

# 肌の反射モデル構築のための3次元分光測光と解析

村上 紘子, 堀井 恒文, 津村 徳道, 三宅 洋一  
千葉大学大学院 自然科学研究科

## Measurement and simulation of 3D gonio spectral reflectance on skin surface

H. Murakami, H. Horii, N. Tsumura, Y. Miyake  
Graduate School of Science and Technology, Chiba University

For skin diagnosis, the skin color and its components (oxy-hemoglobin, deoxy-hemoglobin and melanin) will be useful information. We have already proposed a technique to estimate the map of skin components from the absolute spectral reflectance of the skin surface obtained by using the photometric stereo technique. It was based on an assumption that skin surface was Lambertian, however, it seems that the real skin have its own properties of gonio spectral reflectance for diffuse and specular reflection. It means that accurate measurement of skin color is required for modelling these properties of reflectance. In this research, the gonio spectral reflectance of human skin is measured by setting a sensor at the desired viewpoint toward subject's right hand. It is also simulated based on both TSON model (Torrance-Sparrow, Oren-Nayar model) and Monte Carlo simulation of light transport. We discussed about the effectiveness of these models.

### 1 序言

皮膚科の診断領域において、酸素飽和率分布やメラニン色素の分布といった情報は有用であると考えられる。我々はこれまでに、コンピュータビジョン技術の一つである Photometric Stereo 法を用いて肌の絶対分光反射率画像と形状を計測し、得られた絶対分光反射率の分光分析により酸素飽和率分布などの色素分布を抽出した。また得られた形状を用いてコンピュータグラフィックス技術により任意の視点、照明環境下での画像を予測して表示した<sup>[1]</sup>。この時 Photometric Stereo 法を適用するにあたり、肌を均等拡散反射面 (Lambertian) を仮定したが、実際の肌には表面反射成分や内部散乱成分に特有の偏角反射特性があると思われるため、より正確な計測にはこれらの反射特性をモデル化する必要がある。

これまで肌の偏角反射特性を計測する試みがあったが、*in vivo* では試料面を回転できないなどの問題があった<sup>[2]</sup>。そこで本研究では、試料面を固定したままロボットアーム (Mitsubishi MELFA, RV-1A) を用いて分光器のプローブ (Ocean Optics, USB2000) を回転することにより肌の *in vivo* 偏角分光反射特性を計測した。計測結果に基づき、表面の凹凸を考慮した TSON モデル (Torrance-Sparrow, Oren-Nayar モデル) と我々の提案する皮膚の内部構造 (肌の3層構造, メラニン, ヘモグロビン) に基づくモデルを比較し、その有効性を議論した。

### 2 肌の偏角反射特性測定

肌の偏角反射特性は均等拡散反射面 (Lambertian) ではないと考えられる。そのため、分光器を用いて肌の偏角反射特性を多方向照明 (仰角 0 度, 方位角 0~75 度, 15 度間隔, 計 6 点) から、多方向で測定 (仰角 0~70 度, 方位角 -80~80 度, 10 度間隔, 計 136 点) を行った (Fig. 1)。肌に 2 色性反射モデル<sup>[5]</sup> を適応できることを確認の後、得られた結果をモデルに基づき分離した。光源入射角が仰角 0 度, 方位角 45 度の時の各試料の内部反射成分, 表面反射光分布を Fig. 2(a), (b) に示す。

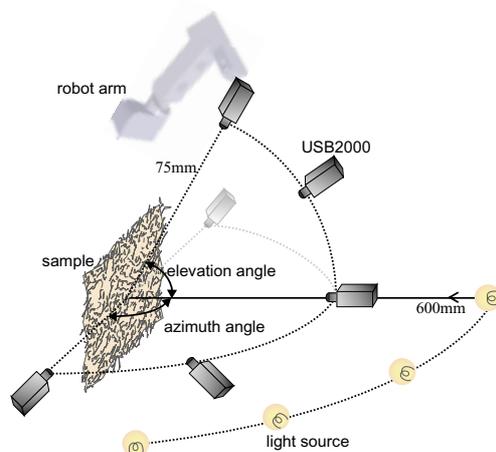


Fig. 1: 測定ジオメトリ

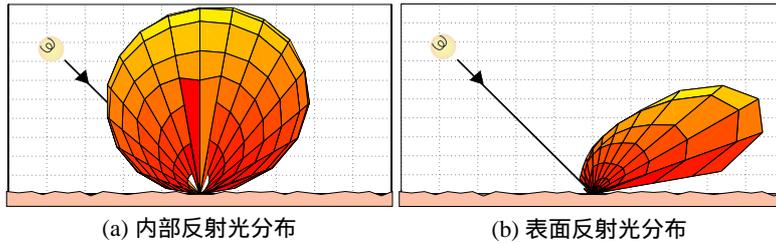


Fig. 2: 肌の反射分布（実測値）

### 3 肌の偏角反射特性シミュレーション

#### 3.1 双方向性反射分布関数モデル [2]

Fig. 3 に示すパラメータ  $\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r$  を用いて、物体表面の放射輝度分布を表す．表面をガウス分布から成る V 字型の微小面の集まりとし、微小面は Lambertian 反射面で、反射率が一定であると仮定する．これまでに、内部反射成分は Oren-Nayar モデル、表面反射成分は Torrance-Sparrow モデルが肌の反射モデルとして提案されている．Oren-Nayar モデルでは、Fig. 4 に示すように、光源入射方向と反対側に視点方向を設定した場合、暗い面の方が広いので暗く見える．つまり、視点が照明に近づくほど V 字型の放射輝度が高くなる．また、Torrance-Sparrow モデルでは、物体微小面の V 字型において照明や光源の方向によっては生じる幾何学的遮蔽効果や、V 字型内で生じる相互反射を考慮し表面反射光成分を表す．この時、表面反射光のピークがずれる off specular を表すことができる．

肌の反射光を実測値から推定したパラメータ反射率  $\rho$ 、表面の粗さ  $\sigma$  を用いて Oren-Nayar, Torrance-Sparrow モデルによるシミュレーション実装結果を Fig. 5(a), (b) に示す．

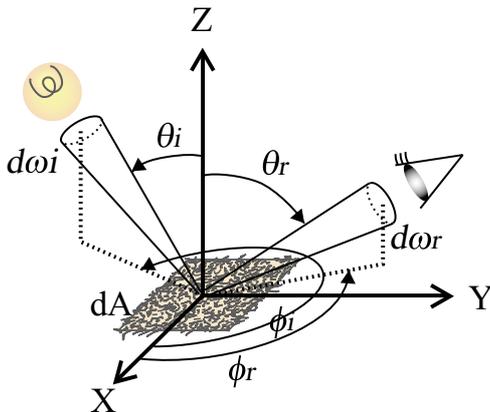


Fig. 3: BRDF ジオメトリ

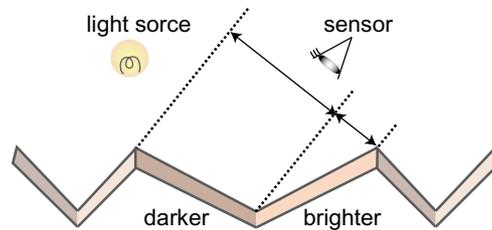


Fig. 4: V 字型による効果

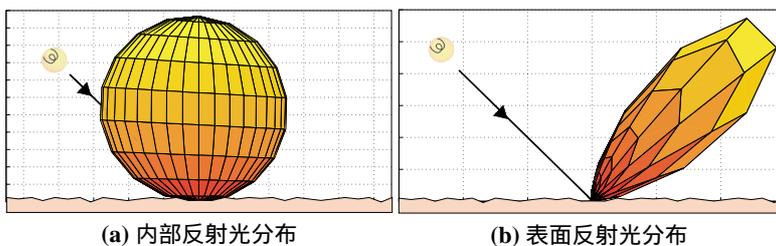


Fig. 5: 肌の反射分布（TSON モデル）

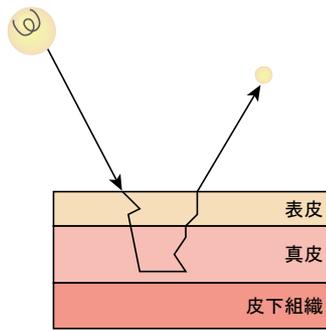


Fig. 6: 光散乱のモンテカルロ・シミュレーション

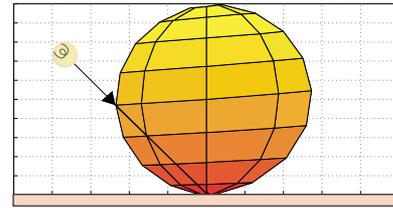


Fig. 7: 内部反射光分布 (モンテカルロ・シミュレーション)

### 3.2 モンテカルロ・シミュレーション

双方向性反射分布関数モデルでは、肌の微小な表面形状を考慮したが、本シミュレーションでは肌表面の形状はフラットと仮定し、肌の内部構造に着目する。肌色を決定する要素は、表皮のメラニン、真皮血管中の酸化ヘモグロビンと脱酸化ヘモグロビン、更に下の層の皮下組織と考えられる。ここで、表皮、真皮、皮下組織の3層それぞれに吸収・散乱係数、非等方性パラメータ、屈折率を設定した<sup>[3]</sup>。光散乱のモンテカルロ・シミュレーション法<sup>[4]</sup>をもとに、皮膚内部において、Fig. 6に示すように、あるエネルギーを持った光子の集まりの振る舞いを確率的に追跡した。このシミュレーションによって得られた内部反射光分布を Fig. 7に示す。

## 4 肌の偏角反射特性の結果と考察

Fig. 2(b)より、実測定による結果は表面反射光に off specular が顕著に表れているが、Fig. 5(b)より、Torrance-Sparrow モデルに適用すると off specular 小さくなることが確認された。また、内部反射光について、実測定では Fig. 2(a)に示すように正反射方向の輝度が高いことに対して、Oren-Nayar モデルの適用結果は Fig. 5(a)に示すように光源方向の放射輝度が高い。これより Oren-Nayar モデルは肌の反射モデルとしての有効性が低いことが確認された。

また、光散乱のモンテカルロ・シミュレーションによる結果では、Fig. 7に示すように、正反射方向の放射輝度が高くなり、実測値に近い分布を示すことが確認された。これより、モンテカルロ・シミュレーションによる結果が肌の反射モデルとしての有効性が高いことが確認された。

## 5 総括

肌の偏角反射特性には表面形状の凹凸だけによるものではなく、肌の内部構造が大きく影響していることが確認された。より正確な肌の反射モデルの構築とともに、測定環境に依存しない肌の分光データを得ることが今後の課題である。

## 参考文献

- [1] 津村, Imai, 三宅 Proc. 2nd Symposium of the "Color" of Digital Imaging in Biology and Medicine 3.1-3.4 (2000)
- [2] K. J. Dana et. al, Columbia Univ. Technical Report, CUCS-048-96 (1996).
- [3] M.J.C.V.Gemert, S.L.Jacques, and H.J.C.M.Sterenborg: "Skin Optics", IEEE Trans. Biomed. Eng. 36 12(1989) 1146-1154.
- [4] Lihong Wang and S.L.Jacques: "Monte Carlo modeling of Light Transport in Multi-Layered Tissue in Standard C", Anderson Cancer Center, Univ. of Texas, 1992
- [5] S.A.Shafer, COLOR Res.Appl, **10**, 210-218 (1985).