

化粧肌の分光画像計測と CG 再現

Multi-spectral Imaging of Cosmetic Skin and Its CG Reproduction

兼子亜弓 Ayumi Kaneko 長野大学
 田中法博 Norihiro Tanaka 長野大学
 望月宏祐 Kosuke Mochizuki 長野大学

Nagano University
 Nagano University
 Nagano University

Keywords: 肌, 分光反射率, CG 再現, 反射モデル

1. はじめに

肌は人にとって最も身近で、最も重要なものの一つである。人は肌の状態のほんのわずかな違いから、相手の様々な情報を感じ取ることができる。化粧品は、この肌の状態を整えたり、相手に好ましく見られたりできるようにするために行うが、この化粧した肌を定量的に計測し、それをコンピュータグラフィックス(CG)で3次元的に映像再現することができれば、美容面で様々な応用が期待できる。人間の肌の状態の定量化を考えた場合、人間の肌は均一な反射特性を持っているわけではなく、部分ごとにそれぞれ違う色の反射特性を持つという特徴がある[1]。このような肌のテクスチャ情報を獲得する手段として画像計測が有効となるが、3DCGに用いる場合、3つの問題がある。まず、RGB情報では撮影デバイスの特性や撮影時の証明環境に依存するという問題がある。そして、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が変わるだけで、観測される色は変わってしまう。さらに、RGB情報では絶対的な色に関する情報が不足するという問題がある。RGBは3つの要素で色を表現するが、化粧品や肌の色は光の波長レベルでその特徴を持つ。たとえば肌の分光反射率を観測すればヘモグロビンによる光の吸収の特徴が波形に表れるが、化粧をすることによってその波長域の吸収が減少することがわかる。

この特性に基づいて考えると、化粧直後の肌と化粧後数時間が経過した肌では、その分光反射率がことなってくることが予想され、化粧崩れなどの分析に応用することが可能であると考えられる[2]。こういった肌の状態の違いを解析する場合、分光画像計測が有効となる。

次に肌の反射特性について述べる。肌にはプラスチックや金属などの物体表面とは違う肌独特

の質感が存在する。これは肌が半透明であ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、陰影が柔らかくなる。こういった光の反射プロセスは光反射モデルとよばれる数字モデルで記述されるが、人間の肌の光反射プロセスに適したモデルを使用する必要がある。

本研究では、こういった背景から分光情報と光反射モデルに基づいた肌と化粧品のCG生成手法を提案する。一般的なデジタルカメラはRGBの3つのセンサしか持たないため、画像情報から多次元情報である分光反射率を推定することはできない。そこで、本研究では分光反射率とカメラ出力の組から統計的に拘束条件を設定して、RGB値から分光反射率を推定する。そして、実際に化粧をした肌を画像計測し分光反射率を推定する。その推定精度は、分光光度計による計測値と比較して調べる。さらに推定結果に基づいて人の肌を3DCG再現する。

2. 肌の分光反射モデル

本研究では人の肌の色は陰影や光沢といった3次元的な色の変化を含めてCGとして再現する。本研究ではモデルベースで肌の3次元的な反射を表現するため、肌の光反射のプロセスは光反射モデルと呼ばれる数学モデルで記述する。図1は肌表面の光反射の幾何モデルを図示したものである。光反射は光源、物体、視点の3つの幾何的な関係に加えて、表面材質の特性からモデル化される。このモデルでは肌の表面下散乱現象を近似的に記述する。本研究で提案するモデルはWrap Lightingモデル[3]を分光モデルに拡張する。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 $\mathbf{N}$ となる。肌の分光反射率は $S(\lambda)$ である。 $S_s(\lambda)$ はヘモグロビンの分光吸収率から計算した分光反射率である。 $E(\lambda)$ は光源の分光分布である。 I は肌の散乱の度合いを示すパラメータである。このモデルを用いて求められる肌からの色信号 $C(\lambda)$ は次式で示す。

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

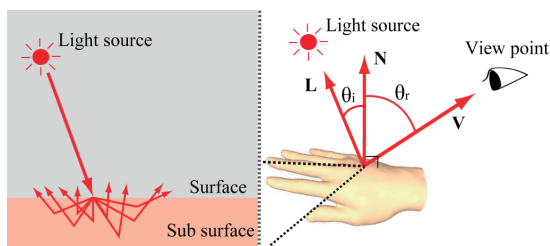


図1. 肌の反射特性計測の概念図

3. RGB データから肌の分光反射率の推定手法

3.1. カメラ出力の分光モデル

本研究ではまず(1)式の肌の分光反射率 $S(\lambda)$ をカメラ画像から推定するため、カメラ画像と分光反射率の関係を分光モデルで記述する。カメラ出力 RGB 値は、光源の分光分布 $E(\lambda)$ と物体の分光反射率 $S(\lambda)$ 、そして R(赤), G(緑), B(青)チャンネルの分光感度 $r_r(\lambda), r_g(\lambda), r_b(\lambda)$ から光の可視波長域(400nm-700nm)についてモデル化する。図2は光源からの光が物体表面で反射してカメラ出力 RGB 値を得るまでのプロセスを分光モデルで図示したものである。また、次式はそのモデルを数学的に記述したものである。

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \int_{400}^{700} E(\lambda) S(\lambda) \begin{bmatrix} r_r(\lambda) \\ r_g(\lambda) \\ r_b(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \quad (2)$$

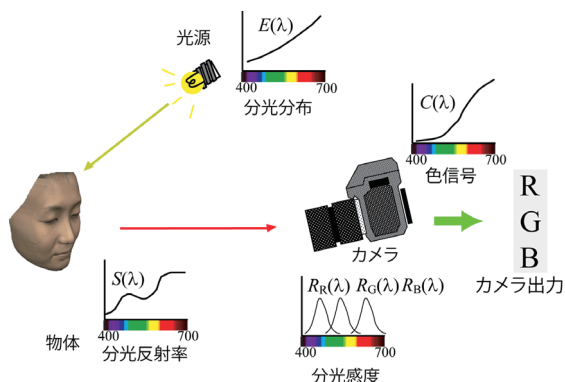


図2. カメラの分光モデル

3.2. RGB 値から分光反射率への変換

分光情報は波長 400nm-700nm までを 5nm 間隔でサンプリングして 61 個の値で表現する。次に RGB 値は 3×1 の行列 $\mathbf{p}$ 、分光反射率は 61×1 の行列 $\mathbf{s}$ 、そして RGB 値から分光反射率に変換する行列は 61×3 の行列 $\mathbf{M}$ で示すと、 $\mathbf{p}$ と $\mathbf{s}$ の関係は次式のように書ける。

$$\mathbf{s} = \mathbf{M} \mathbf{p} \quad (3)$$

このとき $\mathbf{M}$ が求まれば $\mathbf{p}$ から $\mathbf{s}$ を計算できる。しかし、 $\mathbf{p}$ や $\mathbf{s}$ の逆行列が存在しないため、この式のみからでは $\mathbf{M}$ を求めることはできない。つまり、変換行列 $\mathbf{M}$ は一意に決めることができない。

3.3. 変換マトリックス $\mathbf{M}$ の推定方法

本研究では、統計的に拘束条件を与えることで $\mathbf{M}$ を求める。分光反射率の統計的な偏りを利用し、たとえば 20 代日本人女性の肌というように対象を限定すれば解を求めることは可能になる。

ここでは肌の分光反射率の統計的性質を得るため、分光光度計での肌の分光反射率を計測し、それに対応する場所を RGB カメラで撮影することで、肌のカメラ出力(RGB 値)と肌の分光反射率データを対応させた組を多数計測する。

n 個の分光反射率と RGB 値の組を計測し、RGB 値は $3 \times n$ の行列 $\mathbf{P}$ 、分光反射率を $61 \times n$ の行列 $\mathbf{S}$ として次式で示す。

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_{1,1} & s_{1,2} & \dots & s_{1,n} \\ s_{2,1} & s_{2,2} & \dots & s_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ s_{61,1} & s_{61,2} & \dots & s_{61,n} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} R_1 & R_2 & \dots & R_n \\ G_1 & G_2 & \dots & G_n \\ B_1 & B_2 & \dots & B_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

そして先ほどの変換マトリックス $\mathbf{M}$ と(3)式を用いて計測値の組の関係を記述すると次式のようにになる。

$$\mathbf{S} = \mathbf{M} \mathbf{P} \quad (5)$$

このようにすると n 個の分光反射率とそれに対応する RGB 値の組が得られるので、(5)式から $\mathbf{P}$ の一般化逆行列 $\mathbf{P}^+$ を用いて、変換行列 $\mathbf{M}$ は次式のように求めることができる。

$$\mathbf{M} = \mathbf{S} \mathbf{P}^+ \quad (6)$$

ただし、この $\mathbf{M}$ は照明光源やカメラの特性を含んでいるため、照明条件などの計測環境が変化すれば使用できなくなる。

3.4. 照明光源とカメラ特性の影響の補正

変換マトリックス $\mathbf{M}$ は、異なる計測環境下では使用できないので、照明環境が変化した場合の補正方法を述べる。

ここでは m 色の色票を用いて、カメラの色空間を変換することで補正を行う。 $\mathbf{M}$ を求めたときと同じ照明環境とカメラの条件で m 色の色票を計測したカメラ出力を $3 \times m$ の行列 $\mathbf{P}_0$ で示し、実際

に計測するときの撮影環境で同じ色票を計測したときのカメラ出力を $3 \times m$ の行列 $\mathbf{P}_T$ で示すと、補正行列 $\mathbf{M}_2$ は $\mathbf{P}_T$ の一般化逆行列を用いて次式で示すことができる。

$$\mathbf{M}_2 = \mathbf{P}_O \mathbf{P}_T^+ \quad (7)$$

$\mathbf{M}_2$ が求まれば次式によりカメラ出力 $\mathbf{p}$ から分光反射率 $\mathbf{s}$ が推定できる.

$$\bar{\mathbf{s}} = \mathbf{M}\mathbf{M}_2\boldsymbol{\rho} \quad (8)$$

4. 推定した分光反射率から CG 生成手法

本研究では肌の陰影などを3次的にCGで再現する。肌の柔らかい陰影は、肌の表面下で発生している表面下散乱によるものであるが、光の表面下散乱現象は厳密に計算すれば、現実的な時間でCG画像を生成することができないのみならず、計測データからモデルパラメータを決定することが難しくなるという問題がある。そこで肌表面の表面下散乱を簡易的に表現する光反射モデルを使用する。肌の柔らかい陰影は肌表面に入射した光が肌の内部で発生する表面下散乱により起こる。このことから入射地点から離れたところからも反射光を観測できる。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。肌表面と表面下で発生する光反射のプロセスは分光的に記述する。ここでは簡易的に表面下散乱を記述した Wrap-lighting モデル [2] を分光的に拡張した。ここでは計測した肌の分光反射率 $S(\lambda)$ を用いて計算する。このモデルで計算される照明方向角度 θ と ϕ に対応する肌からの色信号 $C(\lambda, \theta, \phi)$ は次式で求められる。

$$\begin{aligned}
& C(\lambda, \theta, \phi) \\
&= \alpha I_{\text{diffuse}}(\lambda, \theta, \phi) S(\lambda) E(\lambda, \theta, \phi) \\
&= \alpha \left\{ \mathbf{N} \cdot \mathbf{L}(\theta, \phi) + \frac{\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}(\theta, \phi) + l}{1 + l} S_s(\lambda) \right\} S(\lambda) E(\lambda, \theta, \phi)
\end{aligned} \tag{9}$$

ここで $S_s(\lambda)$ は散乱した反射光の分光反射率である。これは血液の色を示すものでヘモグロビンの分光吸収率から計算する。 $E(\lambda)$ は光源分光分布である。 I は散乱の度合いを示すパラメータである。本研究では計測データに基づいて $I=0.5$ と設定した[1]。全方位光源分布情報に基づいた光反射モデルを計算は周囲の照明光源の足し込み処理となり、光源の数が増えれば計算量が膨大になるという問題がある。そこで放射照度マップ(Diffuse map)と呼ばれるシーン空間内の全方位の光反射計算を一種のルックアップテーブルとして利用

する方法を採用して処理を高速化する.

以上の方法を統合して図3に示すようなレンダリングシステムを構築した．このシステムでは光源情報は全方位分光画像から獲得し，肌表面の反射光は分光的な反射モデルで計算する．そして視覚系に入った色刺激は，等色関数を用いてディスプレイに依存しない色情報として計算する．

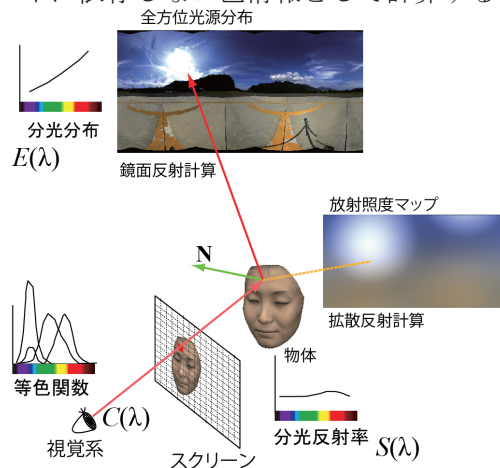


図3. 本研究で開発したレンダリングシステム

5. 実験結果

本研究で提案する手法を用いて、人の肌の分光反射率を画像から計測し、その計測値を用いて人の肌を3DCGで再現する。

まず本研究では、肌の推定精度を向上させるために対象を 20 代の日本人、韓国人、中国人に限定し、合計 106 名について、カメラ出力と分光反射率の組を計測し 212 組のデータを得た。いずれも化粧をしていない素肌の状態である。撮影部位はそれぞれの被験者に対して手の甲、手の平の 2 箇所を計測した。さらに化粧肌のデータを計測した。上記被験者のうち 3 名について、資生堂のマキアージュと花王のプリマビスタのファンデーションのうち色の薄いものをランダムに 10 種類(資生堂 OC00, OC10, OC20, OC30, POC10, BOC10, BOC20)(花王 OC01, OC03, OC05, OC07)を手の甲に塗布し、30 組のデータを追加した。

撮影用のカメラは Nikon D800E を使用し、分光光度計はコニカミノルタ CM600 を用いた。照明光源は RIFA-F (80cm×80cm 6 灯型)を 2 つ配置した。実験環境は、照明の変化を避けるために固定した黒い板に 1cm 角の穴を開けたものを用意し、そこに計測場所を固定した。これにより肌の計測位置を固定し、照明、カメラ、肌の位置関係が変化しないようにした(図 4)。

次に実際にカメラを用いて化粧をした人の顔

を計測し、そこから肌の分光反射率を計測した。ファンデーションは花王化粧品のプリマビスタを使用している。計測に使用したカメラは先の実験と同じ Nikon D800E である。図5は肌の分光反射率の推定結果であり、図で示す(A)から(D)までの4箇所を計測した。赤色の実線は分光光度計による計測値で青の破線はカメラによる推定値となる。最後に推定した結果を用いて肌をCG再現した。ここでは肌の反射特性は別途計測したデータを用いた。光反射モデルには今回計測した分光反射率を適用した。図6は図4の(B)の部分の分光反射率の計測値と推定値を用いてレンダリングした結果である。

6. おわりに

本稿ではデジタルカメラを用いて化粧肌の分光反射率を推定する手法を提案し、その推定結果を分光光度計との計測値と比較した。本実験から、カメラ画像から推定した化粧肌の分光反射率は分光光度計で計測した値と比較的一致していることがわかった。

参考文献

- [1] 田中法博：画像計測に基づく肌の3DCG再現技術, *Fragrance journal*, Vol. 40, No. 5, pp.72-78, 2012.
- [2] 西野顕 他：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.

- [3] R. Fernando et al.: *GPU Gems Programming Techniques, Tips and Tricks for Real-Time Graphics*, Addison-Wesley Professional, 2004.

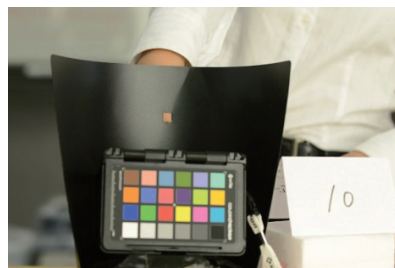
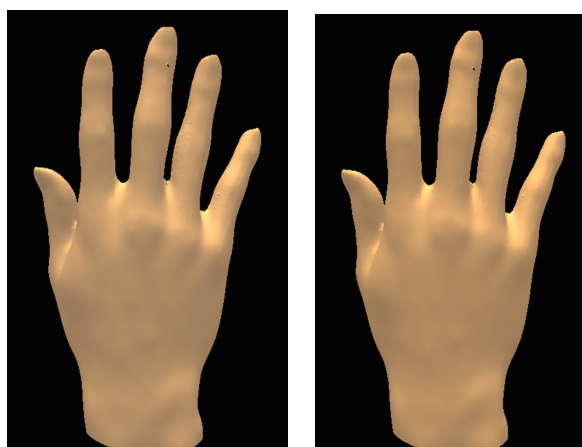


図4. 肌の統計データを計測している様子



(a) 計測値

(b) 推定値

図6. 提案手法を用いたCGの再現結果

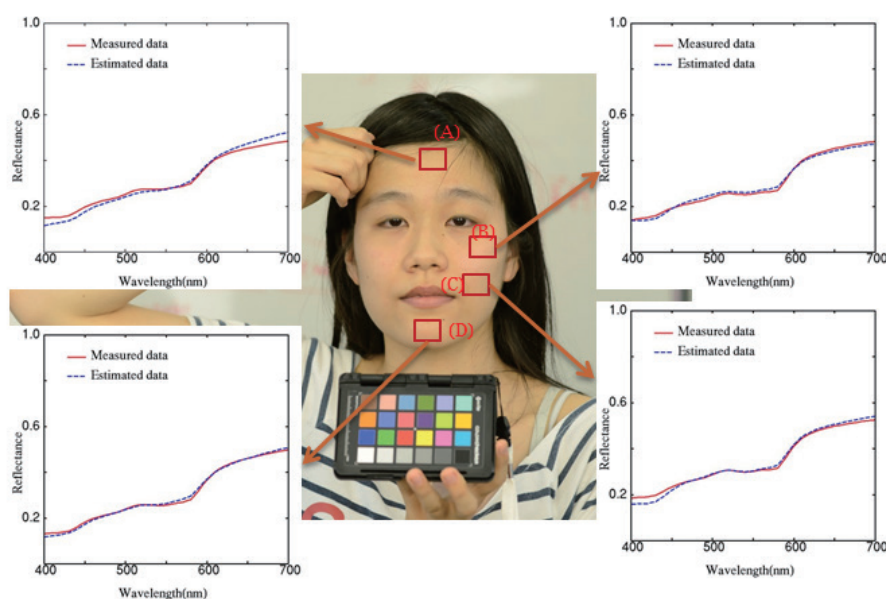


図5. 肌の分光反射率の推定結果