

化粧塗膜と肌の視覚的質感の 3DCG 再現のための 数学モデル構築

長野大学 企業情報学部
教授 田中法博

1. はじめに

近年では、人物を 3 次元コンピュータグラフィックス(3DCG)で表現する技術は映画やゲームなどのエンターテインメント分野を中心に発展してきている。その技術は年々発展してきており、現実の俳優と見間違えるレベルのクオリティの CG キャラクタも登場している。

しかしながら、本研究で目指す美容分野などの産業面の応用を目指した肌の 3DCG 表現では異なる技術的背景が必要となる。産業分野においては作品としての美しい 3DCG を作成する技術ではなく、実物を精密に再現できる 3DCG 技術が求められることである¹⁾。

このとき肌や化粧品の視覚的質感の定量化は、化粧品設計や化粧シミュレーションなどの美容分野において重要な課題となる²⁾。

人の肌や化粧品（化粧塗膜）の複雑な視覚的質感（キメ、透明感、色素の分布、しわ・たるみの状態、色、光沢、陰影等の材質の見えなど）を持つ。こういった視覚的質感情報はこれまで主観的な情報として扱われることが多く、主に感性評価や心理学的な視点で扱われてきた。しかし、近年になって質感を定量的に扱う研究が行われるようになってきたことで視覚的な質感を定量情報として扱うための土壌ができてきている³⁾⁴⁾。そこで、本研究においても、従来では主観的な情報であった視覚的質感を定量化して可視化することを目指す。視覚的質感情報のデジタル化は、一般的な化粧アプリなどのコンシューマ向けの製品開発だけでなく、化粧品設計などの産業応用のために化粧品設計に必要な情報を定量的に提供することが可能となる。

本研究の目的は、この肌や化粧の質感を定量化して、3DCG)再現する手法を開発することである。その中で本助成金を受けた研究プロジェクトの位置付けは、この肌や化粧の質感を定量化するための数学モデルの開発である。本研究では、計測データに基づいて素肌とファンデーション、アイカラー、チーク、リップといった化粧品を対象に数学モデルを構築し、そのモデルを用いて対象を 3DCG 再現する。

本研究により大きく 2 つの成果が期待できる。(1) 肌や化粧品の視覚的質感といった従来では主観的な情報であったものを定量化できる。(2) CG クリエイターの実力に依存せず、計測により CG 再現できるので CG 製作者の技量に依存しなくなる。つまり、誰が肌や化粧を CG 再現しても同じ品質での CG 生成が可能となる。

本稿では、実際に肌や化粧品の数学モデルを構築し、それを 3DCG 再現した研究成果を報告する。

2. 化粧塗膜と肌の視覚的質感の定量化手法

本研究のアプローチは肌の視覚的質感情報を物体表面の光反射特性として扱い、この光反射特性は光反射モデルという数学モデルで記述することによって化粧と肌の質感を定量化する技術⁵⁾⁶⁾に基づく。この方法では物体表面の光反射のプロセスを数学的に記述す

るが、このモデルは光の入射方向、物体の法線方向、視線方向といった光反射に必要な幾何情報に加え、対象物体の物理的な特性に基づいて構築される。本研究では、肌独自の表面の性質や個々の化粧品の材質の状態を光反射モデルのモデルパラメータとして数値化して記録する²⁾⁷⁾。光反射モデルは図1に示すように主に入射角度、法線方向、受光角度の3者の幾何条件と物体表面の材質の特性に応じてモデル化する。

さらにこの光反射は、一般的なRed,Green,Blue (RGB)といった原色を使った反射モデルではなく可視波長域の電磁波のスペクトル、つまり分光ベースで計算する⁸⁾⁹⁾。図2は、この分光モデルで記述した光反射である。本研究で述べる数学モデルとは、図1と図2のモデルを合わせたものである。

本研究では、この技術を肌や化粧塗膜の視覚的質感の定量化に応用する。化粧塗膜は様々な化粧材料で構成されているが、その光学的特性を調査した上で、独自の光反射計測器で化粧をした肌表面の反射特性を調べる。計測には、図3のような独自に開発した肌や化粧品の光反射計測システムを用いる。この計測システムでは、様々な光反射の幾何条件（入射角度や受光角度）を設定し、画像や分光放射輝度を計測することが可能である⁹⁾¹⁰⁾。この計測データに基づいて、対象の化粧品の光反射特性の数学モデルを構築する。様々な肌の状況について詳細なシミュレーションを行い、そこから得られる肌や化粧品の光反射特性を入射光の条件（方向、色、強さ）に対応させ、数学モデルとモデルパラメータをフィッティングする¹¹⁾。その後、この数学モデルは3DCGのレンダリングにも用いられる。化粧塗膜の視覚的質感を表現する数学モデルと個々の特性を示すモデルパラメータが決まれば、それを3DCGのレンダリングシステムに組み込むことで、対象の視覚的質感を3DCGで再現することが可能となる。

つまり、本研究で提案する手法は、まず対象の光反射の特性を物理モデルや表面構造から数学モデルを構築する。そして、個々の物体の反射特性は、その数学モデルに与えるモデルパラメータとなる。このことにより、数学モデルとモデルパラメータの組により、肌の視覚的質感が定量化されデジタルデータとして記録することが可能となる。

その上で、同じ数学モデルを使って肌を3次元レンダリングすることで、3DCGとして可視化することが可能となる(図4)。

以上のことから、本研究の要となるのは、肌表面で発生する光反射のプロセスを記述した数学モデルであり、この数学モデルをどのように構築できるかが本研究を達成する上で重要な要素となる。

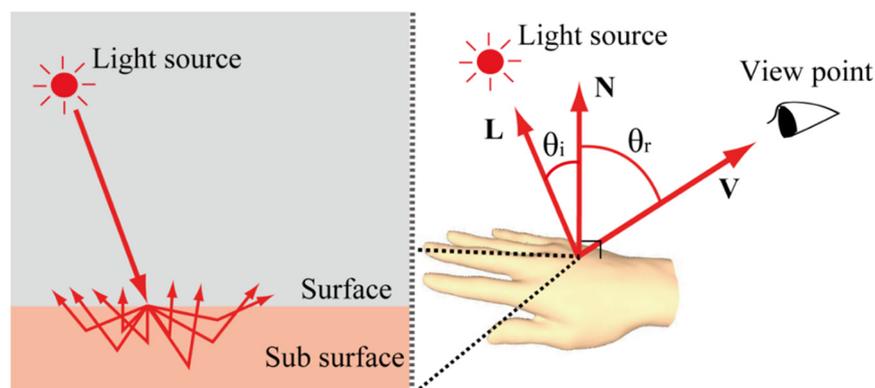


図1. 肌の光反射モデルの概略図¹⁾⁷⁾

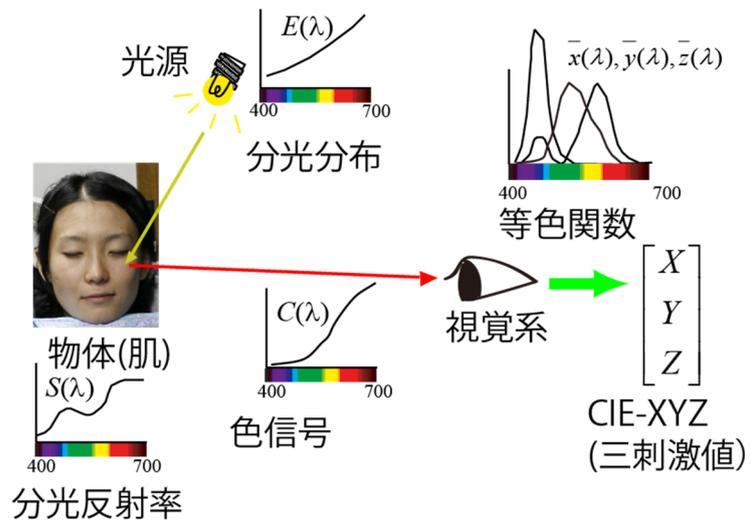


図 2 . 肌の分光モデル

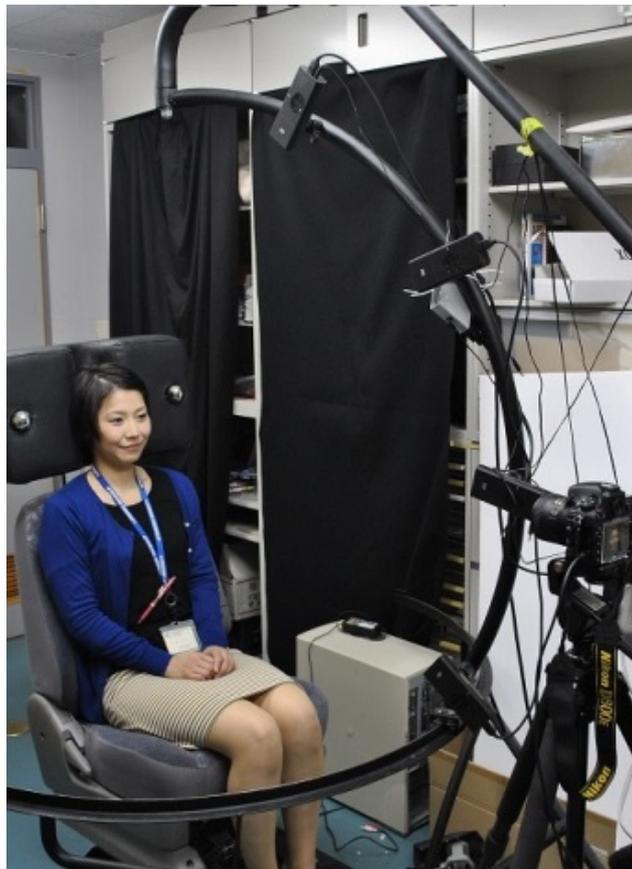


図 3 . 本研究で使用した独自開発の肌と化粧品の光反射計測装置²⁾



図4. 本研究で開発した手法で肌の質感を3DCGで再現した例

3. 数学モデル(光反射モデル)の構築

図3の計測装置による計測データから、様々な幾何条件で化粧塗膜の反射特性を画像計測に基づいて推定した。この画像計測には本助成金により導入したデジタルカメラ(Sony α 7CII)を使用した。

光反射特性を計測した上で、数学モデルを構築する上でのデータ構造や処理アルゴリズムを設計した。ここで得られた計測データと数学モデルから、肌と化粧塗膜の視覚的質感を色再現用のディスプレイ(EIZO Color Edge CG2700X)上でCG再現する。その上で、3DCG再現した肌の色と実際の人間の肌の色とを比較することで数学モデルとモデルパラメータの精度を検証する。再現CGと実物の色の比較は分光放射輝度計を用いて色空間上で色差を定量的に計測して検証する。このことで提案手法の3DCG再現精度も定量的に比較することが可能となる。

以上より、人の肌や化粧品(化粧塗膜)の複雑な視覚的質感(キメ、透明感、色素の分布、しわ・たるみの状態、色、光沢、陰影等の材質の見えなど)を定量的に記録し、3DCG再現するために必要な要素を分析した。本研究で検討している視覚的質感情報は、光反射モデルという数学モデルで記述し、肌独自の表面構造や化粧品メーカーが創り出された材質の状態を光反射モデルのモデルパラメータとして数値化して記録する。そして、この数学モデルを用いて実際の肌や化粧品の視覚的質感をデジタル化して忠実に3DCG再現する。つまり、個々の肌や化粧品の視覚的質感とは、このモデルパラメータにより、その個々の特性が定量化される。

以上の提案手法を用いて、ファンデーション、アイカラー、チーク、リップを対象として、その光反射特性を示す数学モデルを構築した。ここでは、実際の市販の化粧品を人の肌に塗布して視覚的質感の再現精度を明らかにした。

4. 実験と結果

構築した数学モデルを本研究で開発している化粧シミュレータに実装した。計測対象は20代女性である。そして、市販の化粧品の反射特性や分光反射率を計測し、数学モデルに実装し、それを仮想空間上(3DCG空間上)でシミュレーションして塗布した。

まずデジタルカメラで人の顔を計測し，そこから肌を3DCGで再現する．ここでは，カメラで7方向から計測したカメラ画像から顔の3次元形状と肌の光反射特性を計測し，そこから人の顔の3次元モデルを生成した．このとき構築した数学モデルとモデルパラメータの推定結果から人の顔を肌の視覚的質感も含めて3DCGで再現した結果が図5である．

次に個別にファンデーション，アイカラー，チーク，リップを計測し，その反射特性を計測し，構築した数学モデルでそれぞれの化粧塗膜を表現し，計測データからモデルパラメータの推定を行なった．その計測データと本研究で構築した数学モデルを用いて化粧をした顔を3DCG再現した結果が図6である．

5. まとめ

本研究では人の肌や化粧品（化粧塗膜）の複雑な視覚的質感（キメ，透明感，色素の分布，しわ・たるみの状態，色，光沢，陰影等の材質の見えなど）を計測データに基づいて定量的に記録することを目指し，人の肌表面や化粧塗膜で生じる光反射のプロセスを数学モデルで記述する手法を開発した．本助成による研究成果は①化粧と肌の数学モデルを試作できたこと，②特に複雑な反射特性を持つ化粧塗膜の数学モデルを構築できたことである．これらは化粧アプリのような一般顧客向けのアプリとして実用できるだけでなく，化粧品メーカーにおける化粧品の製品開発としても実用可能となることが期待される．

この結果，1件の特許出願をすることができたので，本助成金の主旨である実用的な技術開発という点で成果を得ることができた．



図5．3DCG再現した人の素肌



図6. 図4の3次元モデルに対して
化粧シミュレーション（3DCGによる可視化）をした結果

謝辞

本研究を遂行するにあたり，公益財団法人 天野工業技術研究所様より研究助成金を賜りました。そして，株式会社コーセー メイク製品研究室 アイメイクグループの丸木航氏，桑原晃大氏，宇田川史仁氏に心より感謝申し上げます。彼らの専門知識と技術サポートが，本研究の成功に多大な貢献を果たしました。

ここに本研究を支えてくださった全ての方々に心より深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 田中法博，画像計測に基づく肌の3DCG再現技術，Fragrance Journal, Vol. 40, No. 5, pp.72-78(2012)
- 2) 田中法博，光反射モデルと画像計測に基づいた人間の肌3DC再現，研究成果最適展開支援プログラム JST A-STEP 報告書 (2012)
- 3) 本吉 勇，質感のメカニズム「特集（色と質感）」，日本色彩学会誌, Vol 31, No. 3, pp. 197-200(2007)
- 4) 岡嶋克典，堀内隆彦，富永昌治，質感の計測と制御，日本画像学会誌，Vol. 57, No. 2, pp. 207-213(2018)
- 5) S. K. Nayar, K. Ikeuchi, T. Kanade: Surface reflection: physical and geometrical perspectives IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 13, Issue 7, pp. 611 - 634 (1991)

- 6) P. Hanrahan and W. Krueger, "Reflection from layered surfaces due to subsurface scattering," Proceedings of SIGGRAPH 93, pp. 165–174(1993)
- 7) N. Tanaka, Multi-spectral Imaging Method for 3D Computer Graphics Reproduction of Human Skin, Design Research, Vol. 80, pp. 18-24(2020)
- 8) Y. Yokoyama, N. Tsumura, H. Haneishi, Y. Miyake, J. Hayashi, and M. Saito, "A new color management system based on human perception and its application to recording and reproduction of art printing," IS&T/SID's 5th Color Imaging Conference, Color Science, Systems, and Applications, pp. 169–172 (1997)
- 9) 田中法博：AI技術を用いた肌の反射特性解析と化粧品への応用，Cosmetic Stage, Vol. 15, No. 6, pp.29-35,2021.
- 10) 田中法博：VR技術と反射特性計測に基づいた肌と化粧品の質感表現，Fragrance Journal, Vol. 50, No.2, pp.35-43, 2022
- 11) N. Tanaka Norihiro and K. Mochizuki, A digital archive method based on multispectral imaging with goniometric multiband camera, The Bulletin of Japanese Society for the Science of Design. Vol. 61, No. 3, pp. 35-44(2014)