微視的・巨視的構造に基づくバラの花の フォトリアルなコンピュータグラフィックス生成 ~ 反射モデルと形状モデル ~

立野竜也† 寺戸育夫† 剣持雪子† 小谷一孔†

† 北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科
Email: rtachino@jaist.ac.jp

概要 バラの花のフォトリアルなコンピュータグラフィックス (CG) を生成するために、反射モデルと形状モデルを検討する。反射モデルについて、複数のバラ品種の花弁表面の反射光分布の違いを調べ、我々が既に提案している微視的・巨視的構造に基づくバラ花弁の反射モデルを拡張する。これにより、複数の品種のバラ花弁の質感を表現できることを示す。また形状モデルについて、花の形状を得るために花を花弁に分解して計測し、計算機上で花の形状を合成する。これに、上記反射モデルを適用して、バラの CG 画像を生成する。

キーワード: コンピュータグラフィックス、花、反射モデル、形状モデル

The Reflection and Shape Models of Rose Flowers for the Image Generation Based on the Microscopic and Macroscopic Structures

Ryuuya TACHINO† *Ikuo TERADO*† *Yukiko KENMOCHI*† *Kazunori KOTANI*†

†Graduate School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology
Email: rtachino@jaist.ac.jp

Abstract The reflection and shape models of Computer Graphics are presented in order to create the photorealistic images of roses. For the reflection model, we examine the reflected light distribution on the petal surface for each different rose, and improve our proposed reflection model of rose petals based on the microscopic and macroscopic structures. We show that our reflection model can be used for multiple varieties of roses. For the shape model, we first decompose a flower into the petals, acquire the digitized data of each petal, and interpolate the surface. We combine those petal surfaces afterwards by computer.

Key Words: Computer Graphics, Flower, Reflection Model, Shape Model.

1 はじめに

植物や炎・水等の自然物は、形状が複雑であり、独特の質感を持つため、違和感を感じさせない CG の生成は難しい。例えば、赤いバラ (品種は RoteRose) の花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 [1] で表現することはできない。このため、我々は赤いバラの花のフォトリアルな CG 生成の為の新しい反射モデルについて検討を行い、花弁の微視的構造に基づく反射モデルを提案し、赤いバラの独特の質感を CG で表現できることを示した [2]。しかし、検討したモデルは単一の品種のバラのみを対象としたものであり、他の品種に対する汎用性については示していなかった。

本報告では、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、それぞれの質感を、拡張した反射モデルによって表現する。その結果、質感については、反射モデルにおいて、上面表皮細胞および海綿状組織の反射光分布の混合比率を変えることにより、対象とした全ての品種のバラ花弁の反射光分布を精度良く近似できることを示す。また、花弁が複雑に重なり合ったバラの花の形状を表現するために、花から花弁を分離し、それぞれについて形状を計測し、計測したそれぞれの花弁を計算機上で合成して、上記反射モデルを適用してバラの花

の CG 画像の生成例を示す。

2 品種による質感の違いと光の反射特性

バラは、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持つが、品種によりその質感の表出の度合いが異なる。しかし、これまでこの様な質感の特徴を定量的に扱った報告はされていない。そこでバラの栽培業者らと検討し、市場に生花として流通している主要な約 20 品種を、質感の表出の度合いにより 4 種類に大別し、これら 4 種類に対してそれぞれ代表的な 1 品種を選定した (表 1)。本稿では以降、表 1 の品種をそれぞれの略称で呼ぶ。

表 1: 質感の表出度合いによる分類と対象品種

独特な質感の表出の度合い	選定品種	花色	略称
強	Black Beauty	黒	BR
中	Rote Rose	赤	RR
弱	Eliza	ピンク	PR
無	Supless	白	WR

表 1 の各バラについて花弁の反射光分布を測定した (図 1、図 2)。ここで、BR、RR と PR、WR とでは反射光強度のスケールが異なるため、図 1 と図 2 の横軸のスケールを変えてある。図中のベクトル **L** は、光源へ向かう方向ベクトルである。図 1 および図 2 より、独特の質感が表れる度合いが強いほど、光源方向に強い反射を持ち、かつ正反射方向に対する反射が弱く、逆に質感の表れる度合いが弱い程、反対の傾向が見られる。花弁表面の微視的な構造は品種が違ってもほぼ同一であるため [3]、文献 [2] により提案した微視的構造に基づく反射モデルを拡張して適用することにより、反射光分布を近似できる。

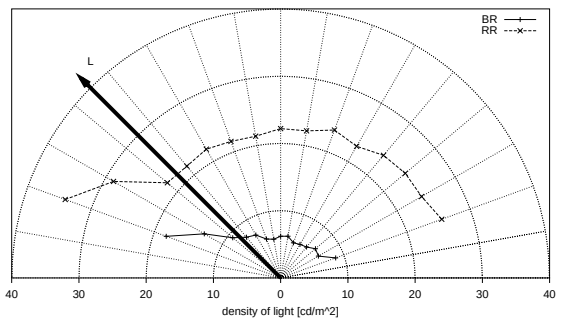

図 1: 花弁の反射光分布の測定結果 1 (BR,RR,scale=40)

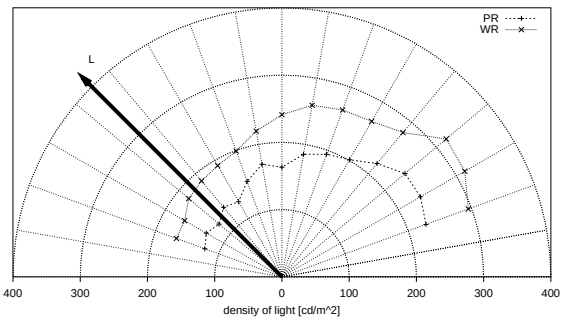

図 2: 花弁の反射光分布の測定結果 2 (PR,WR,scale=400)

3 微視的構造に基づくバラ花弁モデル

花弁断面の微視的な模式図を図 3 に示す [3]。

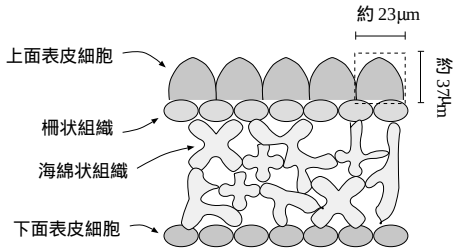

図 3: バラ花弁の断面図

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って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、反射モデルを作成した [2]。

3.1 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 4 に示す。

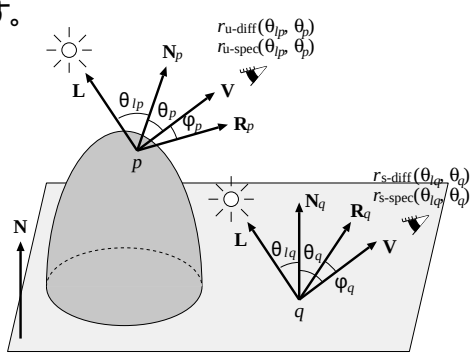

図 4: 上皮細胞と海綿状組織の反射モデル

上皮細胞表面上のある点 p の法線ベクトルを $\mathbf{N}_p$ とすると、$\mathbf{N}_p$ から角 θ_{lp} 離れたベクトル $\mathbf{L}$ から光が照射されているとき、$\mathbf{N}_p$ から角 θ_p 離れた視線ベクトル $\mathbf{V}$ への拡散反射の反射率 $r_{\mathrm{u-diff}}(\theta_{lp}, \theta_p)$ および鏡面反射の反射率 $r_{\mathrm{u-spec}}(\theta_{lp}, \theta_p)$ は、Lambert 則に基づくモデルおよび Phong モデルより、それぞれ

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

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

とする。ϕ_p は、$\mathbf{N}_p$ に対して、$\mathbf{L}$ の正反射方向を示すベクトル $\mathbf{R}_p$ と $\mathbf{V}$ とのなす角で、

$$\phi_p = \cos^{-1}(\mathbf{R}_p \cdot \mathbf{V}) \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_p = (2\mathbf{N}_p \cdot \mathbf{L})\mathbf{N}_p - \mathbf{L} \quad (4)$$

により得られる。ここで $\mathbf{L}$、$\mathbf{V}$、$\mathbf{N}_p$ は単位ベクトルとする。また、$n_{\mathrm{u-s}}$ は上皮細胞の表面に表れるハイライトの広がりを与える変数で、ここでは経験的に $n_{\mathrm{u-s}} = 40$ とした。海綿状組織の反射モデルも同様にして求める。上皮細胞と海綿状組織との境界のある点 q における、拡散反射率 $r_{\mathrm{s-diff}}(\theta_{lq}, \theta_q)$ と鏡面反射率 $r_{\mathrm{s-spec}}(\theta_{lq}, \theta_q)$ は

$$r_{\mathrm{s-diff}}(\theta_{lq}, \theta_q) = \cos\theta_{lq} \quad (5)$$

$$r_{\mathrm{s-spec}}(\theta_{lq}, \theta_q) = \cos^{n_{\mathrm{s-s}}}\phi_q \quad (6)$$

で表される。細胞間隙を数多く含む海綿状組織の表面は上皮細胞に比べてラフであると考えられるため、広がりの大きいハイライトが表れるよう、$n_{\mathrm{s-s}} = 5$ とした。次に、これらのモデルを用いて花弁の反射モデルを求める。

3.2 各反射光成分の分布

上皮細胞の拡散反射光成分の分布を求める。バラ花弁上のある微小領域 α 内に n_u 個の上皮細胞が存在するものとして、光の入射角 θ_l を 45 度に固定した場合について検討を行った。(図 5)。

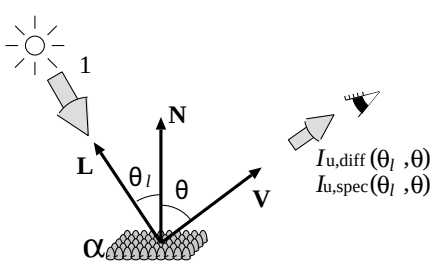

図 5: n_u 個の上皮細胞における反射モデル

α の法線ベクトル $\mathbf{N}$ と角 θ_l 離れた光源ベクトル $\mathbf{L}$ の方向から強度 1 の光が照射されているとき、α 全体から $\mathbf{N}$ と角 θ 離れた視線ベクトル $\mathbf{V}$ へ向かう拡散反射光強度 $r'_{\mathrm{u-diff}}(45, \theta)$ と鏡面反射光強度 $r'_{\mathrm{u-spec}}(45, \theta)$ を求める。拡散反射光強度 $r'_{\mathrm{u-diff}}(45, \theta)$ と鏡面反射光強度 $r'_{\mathrm{u-spec}}(45, \theta)$ は θ の関数であり、それぞれの反射光成分の分布を示す。角 θ は -70 度から 70 度の範囲を 10 度刻みで変化させた。α 内の上皮細胞の表面 $S_i (i = 1, 2, ..., n_u)$ 上の点 p について式 (1) より拡散反射光強度を計算し、その総和 $r'_{\mathrm{u-diff}}(45, \theta)$ は、

$$r'_{\mathrm{u-diff}}(\theta_l, \theta) = \frac{1}{\alpha}\sum_{i=1}^{n_u}\int_{S_i} l(p)v(p)r_{\mathrm{u-diff}}(\theta_{lp}, \theta_p)dp \quad (7)$$

となる。ここで、$l(p)$ は p が光源から見えるとき 1、見えないとき 0、$v(p)$ は p が視点から見えるとき 1、見えないとき 0 となる。鏡面反射光強度 $r'_{\mathrm{u-spec}}(45, \theta)$ も式 (2) より同様の式が得られる [2]。海綿状組織についても同様に、拡散反射光強度 $r'_{\mathrm{s-diff}}(\theta_l, \theta)$、鏡面反射光強度 $r'_{\mathrm{s-spec}}(\theta_l, \theta)$ が得られる [2]。

上皮細胞及び 海綿状組織における拡散・鏡面反射それぞれの巨視的な反射光分布を図 6 に示す。図 6 において、上皮細胞の鏡面反射成分は説明のために反射光分布の大きさを 5 倍してある。

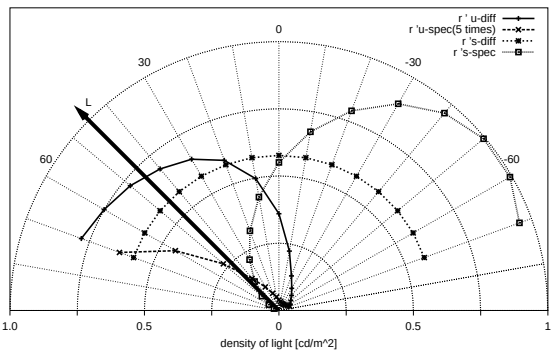

図 6: 本モデルによる上皮細胞および 海綿状組織における反射光分布

3.3 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 $I(\theta_l, \theta)$ を次式に表す。

$$\begin{aligned} I(\theta_l,\theta) \;=\; I_l\Big[& r'_{\mathrm{u-diff}}(\theta_l,\theta)\cdot x_{\mathrm{u-diff}} \\ & + r'_{\mathrm{u-spec}}(\theta_l,\theta)\cdot x_{\mathrm{u-spec}} \\ & + r'_{\mathrm{s-diff}}(\theta_l,\theta)\cdot x_{\mathrm{s-diff}} \\ & + r'_{\mathrm{s-spec}}(\theta_l,\theta)\cdot x_{\mathrm{s-spec}}\Big] \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、

$$x_{\mathrm{u-diff}} = (1-t_{\mathrm{u}})k_{\mathrm{u-diff}} \quad (9)$$

$$x_{\mathrm{u-spec}} = (1-t_{\mathrm{u}})k_{\mathrm{u-spec}} \quad (10)$$

$$x_{\mathrm{s-diff}} = t_{\mathrm{u}}(1-t_{\mathrm{s}})k_{\mathrm{s-diff}} \quad (11)$$

$$x_{\mathrm{s-spec}} = t_{\mathrm{u}}(1-t_{\mathrm{s}})k_{\mathrm{s-spec}} \quad (12)$$

である。t_u および t_s はそれぞれ上皮細胞および海綿状組織細胞の透過率、$k_{\mathrm{u-diff}}$、$k_{\mathrm{u-spec}}$、$k_{\mathrm{s-diff}}$ および $k_{\mathrm{s-spec}}$ はそれぞれ上皮細胞の拡散・鏡面反射率および海綿状組織細胞拡散・鏡面反射率の大きさを示す係数である。$I(\theta_l,\theta)$、$r'_{\mathrm{u-diff}}(\theta_l,\theta)$、$r'_{\mathrm{u-spec}}(\theta_l,\theta)$、$r'_{\mathrm{s-diff}}(\theta_l,\theta)$、$r'_{\mathrm{s-spec}}(\theta_l,\theta)$ についてバラ花弁を用いて $I(\theta_l,\theta)$ を計測し、4 組以上の既知を与えた式 (8) の連立方程式を解くことにより、4 つの未知数 $x_{\mathrm{u-diff}}$、$x_{\mathrm{u-spec}}$、$x_{\mathrm{s-diff}}$、$x_{\mathrm{s-spec}}$ を与える。

3.4 反射光分布の合成と実測値との比較

3.3 までで求めた 上皮細胞および 海綿状組織の反射光分布 (図 6) と式 (8) から、最小二乗法を [4] 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 7)。$x_{\mathrm{u-spec}}$ に関しては品種毎の差は小さい。これは、微視的に見たときの上面表皮細胞の表面の形状がどの品種においてもほぼ同じ形状であるからと考えられる。また、BR および RR では $x_{\mathrm{u-diff}}, x_{\mathrm{s-diff}}$および $x_{\mathrm{s-spec}}$ の値が小さくなり、逆に、PR および WR では、$x_{\mathrm{s-diff}}$および $x_{\mathrm{s-spec}}$ が大きな値となった。これは、上面表皮細胞に含まれる花弁の色を決定する色素の種類や濃度の違いにより、品種による光学的特性が大きく異なるためと考えられる。

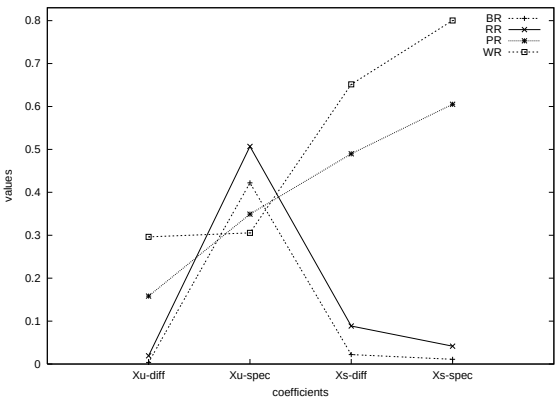

図 7: 係数 $x_{\mathrm{u-diff}}, x_{\mathrm{u-spec}}, x_{\mathrm{s-diff}}, x_{\mathrm{s-spec}}$ の値

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 (8) に代入して合成した反射光強度 $I(45,\theta)$ を図 8 および図 9 に示す。図 8 は BR と RR の結果を、図 9 は PR と WR の結果をそれぞれ示す。図 8 および図 9 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良く近似している。実測値と合成値の誤差 $E[\%]$ を

$$E = \frac{|I_{exp}(45,\theta) - I(45,\theta)|}{I_{exp}(45,\theta)} \times 100[\%] \quad (13)$$

により求めたところ、ほぼ 10% 以下の誤差で近似できた。ここで $I_{exp}(45,\theta)$ は実測値の反射光強度である。

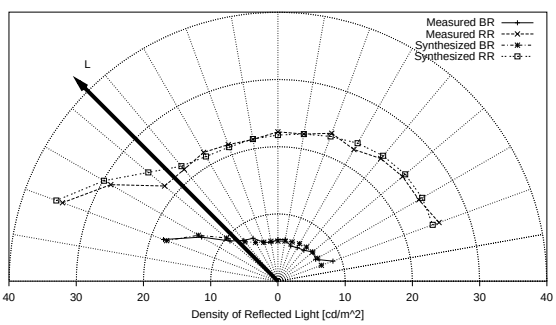

図 8: BR,RR の反射光分布の実測値と本モデルによる合成値との比較 (Scale=40)

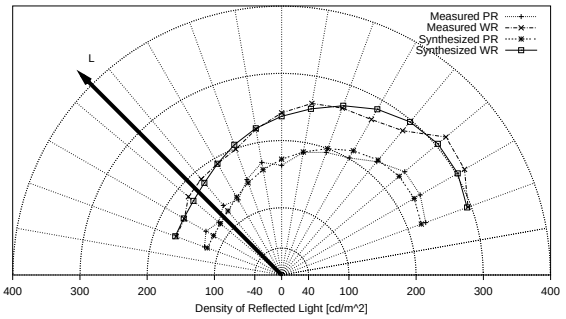

図 9: PR,WR の反射光分布の計測値と本モデルによる合成値との比較 (Scale=400)

4 バラの花の形状モデリング

バラの花の形状は、複数の不規則な形状の花弁が折り重なって構成されているため、花の内側の花弁形状はそのままでは計測できない。そこで、花を花弁に分解し、花弁形状を計測し、計測した花弁を計算機上で合成する。

4.1 花弁形状の計測

バラの花が k 枚の花弁 $P_i(i = 1, 2, .., k)$ からなるとすると、各 P_i について以下の形状データを測定する。

(1) 点データ $\boldsymbol{x}_i(j_i) = (x_i(j_i), y_i(j_i), z_i(j_i))$

バラ花弁は柔らかいため、非接触の形状取り込み装置であるレーザレンジファインダ[1] を用いて花弁形状を計測した。レンジファインダのファインダ領域は $70\text{mm} \times 70\text{mm}$ で、その中を等間隔の格子状に最大 200×200 頂点のデータを計測する。また、奥行方向の分解能は 0.3mm である。各 P_i において計測した花弁表面の点数は花弁 1 枚当たり約 9000 から 13000 であった $(j_i = 1, 2, .., 9000 \sim 13000)$。

(2) 位置データ

$((P_i(l), S_i(l)), (P_i(r), S_i(r)), \phi_i, \theta_i)$

ここで、$(P_i(l), S_i(l)), (P_i(r), S_i(r))$ は P_i の左右隣接花弁の情報である。$P_i(l), P_i(r)$ はそれぞれ P_i の隣接花弁を表し、$S_i(l)(S_i(r))$ は、P_i と $P_i(l)(P_i(r))$ の前後関係を表し、次の値を持つ。

$$S_i(l)(S_i(r)) = \begin{cases} inside, & (P_i(l)(P_i(r)) \text{ が内側}) \\ outside, & (P_i(l)(P_i(r)) \text{ が外側}) \end{cases}$$

[1] VIVID700, ミノルタ株式会社

また図 10 に示すように、ϕ_i は茎と P_i が成す曲面の曲率が 0 になる部分との角度であり、θ_i は基準となる枝・がくと P_i の付根との角度である。

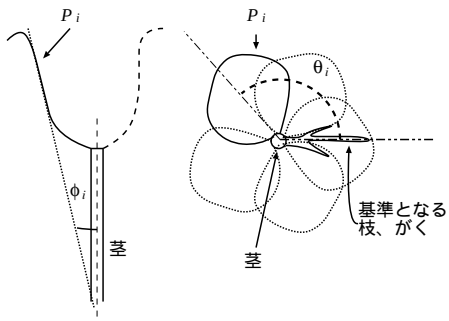

図 10: 花弁 P_i の位置及び向きの計測部位

4.2 花弁形状データによる花弁形状の合成

取得した花弁形状の点データ $\boldsymbol{x}_i(j_i)$ を用いて、$\boldsymbol{x}_i(j_i)$ を頂点とするポリゴンの集合により花弁形状を表現する。頂点の隣接情報には、格子状に配置された計測点の隣接情報を用いた。ポリ

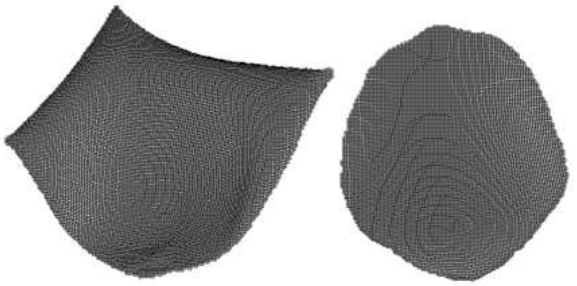

図 11: ポリゴンによる花弁形状表現

4.3 花弁形状を用いた花の形状の合成

各 P_i のポリゴンの頂点 $\boldsymbol{x}_i(j_i)$ の座標系は各 P_i 固有のものとなっている。そこで全ての $P_i(i = 1, 2, ..., k)$ に対し、位置データ $((P_i(l), S_i(l)), (P_i(r), S_i(r)), \phi_i, \theta_i)$ を用いて、以下のように $\boldsymbol{x}_i(j_i)$ の回転・平行移動を行う。式 (14) により、P_i の合成を実現する。

$$\boldsymbol{x'}_i(j_i) = T_i\ \boldsymbol{x}_i(j_i) + \boldsymbol{\alpha}_i \qquad (14)$$

ここで T_i および $\boldsymbol{\alpha}_i$ は隣接する花弁の間隔や花弁同士の接触を考慮して決定しなければならず、現時点では、インタラクティブな操作により各 P_i での位置を決めている。形状の数学的

モデルによる自動生成については、今後の課題としたい。

5 CG 生成例

上述の質感表現手法及び合成した花の形状を用いて、バラの CG 生成を試みた。光源は 1 個の点光源で、$I_1 = 1$、方向は $\mathbf{L}_1 = (1, 1, 1)$ (紙面に対して右斜め上の手前方向) とした。RR に対するバラの写真と本手法により生成した CG 画像を図 12 および図 13 に示す。

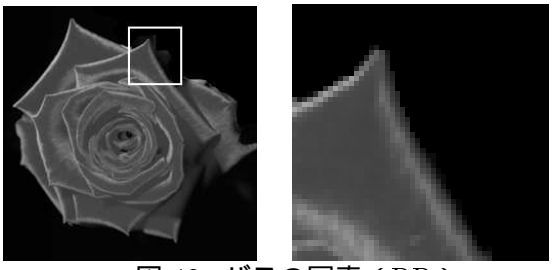

図 12: バラの写真 (RR)

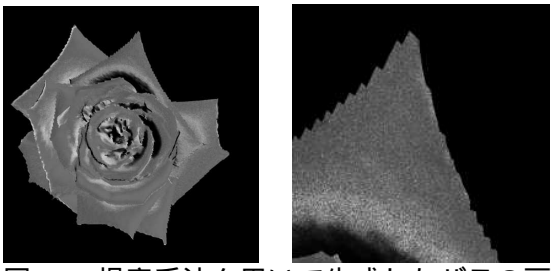

図 13: 提案手法を用いて生成したバラの画像 (RR)

図 12、図 13 の左側は花の全体図、右側は図 12 の四角で囲まれた所の拡大図である。図 12、図 13 を比較すると、RR の形状が再現されており、また拡大図においてハイライトの分布が類似している。また、図 13 の形状を用いて BR、RR、PR、WR のハイライトの分布の比較を行った例を図 14 に示す。

6 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、それぞれ反射光分布を測定し、実測の反射光分布の誤差を最小にするような混合係数を求めた。本モデルにより、反射光分布を合成し、対象範囲の品種のバラ花弁の反射光分布をほぼ 10% 以内の誤差で近似できた。また、バラの花の形状を表現するために、花から花弁を分離し、

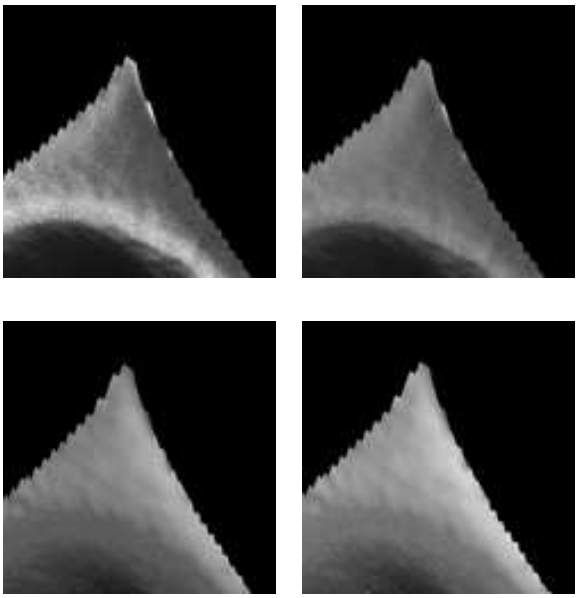

図 14: ハイライトの分布の比較

それぞれについて形状および花弁の位置・向きも併せて計測して、花の形状を合成し、反射モデルを適用してバラの CG 画像を生成した。

今後の課題は、反射モデルでは色に関するモデル化および反射モデルの関数化を検討し、形状においては、T_i および $\boldsymbol{\alpha}_i$ を自動的に求める手法の検討を行う。

参考文献

[1] Donald Hearn, M. Pauline Baker, “Computer Graphics”, Prentice Hall, Inc., 1994.

[2] 寺戸 育夫, 剣持 雪子, 小谷 一孔, “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.

[3] 安田 齋, “花色の生理・生化学”, 株式会社内田老鶴圃, 1993.

[4] 田島 稔, “最小二乗法の理論とその応用 [改訂版]”, 東洋書店, 1996.