

分光反射率分析に基づいた化粧と肌のCG再現

CG Reproduction of Makeup and Skin Based on Spectral Reflectance Analysis

田中法博*

望月宏祐**

Norihiro TANAKA Kosuke MOCHIZUKI

概要

本論文では、素肌や化粧をした肌の状態を定量的に分析したり可視化したりするために、肌の分光的な反射特性に着目して、肌の分光反射率分析法と3次元コンピュータグラフィックス(3DCG)再現法を提案する。提案手法では化粧品や肌の状態は、各波長帯の反射特性を調べることで様々な肌の物理的な情報を定量的に分析することができる。次に肌の状態の可視化には分光ベースの3DCGによる再現が有効である。肌は半透明な多層膜で構成されており、その表面下で複雑な光の散乱現象が発生しているため、光が肌表面下で弱まりながら広がることで視覚的に柔らかい陰影として観測される。この肌表面の光の反射プロセスを定量化するために表面下散乱を簡易的に表現できる光反射モデルを構築する。肌の反射特性の可視化は、分光的な肌の反射特性の解析結果と表面下散乱を記述した肌の光反射モデルを用いて素肌や化粧をした肌を3DCG再現する。最後に実際の人の肌を3DCG再現して提案手法の有効性を示した。

キーワード: 肌, 化粧, 分光反射率, 光反射モデル, 3次元コンピュータグラフィックス再現

1. はじめに

人の肌を分光情報に基づいて分析することは色再現や肌の様々な状態を知る上で有効である。たとえば、化粧品分野などで人の肌を詳細にコンピュータグラフィックス(CG)で再現する場合、肌の物理的な状態や実際の化粧品の質感も含めてCG再現が可能となるので分光的なレンダリングが有効であることが示されている[1]。

従来のCGは一般にRGBカラーベースで映像を生成する。これは光の3原色では全ての色は赤(Red)、緑(Green)、青(Blue)の3色を混ぜ合わせることで生成できるという仮説に基づいている。しかし、一般的なカラーデバイス上で使われるRGB情報は撮影デバイスの特性や撮影時の照明環境に依存するという問題がある。つまり、同じ場所、同じ対象を撮影した場合でも撮影するカメラや光源の種類を変更するだけで、

対象の色再現精度が変わるという問題が生じる[2]。さらにRGBの3つの色のセンサー出力情報は肌の物理的な状態を示すことに適していないため、RGB情報から直接肌や化粧品の特性を知ることは難しい。たとえば、ファンデーションの塗布状態を知りたい場合は550nmから600nm付近の吸光度の分析が有効であることが知られているが、RGBの3つのセンサー出力からでは、この吸光度を知ることはできない[3]。この理由は肌の物理的な反射特性の特徴を持つ部分とRGBのセンサー出力が直接対応していないからである。

そこで本研究では、肌の分光的な反射特性に着目して、肌の分光反射率情報に基づいた分析方法とCG再現の方法を示す。分光反射率情報は物体固有の物理情報であるため、カメラ特性や照明環境に依存せず物理的な特性が解析できるという特徴を持つ[4]。化粧品や肌の色は光の波長レベルで分析すると様々

な情報を得ることができる。化粧の状態を分析する場合、化粧直後の肌と化粧後1時間以上経過した肌ではその色はわずかに異なっている。こういったわずかな色の違いを解析する場合、各波長帯の反射特性を調べることで様々な肌の物理的な情報を定量的に分析することが有効となる[5]。

次に分光的な反射特性の分析結果の可視化手法について述べる。肌の状態の可視化には3次元コンピュータグラフィックス(3DCG)による再現が有効である。肌の質感について着目してみると、肌にはプラスチックなどの一般的な物体表面とは違う肌独特の質感が存在する。これは肌が半透明な多層膜で構成されており、その表面下で複雑な光の散乱現象が発生しているため、光が肌表面下で弱まりながら広がることで視覚的に柔らかい陰影として観測されるからである[6]。こういった光の反射プロセスを定量化するために光反射モデルとよばれる数学モデルを用いることが有効である[7]。しかし、この場合、人間の肌の反射特性に適したモデルを使用する必要がある[8]。本稿で述べる肌の反射特性の可視化とは、分光的な肌の反射特性の解析結果と表面下散乱モデルを用いて素肌や化粧をした肌を3DCG再現することである。

そこで本論文では素肌と化粧をした肌を対象に肌の分光反射率分析法とその分析結果と3DCG技術に基づいた可視化手法を提案する。ただし、本論文では化粧はメイクアップ化粧品についてはファンデーションを主たる対象とする。

まず、肌の状態の分析や可視化に適した分光的な光反射モデルを新たに提案し、そのモデルに基づいた人の肌の分光分析法について述べる。次に提案手法を用いて化粧過程による肌の変化を分析し、そして、構築した光反射モデルを用いて肌をCG再現する手法を示す。次に実際の人を対象に肌の分光分析とCG再現の実験を行う。このとき化粧過程によって肌の分光反射率がどのように変化するかを提案手法で解明する。そして、最後に人の肌をCG再現して提案手法の有効性を検証する。

2. 肌の光反射モデル

本研究では肌の表面状態の分析や可視化に光反射モデルを用いる。物体の見え方は光反射に依存するが、この光反射を数学的にモデル化したものが光反射モデル[7]である。本研究では、肌の状態分析や可視化のために肌の表面状態の物理的な特性に直接対応

した光反射モデルを構築する。そこで本研究では新たに以下のように肌の分光的なモデルを構築する。

肌表面の独特な視覚的特徴は、肌が半透明な多層膜で構成されており、表面から内部に光が入り込み複雑に散乱する。3DCGで肌を再現するためには、この視覚的な特徴を数学モデルで記述する必要があるため分光情報と表面下散乱を組み込んだ光反射モデルを構築する必要がある。しかし、光の表面下散乱現象は厳密に計算すれば、膨大な計算量となるという問題がある。そこで本研究では表面下散乱によっておこる陰影の変化を簡易的に近似して記述したモデルを構築する。図1は、光の表面下散乱の様子をモデル図で示したものである。肌独特の柔らかい陰影は、このように肌表面に入射した光が表面下散乱により、入射地点から離れたところからも観測できることにより発生する。この表面下散乱を幾何モデルで表現すると照明方向ベクトルは \mathbf{L} 、視線方向ベクトルは \mathbf{V} 、物体法線ベクトルは \mathbf{N} で示される。さらに \mathbf{N} と \mathbf{L} のなす角は θ_l 、 \mathbf{N} と \mathbf{V} のなす角は θ_v である。

本研究では、表面下散乱モデルを分光モデルで記述する。これにより、CG上の物体の陰影に影響を与えることによって視覚的に肌の質感を表現する。まず文献[9]のWrap Lightingモデルを参考に分光ベースの反射モデルを構築する。ここではOren-Nayar拡散反射モデル[10]を簡易的に近似する。図2は半透明の物体をモデル化したものである。このモデルはレイトレーシングアルゴリズム[11]に基づいて構築している。レイトレーシングアルゴリズムは光の経路の対称性の原理に基づいて光線探索を逆方向、つまり光源からではなく、逆に視点から視線方向に向かって光線を探索する。このアルゴリズムの特徴は光源から光線探索をするのではなく、逆に視点から視線方向に向かって光線を探索することである。視線方向に光線を探索する理由は、光源からの光線探索では目に見えない無駄な光の経路も全て探索するため計算量が爆発的に増えるという問題があるからである。図2では視点から見た視線(光線)が物体内部をとおる光源からの光を見ている様子を示したものである。 s_1, s_2 は、それぞれの経路上で物体内部を通過したときの距離である。光源のエネルギーベクトル分布を $E(\lambda)$ 、半透明物体の通過距離を s とすると物体内を通過することによって減衰した後のエネルギー分布 $E'(\lambda)$ は次式のように示すことができる。

$$E'(\lambda) = E(\lambda) \exp(-s \cdot \delta) \quad (1)$$

δ は物体の不透明度パラメータであり、物体の密度を示す。

最終的に求められる肌からの色信号 $C(\lambda)$ は次の式で求められる。

$$C(\lambda) = \left\{ \mathbf{N} \cdot \mathbf{L} + \frac{\mathbf{N} \cdot \mathbf{L} + l}{1+l} S_s(\lambda) \right\} S(\lambda) E(\lambda) \quad (1)$$

ここで $S(\lambda)$ は肌の分光反射率であり、実際に計測した人の肌の分光反射率を当てはめる。 $S_s(\lambda)$ は散乱した反射光の分光反射率である。これはヘモグロビンの分光吸収率から計算する。 l は散乱の度合いを示すパラメータである。本研究では $l=0.5$ とする。

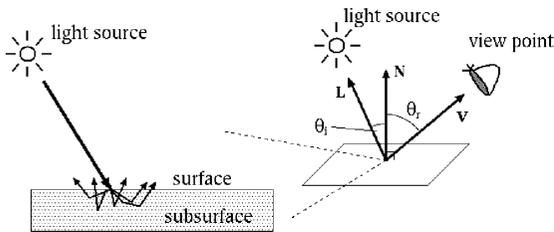


図1. 肌の表面下散乱のモデル

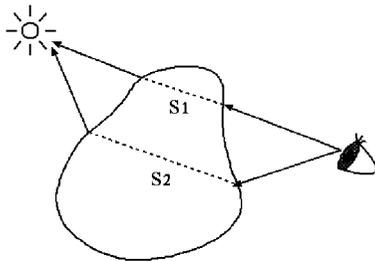


図2. 半透明物体の光の透過モデル



図3. 計測に使用した分光光度計(GretagMacbeth i1)

3. 人の肌の分光反射率分析

人間の肌の色は、皮膚組織の基本的な色に加えてメラニン、ヘモグロビンなどの皮下に含まれる物質の分光吸収率の影響を受ける[5]。メラニンやヘモグロビンの状態は日焼けなどの肌の状況や体調による血流量となって表れる。このメラニンやヘモグロビンの状態は肌を分光的に計測することにより定量的に確認することができる。

肌の分光反射率を分析するために、肌の分光反射率の形状が重要な要素となる[5]。そこで多数の被験者の肌の分光反射率を計測して、その肌の分光反射率の形状の特徴を調べた。図3は分光反射率を計測するために用いた分光光度計である。この分光光度計はGretagMacbeth社製である。図4は20名の18歳から22歳までの男女学生の手の甲の分光反射率の計測結果である。グラフの横軸は波長、縦軸は反射率である。肌の分光反射率は一般的に右上がりのM字型のグラフとなり550nmから600nmまでの波長で反射率の落ち込みがあることがわかる。

分光反射率の形状の変化と物理的な状態を対応させて追跡することで、肌の状態がどのように変化しているのかを定量的に分析することが可能となる。

たとえば、反射率が落ち込んでいる550nm～600nmの波長域はヘモグロビンによる吸光によるもので、この反射率の落ち込みから肌表面で観測されるヘモグロビン量を推定することができる。

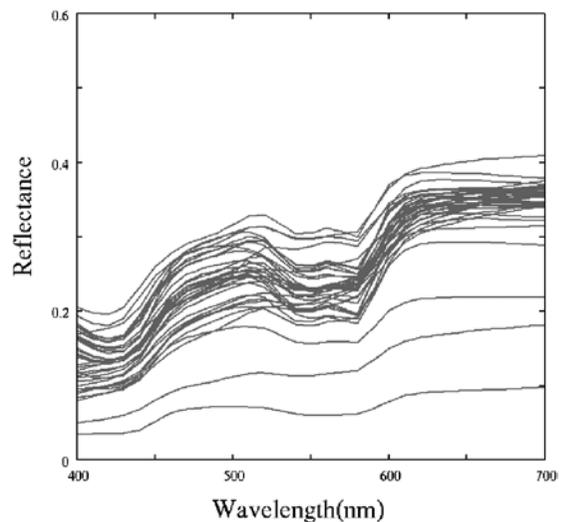


図4. 肌の分光反射率の計測結果

4. ファンデーションの分光反射率計測

化粧品分光反射率分析をするために、まずファンデーション単体の分光反射率を計測する。ファンデーションは肌の分光反射率変化に大きな影響を与える。化粧品単体の分光反射率を求めるため、本稿では明るさの異なる4色のファンデーションの分光反射率を前述の分光光度計で計測した。今回使用した4色のファンデーションは粉末であるので、黒画面紙の上にファンデーションを塗布して分光光度計で計測した。ただし、光反射の影響を最小限にするため事前に黒画面紙の分光反射率を計測しておき、ファンデーション塗布後の分光反射率を黒画面紙の分光反射率で割ることで補正する。図5は黒画面紙上に各ファンデーションを塗布した様子である。図6は各4色のファンデーション(fande23, fande33, fande34,



図5. 黒画面紙に塗布したファンデーション

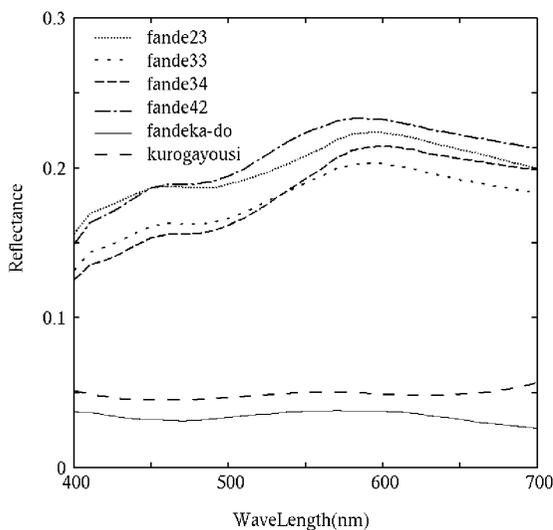


図6. 4色のファンデーションの分光反射率の計測結果

fande42)の分光反射率を計測した結果である。グラフ中のkurogayousiは補正に用いた黒画面紙の分光反射率である。

これらのファンデーションは分光反射率の形状から赤みを持ち、さらに主にヘモグロビン吸光を示す550nm~600nmあたりの反射率が高められていることがわかる。

5. 化粧過程の分析

化粧過程による肌の色の変化を提案手法により分析する。化粧過程は(1)基礎化粧品による肌質を最適なものに整える過程、そして、(2)メイクアップ化粧品により実際に肌の色を決定する過程に分類される。つまり化粧による肌の色は肌本来の色に加えて、基礎化粧品とメイクアップ化粧品による化粧過程全ての作業の結果により決まる。

図7は計測に使用した化粧品である。それぞれの種類は化粧過程の順に①クレンジングオイル、②洗顔料、③化粧水、④乳液、⑤下地乳液、⑥ファンデーション、⑦白粉である。ここで①から⑤は基礎化粧品、⑥と⑦がメイクアップ化粧品となる。本稿では実際の人の肌に対して、①から⑦まで順に化粧を施し、分光反射率を計測する。

このとき化粧を施して数時間過ぎると、人間の肌は塗布した化粧品を吸収し、化粧直後とは違う色となることが知られている。人間の肌は水分や化粧品を微量であるが吸収してしまう特性を持っている。そのため本稿では化粧過程のみでなく時間経過による肌の色の変化も計測する。



図7. 使用した化粧品(①クレンジングオイル, ②洗顔料, ③化粧水, ④乳液, ⑤乳液, ⑥ファンデーション, ⑦白粉)

6. 分光情報に基づいた光反射モデルによる肌のCG再現

素肌や化粧をした肌の状態を3DCG再現するため、分光情報と表面下散乱モデルを組み込んだ光反射モデルを用いる。図8は、本研究で提案する分光情報に基づいた肌のCG再現法の概略図である。光源のエネルギーは分光分布として与え、そこから放射された光は人間の肌の分光反射率に基づいて反射される。そしてその反射光は色信号として視覚系に入射する。(1)式と(2)式で計算された色信号 $C(\lambda)$ は純粋に物理的な光反射の計算である。人間が受ける色刺激は、ここから等色関数 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ を用いて三刺激値CIE-XYZとして求める。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \int_{400}^{700} C(\lambda) \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \quad (2)$$

CIE-XYZからデバイス固有のRGBへの変換プロセスは、まず三刺激値CIE-XYZを 3×3 の変換行列 \mathbf{M} により線形RGB値 $[R_L, G_L, B_L]^T$ に変換し、その後、ディスプレイデバイスの非線形特性であるガンマ特性を補正する。

本研究では肌を高速にレンダリングするため、(1)-

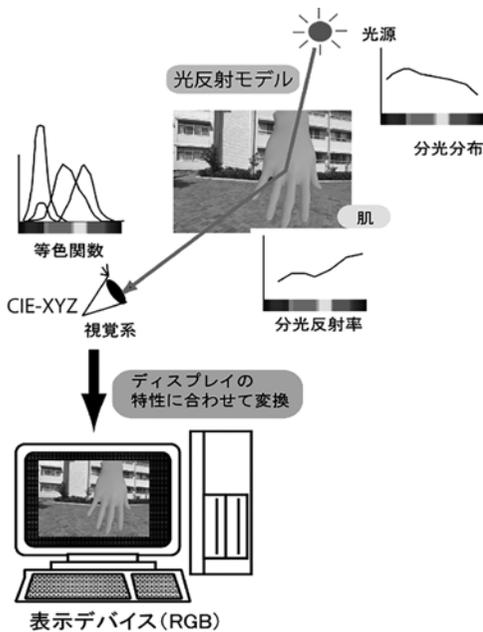


図8. 分光情報に基づいた肌のCG再現法の概略図

(2)式とともに環境光源情報をGPU上に実装した[6]. GPUとは映像生成処理をCPUから独立したハードウェアを用いて高速化するものである。近年ではこのGPUに対してユーザーが直接プログラミング可能になったため、その自由度が飛躍的に向上した。本研究で用いたGPUは、頂点シェーダユニットとフラグメントシェーダユニットと呼ばれる2種類のプログラミング可能なシェーダユニットが搭載されている。頂点シェーダユニットはライティングや座標変換を担当し、フラグメントシェーダユニットはシェーディングなどの色計算を担当する。分光情報は、光の可視波長域(400nm-700nm)を5nm間隔でサンプリングして61個の分光データとして離散化し実装した。

7. 実験

提案手法の有効性を示すために、提案手法で化粧をした人間の肌の状態を3DCGで再現した。まず、肌の表面下散乱の可視化から行った。肌の半透明な層を表現するために図9に示す密度分布を用いた。この密度分布の計算は人の肌の透過率から求めている[1]。

次に図10は表面下散乱モデルによる視覚効果を確認するために実シーン内の照明環境下で従来手法と提案手法それぞれでレンダリングした結果である。図10(左)は一般的な拡散反射モデルであるLambert

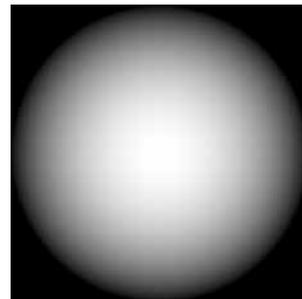


図9. 肌のCG再現に用いた密度分布



図10. Lambertモデルでレンダリングした球体(左)と提案手法でレンダリングした球体(右)

モデルでレンダリングされた球体で図10(右)は提案手法でレンダリングした結果である。これらを比較すると提案手法では組織色が確認できるとと陰影部分が広がっていることがわかる。

次に実際に被験者に化粧を施して化粧過程による肌の分光反射率の変化を調べた。20代男子学生の手の甲の一部の分光反射率を7種類の化粧品をそれぞれ施した化粧過程と化粧終了後から1時間30分後の肌をそれぞれ計測した。図11は肌のCG生成に使用したファンデーションの分光反射率である。

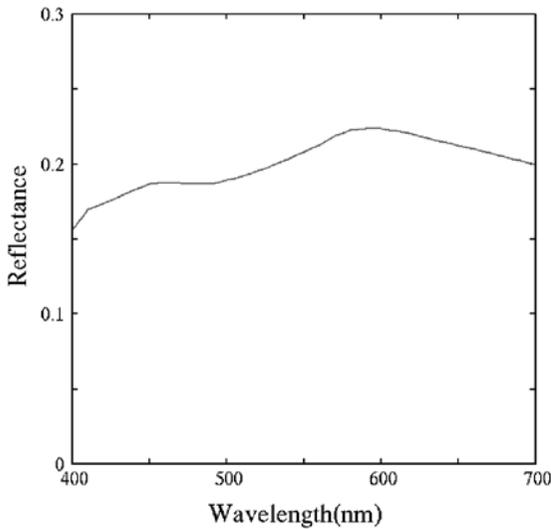


図11. 使用したファンデーションの分光反射率

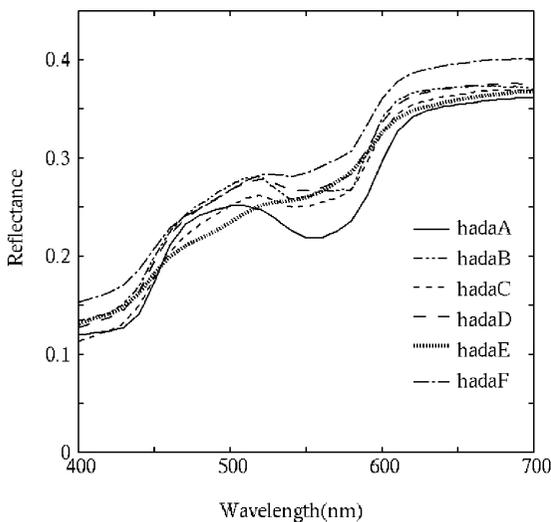


図12. 化粧過程における肌の分光反射率計測結果

図12は、素肌から化粧をしていく過程のそれぞれの分光反射率の計測結果である。化粧を施す前の肌は

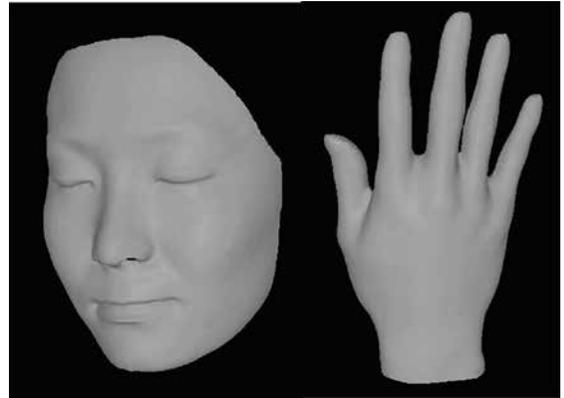


図13. 化粧前の肌の再現CG(単色)

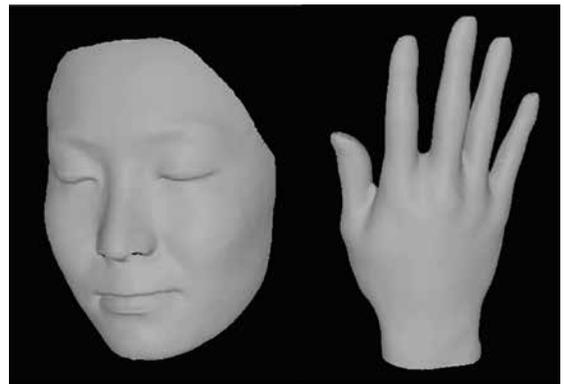


図14. 化粧後1時間30分の肌の再現CG(単色)



図15. 化粧をした肌全体のCG再現結果

hadaA, 汚れた角質をクレンジングオイルと洗顔料で落として計測した肌はhadaB, 化粧水・乳液クリームをつけて計測した肌はhadaC, 下地乳液をつけた肌はhadaD, ファンデーションと白粉をつけ計測した肌はhadaEである。また化粧が終了してから1時間30分後に計測した肌はhadaFである。この実験から化粧を施すごとに肌の色は明るくなることがわかった。化粧を施す前のhadaAと比べ、最後の化粧である白粉を使用した肌hadaFのグラフは反射率が上がり、さらに滑らかな平らな曲線になっていることから、化粧を行う前よりも白く明るい肌になったことがわかる。またhadaEからhadaFにかけては時間経過のみによって肌の色が明るくなっていることがわかる。

最後に提案手法を用いて実際の人の肌を分析し、3DCGで再現した。まず単色での肌のCG再現を行った。図13は化粧前の肌の分光反射率hadaAを用いて提案手法でレンダリングしたもので、図14は同条件で化粧後のHadaFの分光反射率を用いてレンダリングした結果である。そして、提案手法を画素ごとに適用し、実際に化粧をした人の肌を3DCG再現した結果が図15となる。提案手法でリアルに人の肌が3DCGで再現できていることがわかる。

8. おわりに

本論文では、素肌や化粧をした肌の状態を定量的に分析したり可視化したりするために、肌の分光的な反射特性に着目して、化粧や肌の物理的な状態の分析方法と3次元コンピュータグラフィックス再現法を提案した。

本手法では化粧品や肌の状態は、各波長帯の反射特性を調べることで様々な肌の物理的な情報を定量的に分析することができる。

提案手法は、まず分光ベースの肌の光反射モデルを新たに提案し、肌の状態の可視化には提案モデルを用いた3DCGによる再現手法を提案した。肌は半透明な多層膜で構成されており、その表面下で複雑な光の散乱現象が発生しているため、光が肌表面下で弱まりながら広がることで視覚的に柔らかい陰影として観測される。本研究で構築した光反射モデルは肌表面の光の反射プロセスを定量化するために表面下散乱を簡易的に表現できるようにした。肌の反射特性の可視化は、分光的な肌の反射特性の解析結果と表面下散乱を記述した肌の光反射モデルを用いて素肌や化粧をした肌を3DCG再現した。最後に実際の人の肌

をCG再現して提案手法の有効性を検証した。この結果、本提案手法である分光反射率解析に基づいた肌の分析方法や可視化手法が有効であることを示すことができた。

謝辞

本研究における実験では本学卒業生の細井千華氏に多大なる協力をいただきました。ここに感謝いたします。

参考文献

- [1] 田中法博: 画像計測に基づく肌の3DCG再現技術, フレグランスジャーナル, Vol.40, No.5, pp.72-78, 2012.
- [2] 田中法博、望月宏祐: RGBカメラによる全方位分光画像計測とIBLへの応用, 画像電子学会誌, Vol. 42, No. 4, pp. 466-476, 2013.
- [3] 西野顕, 中村睦子, 宮下京子: 機能性分光フィルタを用いたファンデーション定量・分布計測システムの開発と応用, 日本色彩学会誌, Vol. 37, No. 3, pp. 202-203, 2013.
- [4] Y. Miyake, Y. Yokoyama, N. Tsumura, H. Haneishi, K. Miyata and J. Hayashi: Development of multiband color imaging systems for recording of art paintings, Proc. SPIE: Color Imaging, Vol.3648, pp.218-225, 1999.
- [5] Y. Masuda, T. Yamashita, T. Hirao and M. Takahashi: An innovative method to measure skin pigmentation, Skin Research and Technology, Vol. 15, pp.224-229, 2009.
- [6] R. R. Anderson and J. A. Parrish, The Optics of Human Skin, The Journal of Investigative Dermatology, Vol. 77, No. 1, pp. 13-19, 1981.
- [7] 田中法博, 富永昌治: 3次元反射モデルの解析と推定, 情報処理学会論文誌CVIM, Vol.41, No. SIG 10(CVIM 1), pp.1-11, 2000.
- [8] 土居元紀, 大槻理恵, 富永昌治, 池田直子, 引間理恵, 丹野修: クベルカ-ムンク理論に基づいたファンデーション塗布肌の分光反射率の推定”, 電子情報通信学会 論文誌 D, Vol. J92-D, No.9, pp.1602-1612, 2009.
- [9] R. Fernando: GPU Gems: Programming Techniques, Tips and Tricks for Real-Time

Graphics, Addison-Wesley Professional, 2004.

- [10] M. Oren and S. K. Nayar; Generalization of Lambert's reflectance model, ACM Comput. Graphics(SIGGRAPH 94), pp. 239-246, 1994.
- [11] T. Whitted: An improved illumination model for shaded display, Communications of the ACM, Vol.23, No.6, pp.343-349, 1980.