっている肌は、微細構造の認識が難しく、その結果として画像の特徴を反映したパターンと変位マップの生成が困難であった。さらに、主に鼻にみられる現象として、皮溝がほぼ無く毛穴のみで構成される肌微細構造もあった。現時点での実装ではこのような肌をパターンとして生成できないため、変位マップの生成も困難であった。

今後の課題として、撮影画像から皮丘の高さを推定することで、乾燥による肌状態の変化を忠実に表現したい。また、微細構造が壊れている肌や皮溝が消失した肌に対しても、より忠実にパターンを生成するように改良を重ねたい。また、現状の実装では特微量推定のためのパラメータ制御の過程が一部手動となっているが、これを自動化するための一手段として、多数の被写体からの肌撮影画像を収集して肌状態を数値化・データ化し、機械学習を導入してこれをモデル化することを考えている。

さらに、幅広い年代の女性の肌データを集め、エイジングがどのように進行し、肌微細構造はどのように変化するのか調査したいと考えている。その他にも、水分を与えることで微細構造自体が変化するため、スキンケア前後でどのように肌微細構造が変化するかを実験し、変化を数値で表現することも検討している。将来的にこれらの技術は、肌の分析結果をもとに一人一人に合った商品の提供や、オーダーメイドな商品作りに役立つと考える。

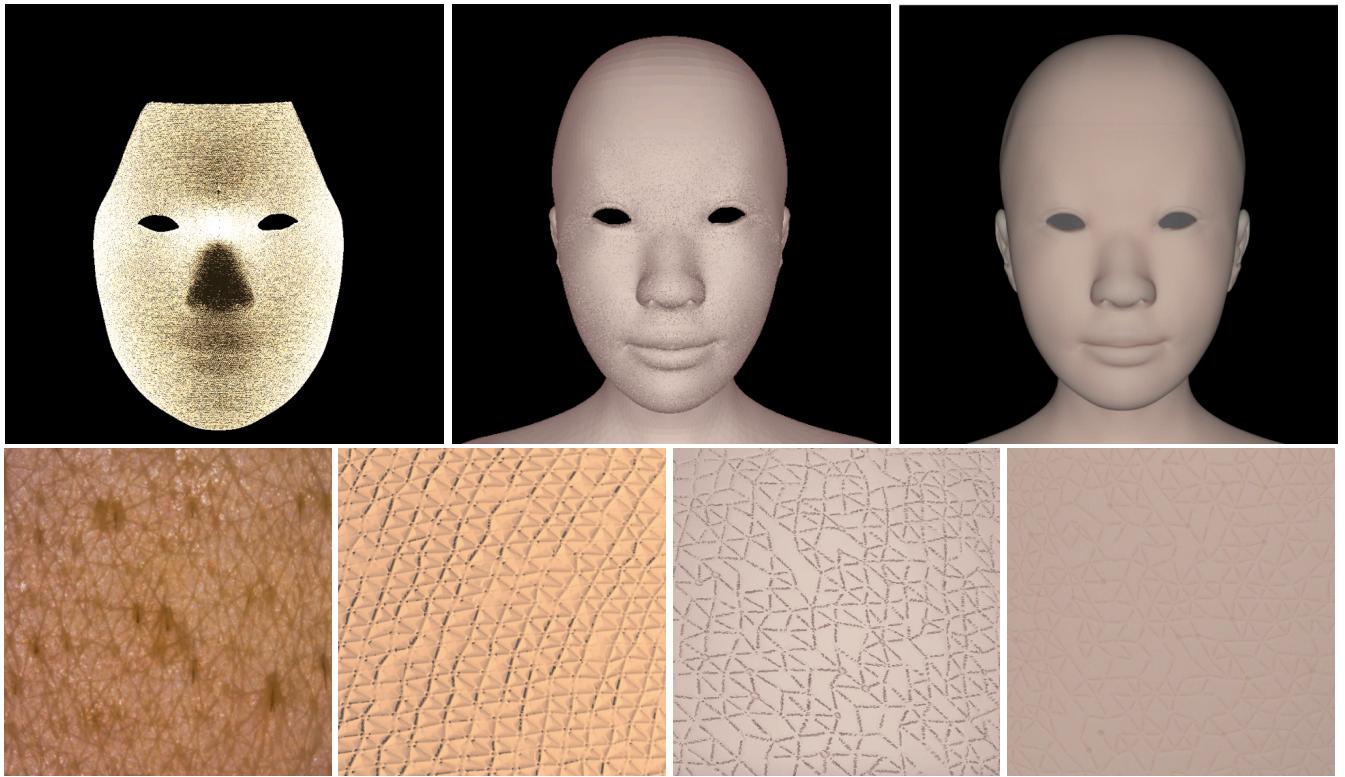


図 14 先行研究 [3] と本手法の比較。左上から (a) 先行研究による顔全体の描画。(b) GLSL を用いた独自実装による顔全体の描画。(c) Houdini による顔全体の描画。(d) 描画元データの肌画像。(e) 先行研究による部分拡大描画。(f) GLSL を用いた独自実装による部分拡大描画。(g) Houdini による部分拡大描画。

文 献

- [1] T. Igarashi, K. Nishino S. K. Nayar. “The Appearance of Human Skin: A Survey“, Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, 3(1), 2007.
- [2] R. Vanderfeesten, J. Bikker, “Example-Based Skin Wrinkle Displacement Maps“, The 31st Conference on Graphics, Patterns and Images, 2018.
- [3] F. Banba, T. Itoh, M. Inomata, M. Kurokawa, N. Toyoda, H. Otaka, H. Sasamoto. “Micro-Geometric Skin Simulation for Face Impression Analysis“, 芸術科学会論文誌, 13(1), 11-20, 2014.
- [4] 荒川 尚美, 大西 浩之, 外田 勇二. “ビデオマイクロスコープを用いた皮膚の表面形態解 析法の開発とキメ・毛穴の実態調査 “, 日本化粧品技術者会誌, 41(3), 173-180, 2007.
- [5] 小林 宏, 橋本 卓弥, 山崎 和広, 平井 義和. “画像解析による肌のキメの定量的指標の提案と実用化 “, 日本機械学会論文集, 76, 138-145, 2010.
- [6] M. Takahashi. “Comprehensive handbook of contemporary dermatology“, Nakayama-Shoten, 90-B, 13-28, 1990.
- [7] A. Haro, B. Guenter, I. Essa, “Real-time Photo-Realistic Physically Based Rendering of Fine Scale Human Skin Structure“, 12th Eurographics Workshop on Rendering Techniques, 53-62, 2001.
- [8] K. Nagano, G. Fyffe, O. Alexander, J. Barbic, H. Li, A. Ghosh, P. Debevec. “Skin Microstructure Deformation with Displacement Map Convolution“, ACM Transactions on Graphics, 34(4), 109, 2015.
- [9] P. Graham, B. Tunwattanapong, J. Busch, X. Yu, A. Jones, P. Debevec, A. Ghosh. “Measurement Based Synthesis of Facial Microgeometry“, Computer Graphics Forum, 32(2pt3), 335-344, 2013.
- [10] L. Huynh, W. Chen, S. Saito, J. Xing, K. Nagano, A. Jones, P. Debevec, H. Li. “Mesoscopic Facial Geometry Inference Using Deep Neural Networks“, The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 8407-8416, 2018.
- [11] S. Saito, L. Wei, L. Hu, K. Nagano, H. Li, “Photorealistic Facial Texture Inference Using Deep Neural Networks“, The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 5144-5153, 2017.
- [12] R. Slossberg, G. Shamai, R. Kimmel, “High Quality Facial Surface and Texture Synthesis via Generative Adversarial Networks“, The European Conference on Computer Vision (ECCV) Workshops, pp. 0-0, 2018.
- [13] G. Shamai, R. Slossberg, R. Kimmel, “Synthesizing Facial Photometries and Corresponding Geometries Using Generative Adversarial Networks“, arXiv preprint arXiv:1901.06551, 2019.
- [14] S.M. Pizer, E.P. Amburn, J.D. Austin, R. Cromartie, A. Geselowitz, T. Greer, B.H. Romeny, J.B. Zimmerman, K. Zuiderveld, Adaptive histogram equalization and its variations“, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Vol. 39, no. 3, pp. 355-368, 1987.
- [15] 古川 ひとみ, 伊藤 貴之, 豊田 成人, 小田 康太郎, “肌接写画像から抽出した特微量ヒストグラムに基づく肌微細構造の CG 表現 “, 情報処理学会第 78 回全国大会, 4W-07, 2016.
- [16] L. Mitas, H. Mitasova. Spatial interpolation, “Geographical Information Systems: Principles Techniques Management and Applications“, 1, 481-492, 1999.
- [17] 安江 志織, 伊藤 貴之, 豊田 成人, “面積ベースの肌微細構造特微量を用いた肌の CG 表現 “, 映像表現・芸術科学フォーラム 2017, 89, 2017.