微視的構造に基づくバラ花弁反射モデル
~ 複数品種への拡張 ~

The Reflection Model of Rose Petals Based on the Microscopic Structures
~ Extended to Plural bleeds ~

立野 竜也　寺戸 育夫　剣持 雪子　小谷 一孔
Ryuuya TACHINO　Ikuo TERADO　Yukiko KENMOCHI　Kazunori KOTANI
北陸先端科学技術大学院大学　情報科学研究科
Graduate School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology

Abstract　In this paper, we present the reflection model of Computer Graphics in order to create photorealistic images of roses. First, we examine the reflected light distribution on a petal surface for each different rose, and improve our proposed reflection model of rose petals based on the microscopic structures. We show that our reflection model can be used for multiple varieties of roses.

1　はじめに

植物のフォトリアルなコンピュータグラフィックス (CG) 生成が研究されているが [1] 、花の質感の再現に重点を置いた CG 生成のためのモデリングの研究例は少ない。そこで、我々は赤いバラの花に着目し、フォトリアルな CG 生成手法の確立を目的とする。赤いバラの花は、形状は複雑で花弁表面に白く浮き出るハイライトにより独特の質感を表出し、Lambert や Phong モデル [2] で表現することはできない。そこで、我々はまずバラ花弁表面の質感表現の検討を行い、花弁の微視的構造 (μm スケール) に基づく反射モデルを提案、巨視的構造 (cm スケール) であるバラ花弁の独特の質感を CG で表現できることを示した [3]。しかし、提案モデルは、単一のバラの品種や光源の入射角に対する反射光分布に対応したものであり、他の品種や入射角については検討していなかった。

本稿では、まず上記のバラ花弁反射モデルを他のバラ品種に拡張する。ここでは、質感の特徴が大きく異なる 4 品種を対象とし、それぞれの反射光分布を拡張した反射モデルによって近似できることを示す。また、単一の入射角に対して検討した反射モデルの他の入射角に対する適応性を調べるための一検討として、入射角を 30° および 60° とした時の反射光分布を測定、入射角 45° として検討したモデルを用いてそれぞれの反射光分布の近似を試みる。最後に、提案手法を用いて生成したバラの花の CG 生成例を示す。

2　微視的構造に基づくバラ花弁反射モデル

花弁断面の微視的な模式図を図 1 に示す [4]。

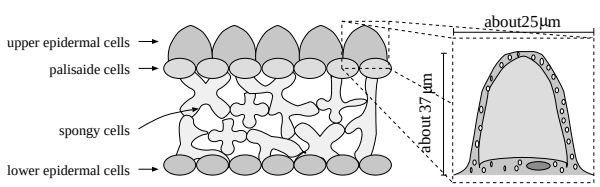

図 1: バラ花弁の断面図

花弁は、上面表皮細胞 (以下、上皮細胞と略す)、柵状組織細胞、海綿状組織、下面表皮細胞の 4 層からなる。その中でドーム形状をなす上皮細胞が特徴的で、花弁表面に見られる質感は、ドーム形状の陰影やハイライトにより表れていると考えられる。また、海綿状組織には細胞間隙と呼ばれる空気の粒が数多く含まれ、上面表皮細胞を透過した光は、海綿状組織内で細胞と間隙との境界で反射・屈折を繰り返し、指向性の低い反射光となると考えられる。そこで、我々は花弁の上皮細胞と海綿状組織の 2 層に注目し、反射モデルを構築した [3]。

2.1　微視的構造の反射モデル

上皮細胞と海綿状組織の反射モデルを図 2 に示す。

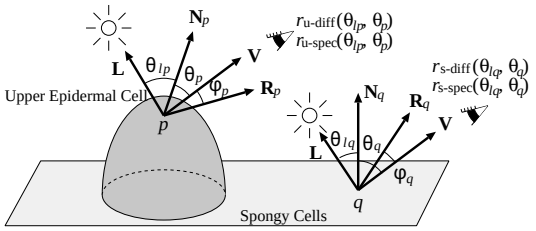

図 2: 上皮細胞と海綿状組織の反射モデル

上皮細胞表面上のある点 p の法線ベクトルを $\mathbf{N}_p$ で、$\mathbf{L}$ から光が照射されたときの視線方向 $\mathbf{V}$ への拡散反射反射率 $r_{\mathrm{u-diff}}(\theta_{lp}, \theta_p)$ および鏡面反射の反射率 $r_{\mathrm{u-spec}}(\theta_{lp}, \theta_p)$ は、Lambert と Phong のモデル [2] より、それぞれ次式で表せる。

$$r_{\mathrm{u-diff}}(\theta_{lp}, \theta_p) = \cos\theta_{lp} \quad (1)$$

$$r_{\mathrm{u-spec}}(\theta_{lp}, \theta_p) = \cos^{n_{\mathrm{u-s}}}\phi_p \quad (2)$$

ここで上皮細胞の鏡面反射の広がりは経験的に $n = 40$ とする。また，海綿状組織表面の点 q における、拡散および鏡面反射率 $r_{\mathrm{s-spec}}(\theta_{lq}, \theta_q), r_{\mathrm{s-diff}}(\theta_{lq}, \theta_q)$ も同様に求める。海綿状組織の鏡面反射の広がりは経験的に $n = 5$ とする。

2.2　各反射光成分の分布

上述の微視的構造における反射モデルを用いて、上皮細胞を巨視的に見たときの拡散反射成分の分布を求める。図 3 において、バラ花弁上のある平面領域 α 上に n_u 個の上皮細胞が存在するとする。

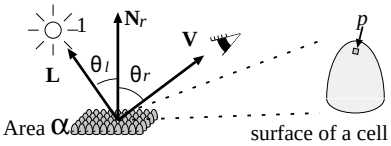

図 3: n_u 個の上皮細胞における反射モデル

平面 α の法線ベクトル $\mathbf{N}$ から角 θ_l を成す光源ベクトル $\mathbf{L}$ の方向から強度 1 の光が照射されているとき、領域 α 内の上皮細胞の表面 $S_i (i = 1, 2, ..., n_u)$ 上の微小領域 p を考えると、領域 α から $\mathbf{N}$ と角 θ を成す視線ベクトル $\mathbf{V}$ 方向への拡散反射成分 $r'_{\mathrm{u-diff}}(\theta_l, \theta)$ は式 (3) で求められる。

$$r'_{\mathrm{u-diff}}(\theta_l, \theta) = \frac{1}{\alpha}\sum_{i=1}^{n_u}\int_{S_i} l(p)v(p)r_{\mathrm{u-diff}}(\theta_{lp}, \theta_p)dp \quad (3)$$

ここで $l(p)$ および $v(p)$ は p がそれぞれ光源および視点から見えるとき 1、見えないとき 0 である。入射角 θ_l は 45 度に固定した場合について検討した。また、θ は -70 度から 70 度の範囲を 10 度刻みで変化させた。上皮細胞の鏡面反射成分 $r'_{\mathrm{u-spec}}(\theta_l, \theta)$、海綿状組織の拡散および鏡面反射成分 $r'_{\mathrm{s-diff}}(\theta_l, \theta)$、$r'_{\mathrm{s-spec}}(\theta_l, \theta)$ も同様にして得る [3]。

2.3 各反射成分の混合モデル

前述の 4 つの反射光成分の分布の線形和により、バラ花弁の反射光分布を表す。花弁の法線ベクトル $\mathbf{N}$ に対して入射角 θ_l の位置から強度 I_l の光を照射したとき、方向 θ への反射光強度 $I(\theta_l, \theta)$ を式 (4) に表す。ここで、$x_{\mathrm{u-diff}}$、$x_{\mathrm{u-spec}}$、$x_{\mathrm{s-diff}}$、$x_{\mathrm{s-spec}}$ は各反射成分の混合係数である。

$$I(\theta_l,\theta) = I_l \Big[r'_{\mathrm{u-diff}}(\theta_l,\theta) x_{\mathrm{u-diff}} + r'_{\mathrm{u-spec}}(\theta_l,\theta) x_{\mathrm{u-spec}} + r'_{\mathrm{s-diff}}(\theta_l,\theta) x_{\mathrm{s-diff}} + r'_{\mathrm{s-spec}}(\theta_l,\theta) x_{\mathrm{s-spec}} \Big] \quad (4)$$

2.4 反射光分布の合成と測定値との比較

表 1 に対象 4 品種を示す。本稿では以降、表 1 の品種をそれぞれの略称で呼ぶ。

表 1: ハイライトの表出度合いによる分類と対象品種

選定品種	ハイライト表出度合	花色			略称
		色名	x	y	
BlackBeauty	強	黒	0.476	0.255	BR
RoteRose	中	赤	0.608	0.285	RR
Eliza	弱	ピンク	0.361	0.302	PR
Supless	無	白	0.337	0.345	WR

表 1 の各バラについて花弁の反射光分布を測定し、2.2 節で求めた 上皮細胞および 海綿状組織の反射成分と式 (4) から、最小二乗法 [5] を用いて $x_{\mathrm{u-diff}}, x_{\mathrm{u-spec}}, x_{\mathrm{s-diff}}$ および $x_{\mathrm{s-spec}}$ を計算した (図 4)。

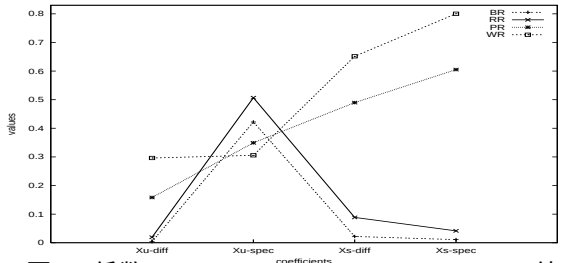

図 4: 係数 $x_{\mathrm{u-diff}}, x_{\mathrm{u-spec}}, x_{\mathrm{s-diff}}, x_{\mathrm{s-spec}}$ の値

図 4 において、$x_{\mathrm{u-spec}}$、$x_{\mathrm{u-diff}}$ は品種毎の差は小さいが、$x_{\mathrm{s-diff}}$、$x_{\mathrm{s-spec}}$ は品種により値が大幅に異なった。これは、上皮細胞での反射は色素による光の吸収を受けにくく、逆に海綿状組織での反射は上皮細胞に含有される色素による光の吸収のため、品種により係数が大きく変化したと考えられる。

以上より、$x_{\mathrm{u-diff}}, x_{\mathrm{u-spec}}, x_{\mathrm{s-diff}}$ および $x_{\mathrm{s-spec}}$ を式 (4) に代入して合成した反射光強度 $I(45, \theta)$ を図 5 に示す。図 5 において、BR および RR の測定・合成した反射光分布は説明のために 10 倍してある。

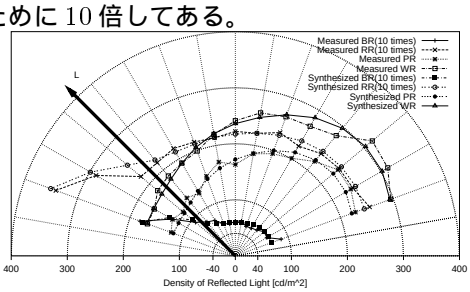

図 5: 反射光分布の測定値と本モデルによる合成値との比較

図 5 より、合成した反射光分布がいずれの品種においても実際の反射光分布を近似している。

また、θ_l=30,60 ° における測定値と 各 $r'(45, \theta)$ を用いた合成値の比較の RR における例を図 6 に示す。図 6 より、合成した反射光分布がどちらの入射角についても実際の反射光分布を近似している。また、他の品種も同様の結果であったが、紙面の都合上省略する。測定値と合成値の誤差 $E(theta_l, \theta)[\%]$ を

$$E(\theta_l,\theta) = \frac{|I_{exp}(\theta_l,\theta) - I(\theta_l,\theta)|}{I_{exp}(\theta_l,\theta)} \times 100[\%] \quad (5)$$

により求めたところ、それぞれほぼ 10% 以下の誤差で近似できた。ここで $I_{exp}(\theta_l, \theta)$ は測定値の反射光強度である。

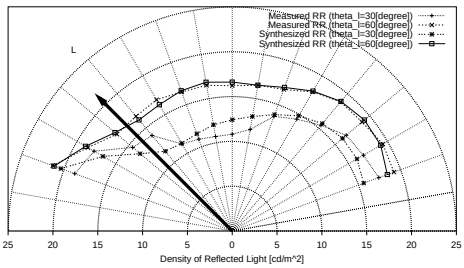

図 6: 反射光分布の測定値と本モデルによる合成値との比較

3 CG 生成例

実際の花弁形状をレーザレンジファインダを用いて計測し、提案手法を用いて CG 画像を生成した。花弁の拡大図を用いた写真と生成画像の質感比較を図 7 にそれぞれ示す。図 7 より、それぞれの品種においてハイライトおよび陰影の位置が似ていることが分かる。なお、BR および RR で生成画像の花弁輪郭部分にハイライトが表れていないのは、花弁形状の計測時に輪郭部分の形状が計測できなかったためと考えられる。

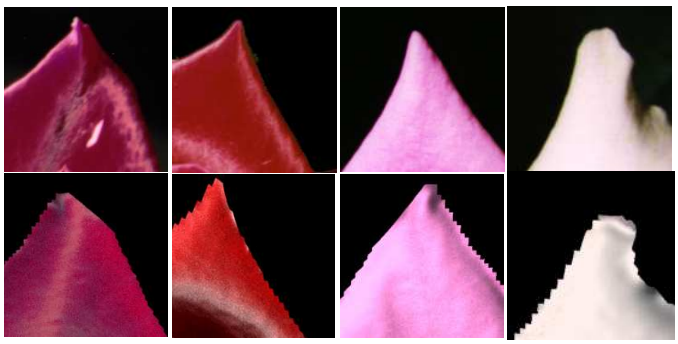

図 7: ハイライトと陰影の比較 (写真 (上)，提案手法 (下))

4 まとめ

本稿では、我々が提案した一品種用のバラ花弁反射モデルを複数の品種に対応できるよう拡張した。質感の特徴が大きく異なる 4 品種に対して、測定した各々の反射光分布に対する誤差を最小にする混合係数を求めた。また，入射角 45 ° として検討したモデルで入射角を 30 ° および 60 ° とした時の反射光分布への適応度を調べた。提案モデルにより、反射光分布を合成し、それぞれの反射光分布をほぼ 10% 以内の誤差で近似できた。また、提案モデルを適用してバラ花弁の CG 画像を生成した。

今後の課題として、反射モデルの関数化、入射光波長による反射特性の変化を考慮した反射モデルの検討が挙げられる。

参考文献

[1] Prusinkiewicz, Lindenmayer, “The Algorithmic Beauty of Plants”, Springer-Verlag Inc., 1990.

[2] Hearn, Pauline Baker, “Computer Graphics”, Prentice Hall, Inc., 1994.

[3] 寺戸, 剣持, 小谷, “微視的・巨視的構造に基づく花のグラフィックスモデルに関する研究”, 情報処理学会研究報告 CVIM114-19,pp145-152,1999.

[4] 安田 , “花色の生理・生化学”, 内田老鶴圃 (株), 1993.

[5] 田島, “最小二乗法の理論とその応用”, 東洋書店, 1996.

北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 小谷研究室
〒 923–1292 石川県 能美郡 辰口町 旭台 1–1
Phone 0761–51–1699 (ext. 1384)
E-mail rtachino@jaist.ac.jp