JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	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
Author(s)	寺戸,育夫; 剣持,雪子; 小谷,一孔
Citation	情報処理学会研究報告 : コンピュータビジョンとイメージメディア, 99(3): 145-152
Issue Date	1999-01
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/3295
Rights	社団法人 情報処理学会, 寺戸育夫／剣持雪子／小谷一孔, 情報処理学会研究報告 : コンピュータビジョンとイメージメディア, 1999(3), 1999, 145-152. ここに掲載した著作物の利用に関する注意: 本著作物の著作権は（社）情報処理学会に帰属します。本著作物は著作権者である情報処理学会の許可のもとに掲載するものです。ご利用に当たっては「著作権法」ならびに「情報処理学会倫理綱領」に従うことをお願いいたします。 The copyright of this material is retained by the Information Processing Society of Japan (IPSJ). This material is published on this web site with the agreement of the author (s) and the IPSJ. Please be complied with Copyright Law of Japan and the Code of Ethics of the IPSJ if any users wish to reproduce, make derivative work, distribute or make available to the public any part or whole thereof. All Rights Reserved, Copyright (C) Information Processing Society of Japan.
Description	

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

コンピュータビジョンと
イメージメディア 114－19
（1999．1．22）

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

寺戸 育夫　　剣持 雪子　　小谷 一孔
eqo@jaist.ac.jp　kenmochi@jaist.ac.jp　ikko@jaist.ac.jp

北陸先端科学技術大学院大学　　情報科学研究科
〒923-1292 石川県能美郡辰口町旭台 1-1
0761-51-1699 (内線 1384)

概要

本稿では、赤いバラのフォトリアルなコンピュータグラフィックス (CG) の生成手法について述べる。バラの花弁には、花弁の形状や模様のように肉眼で直接観察することのできる構造と、細胞のように目には見えないほど小さなスケールの構造がある。ここではそれぞれを、巨視的構造、微視的構造と呼び、実際のバラの構造に基づいたモデル化を行う。微視的構造を考慮することで、バラ花弁の表面に数多く密集しているドーム形状の細胞に起因する、花弁が持つ独特の反射特性を表すことが可能となり、これを用いて花弁の質感のフォトリアルなCG表現を実現する。また、CGの生成にレイトレーシング法とラジオシティ法を適用し、花弁同士の光の反射や透過といった巨視的構造による光学現象についても考慮する。

キーワード：微視的構造、巨視的構造、バラ花弁の反射光分布、モンテカルロ法、レイトレーシング法、ラジオシティ法

A Reflection and Transparency Model of Rose Petals for Computer Graphics based on Micro- and Macro-Scopic Scale Structures

Ikuo TERADO　Yukiko KENMOCHI　Kazunori KOTANI
eqo@jaist.ac.jp　kenmochi@jaist.ac.jp　ikko@jaist.ac.jp

Graduate School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology
1-1 Asahidai, Tatsunokuchi-machi, Nomi-gun, Ishikawa, 923-1292, Japan
0761-51-1699 (ext. 1384)

Abstract

This papar describes a reflection and transparency model of rose petals for computer graphics. Our model for each rose petals is based on the micro-scopic scale structures, such as dome-shaped and translucent cells. It has some parameters whose values are obtained from measuring of intensity and colors of reflected light. It is available for the faithful simulation of the optical phenomena on rose petals. Moreover, a reciprocal diffuse reflection and transparency model among petals is based on the macro-scopic scale structures. Finally, photorealistic images of roses are shown.

Key Words: Micro-Scopic Scale Structures, Macro-Scopic Scale Structures, Reflectance Distribution of Rose Petals, Monte Carlo Method, Ray-Tracing Method, Radiosity Method

1 はじめに

コンピュータグラフィックス (CG) による表現において、植物や炎・水といった自然物は、形状が複雑なうえ、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。

本稿では、CG による表現が難しいな自然物の一例として赤いバラを取り上げ、バラのフォトリアルな CG 生成手法について述べる。花全体としては、花弁の折り重なりや花弁同士の光の乱反射といった、花弁の集合体としての形態に基づくモデルを考える。花弁それぞれについては図 1に示すように、形状や模様といった巨視的構造 (数 cm のスケール)、花弁独特の質感を表すための微視的構造 (数十μm のスケール) を検討する。それぞれ実際のバラに忠実なモデル化を行い、レイトレーシング法とラジオシティ法 [1] により現実に起こっている光学現象をシミュレーションする。

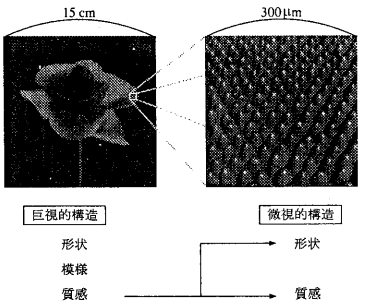


図 1: バラ花弁の巨視的構造と微視的構造

本稿では、2 章で実際に測定したバラ花弁の反射特性とその原因について言及し、3 章で微視的構造の形状モデルとシェーディングモデルを説明し、4 章でモデル中の未知数の決定方法について、5 章で花弁の色を NTSC で表示するための補正方法について述べる。6 章で微視的構造モデルを巨視的構造の質感として表現する手法について述べ、7 章で従来手法により生成した CG と本手法により生成した CG との比較検討を行う。

2 バラ花弁における光の反射特性

CG において物体の質感は、物体表面での光の反射特性によって表現される。そこで、バラ花弁における光の反射特性を実験的に測定し、花弁が独特の反射特性を持つ要因について検討した。

2.1 バラ花弁の反射光分布の測定

昼光にほぼ一致する特性を持つ D_{65}光源[1] を用いて、バラ花弁の法線に対して 45 度、距離 40cm の位置から 1076 lux の光を花弁に対して照射した。−70 度から 70 度の範囲を 10 度刻みで反射光の強度を色彩輝度計[2]により測定した。10 枚の花弁について測定した反射光強度の平均値と、その比較として Lambert 則に基づくモデルと Phong モデル [1] より導かれる反射光強度を図 2に示す。図中のベクトル $\mathbf{L}$ は、光源へ向かう方向ベクトルである。

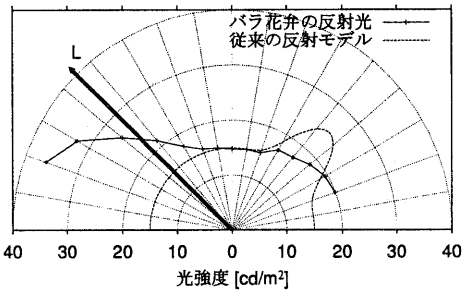


図 2: 従来モデルとバラ花弁の反射光分布

従来のシェーディングモデルでは、物体表面が比較的平坦であると仮定されていたため、光の入射に対する正反射方向への反射光強度が強くなる。一方、バラ花弁の反射光分布では、光源方向への反射光強度が特に強くなっている。このような反射光分布は従来のシェーディングモデルでは表現することができない。

バラ花弁の構造上の大きな特徴は、肉眼では観察できないほど小さなドーム形状をなす細胞が、花弁の表面に数多く並んでいることである。ドーム形状に対して光を照射した場合、光源側の面には光が直接当たり、入射光強度に比例して強くなる反射光は光源方向へ向かう。光源とは反対側の面に光は直接当たらず、細胞を透過した光によって照らされるだけである。このようにバラ花弁の反射特性と傾向が一致すること

[1]Kollmorgen Instruments Corporation Macbeth *Sōl·Source*™ *Desk Lamp*

[2]株式会社トプコン BM-7

から、ドーム形状の表面に表れるハイライトや陰影が、バラ花弁独特の反射特性に大きく寄与していると考えられる。

3 微視的構造に基づくバラ花弁の質感表現

ドーム形状をなす細胞に起因する、バラ花弁が持つ独特の反射特性を表現するため、微視的構造をモデル化し、ミクロレベルの光学現象を忠実にシミュレーションする。

3.1 バラ花弁の微視的構造

花弁断面の模式図を図3に示す [2]。

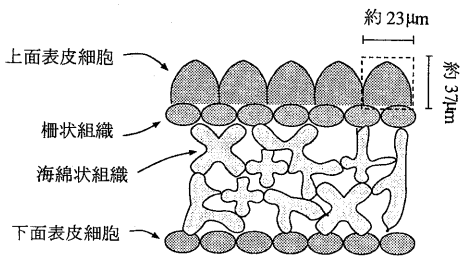


図 3: バラ花弁の断面図

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。中でも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独特の質感は、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、海綿状組織の間には細胞間隙と呼ばれる空気の粒が数多く含まれる。上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を透過するたびに屈折し、それが度重なることで指向性の低い乱反射光となる。

本研究では、花弁の質感を表現する際に重要となる要素として、

- 上皮細胞のドーム形状を表現するための形状モデル
- 上皮細胞表面で反射した光の分布特性を表すためのシェーディングモデル
- 海綿状組織内で乱反射した光の分布特性を表すためのシェーディングモデル

の3つを挙げ、これらのモデル化を行った。これに基づき簡略化した花弁の断面図を図4に示す。

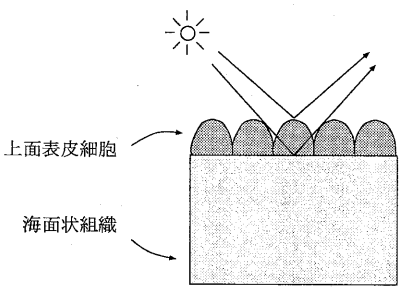
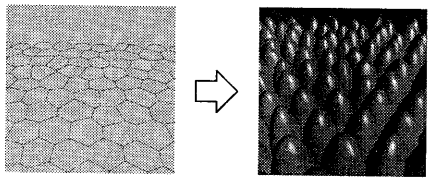


図 4: 簡略化した微視的構造モデル

3.2 上皮細胞の形状モデル

以下の手順で、ドーム形状をなす上皮細胞をモデリングする。

1. 上皮細胞の底面形状を生成 (図 5(a))
2. 各細胞の底面形状に対し、高さを導く関数によってドーム形状を生成 (図 5(b))



(a) 底面形状の生成　(b) ドーム形状の生成

図 5: 上皮細胞の形状生成手順

3.2.1 上皮細胞の底面形状の生成

まず、格子点間の距離が w となる三角格子点上に細胞の中心点を配置する。ここで w の値は、赤いバラの上皮細胞の幅の平均である $23[\mu m]$ とし、正規乱数によってゆらぎを与える。その後、各細胞の成長速度が等しいと仮定し、隣り合う細胞同士の境界をボロノイ分割によって求める。その結果、各細胞の底面形状は、自然界で一般に安定した形状とされる六方格子状になる。

3.2.2 上皮細胞のドーム形状の生成

各細胞の中心点にドームの頂点があると仮定し、その高さを h とする (図 6)。本稿で h の値は、赤バラの上皮細胞の高さの平均である $37[\mu m]$ とし、各細胞の h に正規乱数を加えてゆらぎを与える。中心点から距離 r の位置にあるドームの高さは

$$f_h(r) = h\cos\left(\frac{\pi r}{w}\right) \qquad (1)$$

として計算する。

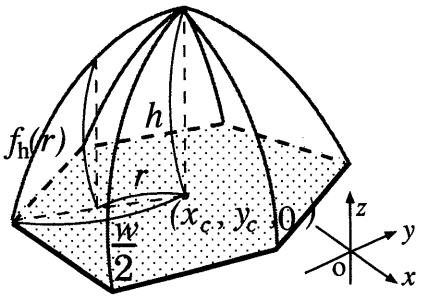


図 6: ドーム形状の生成

3.3 微視的構造のシェーディングモデル

法線ベクトルが $\mathbf{N}$ であるバラ花弁に対して光源ベクトル $\mathbf{L}$ から光が照射されているときの、上皮細胞と海綿状組織それぞれについて、視線ベクトル $\mathbf{V}$ への拡散・鏡面反射モデルを述べる (図 7)。

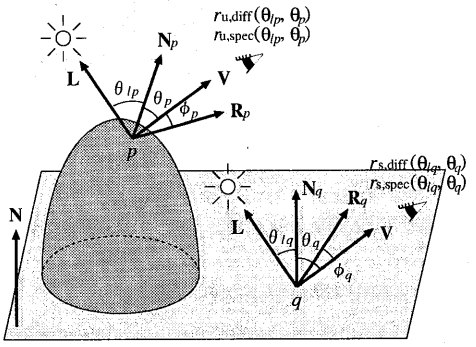


図 7: 上皮細胞における反射光分布

3.3.1 上皮細胞のシェーディングモデル

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。$\mathbf{N}_p$ 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 $r_{u,diff}(\theta_{lp}, \theta_p)$ は、Lambert 則に基づくモデルより、

$$r_{u,diff}(\theta_{lp}, \theta_p) = \cos\theta_{lp} \quad (2)$$

とする。また、鏡面反射の反射率 $r_{u,spec}(\theta_{lp}, \theta_p)$ は Phong モデルより、

$$r_{u,spec}(\theta_{lp}, \theta_p) = \cos^{n_{u,s}}\phi_p \quad (3)$$

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、

$$\phi_p = \cos^{-1}(\mathbf{R}_p \cdot \mathbf{V}) \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_p = (2\mathbf{N}_p \cdot \mathbf{L})\mathbf{N}_p - \mathbf{L} \quad (5)$$

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、$n_{u,s}$ 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、値が大きくなるほど表面が平坦であることを意味し、ハイライトの広がりが小さくなる。上皮細胞の顕微鏡写真を見るとハイライトの広がりが小さかったため、本稿では $n_{u,s} = 40$ とした。

3.4 海綿状組織のシェーディングモデル

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 $r_{s,diff}(\theta_{lq}, \theta_q)$ と鏡面反射率 $r_{s,spec}(\theta_{lq}, \theta_q)$ についても式 (2)、(3) と同様に、

$$r_{s,diff}(\theta_{lq}, \theta_q) = \cos\theta_{lq} \quad (6)$$

$$r_{s,spec}(\theta_{lq}, \theta_q) = \cos^{n_{s,s}}\phi_q \quad (7)$$

とした。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、$n_{s,s} = 5$ とした。

4 各反射成分の混合比の導出

花弁に光が照射されているときの、密集する上皮細胞全体からあらゆる方向へ進む反射光の強度、すなわち花弁を巨視的に観察したときの反射光分布から、上皮細胞・海綿状組織における拡散反射光・鏡面反射光が含まれているそれぞれの割合を求める。

花弁の法線ベクトル $\mathbf{N}$ に対して入射角 θ_l の位置から光を照射したとき、方向 θ への反射光強度 $I(\theta_l, \theta)$ は、

$$\begin{aligned} I(\theta_l, \theta) &= (1 - t_u)\Big\{k_{u,diff} \cdot I_{u,diff}(\theta_l, \theta) \\ &\quad + k_{u,spec} \cdot I_{u,spec}(\theta_l, \theta)\Big\} \\ &\quad + t_u(1 - t_s)\Big\{k_{s,diff} \cdot I_{s,diff}(\theta_l, \theta) \\ &\quad + k_{s,spec} \cdot I_{s,spec}(\theta_l, \theta)\Big\} \end{aligned} \quad (8)$$

となる。ここで、$I_{\mathrm{u,diff}}(\theta_l,\theta)$、$I_{\mathrm{u,spec}}(\theta_l,\theta)$、$I_{\mathrm{s,diff}}(\theta_l,\theta)$、$I_{\mathrm{s,spec}}(\theta_l,\theta)$ は、は花弁を巨視的に観察したときの、上皮細胞・海綿状組織表面における拡散・鏡面反射成分の光強度である。光源の光強度が与えられ、θ_l と θ が決まれば、$I_{\mathrm{u,diff}}(\theta_l,\theta)$、$I_{\mathrm{u,spec}}(\theta_l,\theta)$、$I_{\mathrm{s,diff}}(\theta_l,\theta)$、$I_{\mathrm{s,spec}}(\theta_l,\theta)$ は、前述の微視的構造の形状モデルとシェーディングモデルを用いることで求めることができる。また、花弁で反射した光の強度 $I(\theta_l,\theta)$ は実際のバラ花弁に対して実験的に測定することで得られる。このとき、

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

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

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

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

とおくと式 (8) は、

$$\begin{aligned} I(\theta_l,\theta) &= I_{\mathrm{u,diff}}(\theta_l,\theta)\cdot x_{\mathrm{u,diff}} \\ &\quad + I_{\mathrm{u,spec}}(\theta_l,\theta)\cdot x_{\mathrm{u,spec}} \\ &\quad + I_{\mathrm{s,diff}}(\theta_l,\theta)\cdot x_{\mathrm{s,diff}} \\ &\quad + I_{\mathrm{s,spec}}(\theta_l,\theta)\cdot x_{\mathrm{s,spec}} \end{aligned} \quad (13)$$

となる。

よって、$I(\theta_l,\theta)$、$I_{\mathrm{u,diff}}(\theta_l,\theta)$、$I_{\mathrm{u,spec}}(\theta_l,\theta)$、$I_{\mathrm{s,diff}}(\theta_l,\theta)$、$I_{\mathrm{s,spec}}(\theta_l,\theta)$ について 4 組以上の既知を与えた式 (13) の連立方程式を解くことにより、4 つの未知数 $x_{\mathrm{u,diff}}$、$x_{\mathrm{u,spec}}$、$x_{\mathrm{s,diff}}$、$x_{\mathrm{s,spec}}$ を求めることができる。

以下で、光の入射角θ_lを 45 度に固定した場合についての未知数の求め方について述べる。

4.1 上皮細胞における反射光分布の算出

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する (図 8)。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 $I_{\mathrm{u,diff}}(45,\theta)$ と鏡面反射光強度 $I_{\mathrm{u,spec}}(45,\theta)$ を求める。角θ は−70 度から 70 度の範囲を 10 度刻みで変化させた。ある上皮細胞の表面 S_i上の微小平面 p について式 (2) より拡散反射光強度を計算し、その総和を求めた $I_{\mathrm{u,diff}}(45,\theta)$ は、

$$\begin{aligned} I_{\mathrm{u,diff}}(\theta_l,\theta) &= \frac{1}{\alpha}\sum_{i=1}^{n_u}\int_{S_i} r_{\mathrm{u,diff}}(\theta_{lp},\theta_p) \\ &\quad \cdot l(p)\cdot v(p)\cdot p \end{aligned} \quad (14)$$

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 $I_{\mathrm{u,spec}}(45,\theta)$ も式 (3) より同様の式が成り立つ。

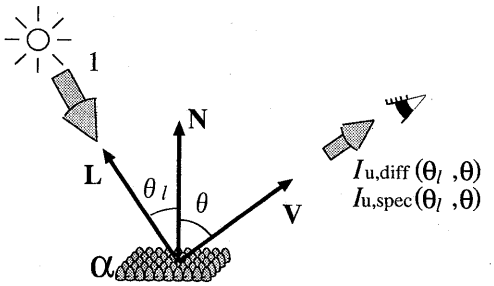


図 8: 上皮細胞における反射光分布

上皮細胞における拡散・鏡面反射それぞれの巨視的な反射光分布を図 9 に示す。

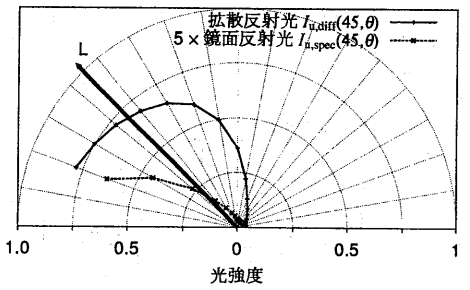


図 9: 上皮細胞における反射光分布

図 9より、拡散・鏡面反射光ともに、上皮細胞のドーム形状を考慮することで、光源方向への反射光強度が強くなるというバラ花弁特有の反射特性が表れることがわかる。

4.2 海綿状組織における反射光分布の算出

海綿状組織についても同様に、拡散反射光強度 $I_{\mathrm{s,diff}}(\theta_l,\theta)$、鏡面反射光強度 $I_{\mathrm{s,spec}}(\theta_l,\theta)$ そ

れぞれを求めた。ここでは簡単のため、上皮細胞表面や細胞境界での光の屈折は考慮しない。求められた海綿状組織の巨視的な反射光分布を図10に示す。

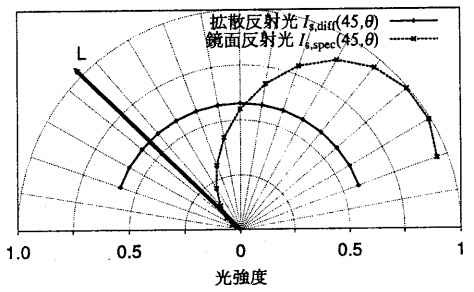


図 10: 海綿状組織における反射光分布

図10から、照射された光の正反射方向への分布は海綿状組織での鏡面反射による効果であることがわかる。

4.3 最小二乗法による未知数の推定

前節までで得られた数値を用いて、式 (13) の未知数 $x_{u,diff}$、$x_{u,spec}$、$x_{s,diff}$、$x_{s,spec}$ を最小二乗法により求める。$\mathbf{X}$ は未知数の行列で

$$\mathbf{X} = (x_{u,diff} \ x_{u,spec} \ x_{s,diff} \ x_{s,spec})^T \quad (15)$$

とする。^{T} は転置行列を表す。

式 (13) を $f(x_{u,diff}, x_{u,spec}, x_{s,diff}, x_{s,spec})$ とすると、$\mathbf{A}$ は f の各未知数による偏微分を要素とする行列で、

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f(45,-70)}{\partial x_{u,diff}} & \cdots & \frac{\partial f(45,70)}{\partial x_{u,diff}} \\ \frac{\partial f(45,-70)}{\partial x_{u,spec}} & \cdots & \frac{\partial f(45,70)}{\partial x_{u,spec}} \\ \frac{\partial f(45,-70)}{\partial x_{s,diff}} & \cdots & \frac{\partial f(45,70)}{\partial x_{s,diff}} \\ \frac{\partial f(45,-70)}{\partial x_{s,spec}} & \cdots & \frac{\partial f(45,70)}{\partial x_{s,spec}} \end{pmatrix}^T \quad (16)$$

となり、ここで式 (13) より、

$$\frac{\partial f(45,\theta)}{x_{u,diff}} = I_{u,diff}(45,\theta) \quad (17)$$

$$\frac{\partial f(45,\theta)}{x_{u,spec}} = I_{u,spec}(45,\theta) \quad (18)$$

$$\frac{\partial f(45,\theta)}{x_{s,diff}} = I_{s,diff}(45,\theta) \quad (19)$$

$$\frac{\partial f(45,\theta)}{x_{s,spec}} = I_{s,spec}(45,\theta) \quad (20)$$

が得られる。

また、バラ花弁の反射光強度の実測値を与える行列 $\mathbf{L}$ は、

$$\mathbf{L} = \Big(I(45,-70) \ \ I(45,-60) \ \cdots \ I(45,70)\Big)^T \quad (21)$$

となり、実験の際、$\mathbf{L}$ に含まれる誤差を補正する行列 $\mathbf{V}$を用いると式 (13) は、

$$\mathbf{L}+\mathbf{V} = \mathbf{AX} \quad (22)$$

となり、

$$\mathbf{V} = \mathbf{AX}-\mathbf{L} \quad (23)$$

が得られる。

既知である $\mathbf{A}$ と $\mathbf{L}$ から、最小二乗法を用いて誤差 $\mathbf{V}$ の二乗が最小になるような未知数 $\mathbf{X}$ を求めると、

$$\mathbf{X} = -(\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{L} \quad (24)$$

$$= (8.319 \ \ 204.7 \ \ 10.32 \ \ 10.38)^T \quad (25)$$

が得られる。この数値を式 (13) に代入して再合成した反射光強度 $I(45,\theta)$ を図11に示す。

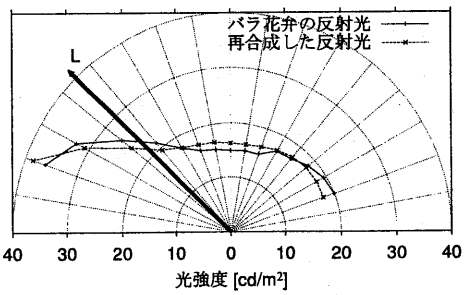


図 11: 反射光分布の実測値と再合成値との比較

図11を見ると、実測した反射光分布と再合成した反射光分布がほぼ一致していることがわかる。このことから、微視的構造を考慮した本モデルを用いることにより、バラ花弁特有の反射光分布をほぼ正確に近似することができる と言える。

5 上皮細胞の物体色の導出

次に、花弁の持つ色を測定し、これを元に上皮細胞の物体色として妥当な色を導く方法について述べる。

5.1 バラ花弁が本来持つ色の測定

実際のバラ花弁が持つ色の特性を調べるため、以下の方法で実験的に測定した (図??)。

D_{65}光源を用いて、バラ花弁に対して入射角45度、距離40 cmの位置から1076 luxの光を照射した。色彩輝度計をバラ花弁の垂直線上、距離50cmの位置に固定し、法線方向への反射光強度を測定した。また、成長過程に伴う色の変動を考慮するため、8分咲きのバラから抜き取った外側、内側、その中間の花弁3枚を測定に用いた。それぞれ花弁のつけ根を中心に、花弁の中央を走る主葉脈を0度としたとき、左右45度の放射線状に5mm間隔で、計56点の色を測定した。測定結果、およびNTSCの色再現範囲を図12に示す。

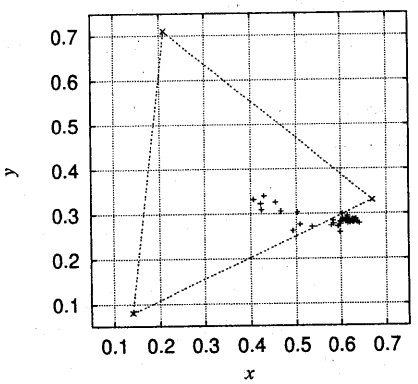


図 12: バラ花弁の xy色度測定結果

図12を見ると、赤の原刺激値 (0.67, 0.33) の周辺に花弁の色が集中していることがわかる。破線で描かれた三角形の領域はNTSCの色再現範囲であるが、測定した色データのうち約18%(10点/56点) しかNTSCの色再現範囲に収まっていない。すなわち、バラ花弁のそのままの色をNTSCで表示することは不可能である。

そこで、バラのCGをNTSCで表示するためには、バラ花弁が持つ本来の色を、人間の視覚では知覚できない範囲で補正し、NTSCの色再現範囲に収める必要がある。

5.2 色相の補正

人間の視覚は、明度や彩度の変化に比べ、色相の変化に鈍感である [3]。そこで、バラ花弁の本来持つ色がNTSCの色再現範囲に収まるよう、色相に一定量の変移を加え、補正する。

測定によって得られる花弁の色 xyY を、人間の色知覚の3属性 (色相 H、明度 V、彩度 C) に基づく均等色空間上で取り扱った。ここでは、xyY から HVC への変換・逆変換に修正マンセル色空間を良好に近似するMTM表色系 [3] を用いた。

修正マンセル色空間において、素人には分からないとされる色相の色差は、±2.5修正マンセルhueと言われている。この範囲で、バラ花弁の色がNTSCの色再現範囲に最もよく収まる色相の変移を求めたところ −2.4修正マンセルhueであった。バラ花弁から測定した色データのうち、色相にこの変移を加え、xy色度図上にプロットした結果を図13に示す。

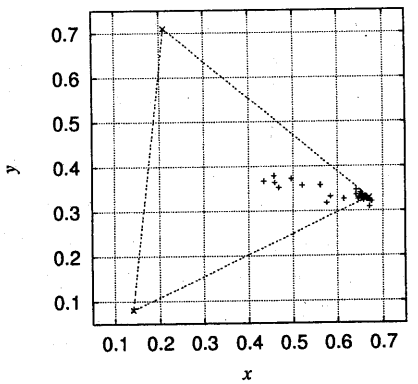


図 13: 色相補正後のバラ花弁の xy色度

色相の補正を行うことによって約84%(47点/56点) の色データがNTSCの色再現範囲に収まるようになった。

色を測定した56点のうち、花弁のつけ根の白っぽい部分を除いた38点について平均の色を求め、これを RGB に変換すると、$R = 51.8$、$G = 1.08$、$B = 0.281$ が得られた。これを上皮細胞の物体色とする。

6 巨視的構造における質感表現

微視的構造の形状モデルとシェーディングモデル、及び、そこから導かれたパラメータ値を元に、微視的構造における光学現象を忠実にシミュレーションする。その計算結果を巨視的構造における質感として表現するための手法として、ここではモンテカルロ法 [1] を用いた。具体的には、微視的構造からランダムにサンプル点を数点抽出し、それらの色の平均を巨視的構造のレンダリングにおける 1 画素分の色とする。これにより、輪郭部分のエイリアシングを除去することができ、花弁の持つラフな質感の度合を表現することが可能になる。

7 CG 生成例

上述の手法により、バラの CG 生成を試みた。

光源は平行光源 1 つで、方向は $\mathbf{L}_1 = (1,1,1)$ (紙面に対して右斜め上の手前方向) で、光強度は 1500 とした。微視的構造からランダムに抽出したサンプル点は 25 点とした。花弁の形状はレーザレンジファインダ[3] によって取得した 3 次元のモデリングデータを用いた。レンダリング手法としてはレイトレーシング法に加え、花弁同士の相互拡散反射光と拡散透過光を考慮するために、ラジオシティ法を用いた。

以下に、バラの写真 (図 14)、従来手法を用いたレンダリング結果 (図 15) と、本手法によるレンダリング結果 (図 16) を示す。右の画像は、左の画像中から花弁 1 枚について拡大し、ハイライトの部分を強調した図である。

図 15 に比べて図 16 は、実際のバラ花弁に表れる質感とよく似た傾向が見られると言える。

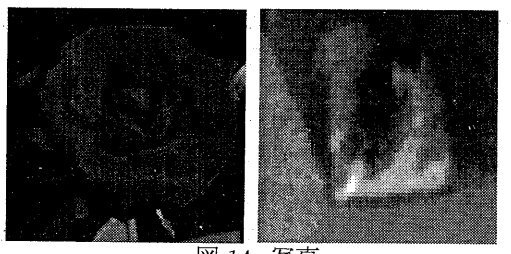


図 14: 写真

[3] ミノルタ株式会社 VIVID 700

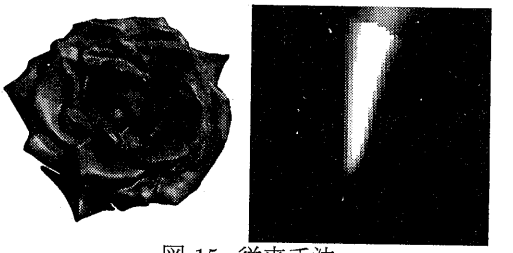


図 15: 従来手法

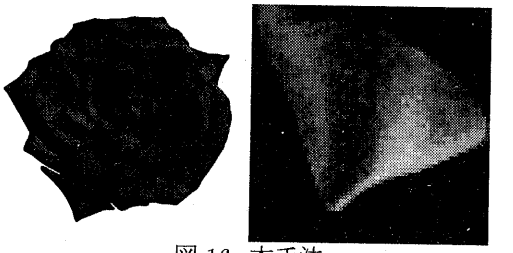


図 16: 本手法

8 まとめ

本研究では、バラ花弁について微視的構造と巨視的構造のモデル化を行うことで、バラのフォトリアルな CG を生成した。特に花弁独特の質感を表現するため、上皮細胞や海綿状組織といった微視的構造の形状モデルとシェーディングモデルを構築した。また、本モデルにおける未知数を最小二乗法により推定し、実際のバラ花弁で測定したデータとほぼ等しい反射光分布を得ることができた。

加えて、そのままでは NTSC で表示できない花弁の色を、人間の視覚では知覚できない範囲で色を補正することによって、バラの CG を NTSC で表示することを可能にした。

今後はバラの巨視的な形状モデルやテクスチャモデルを構築し、最終的にはつぼみの状態から枯れていくまでのバラの成長アニメーションを生成したい。

参考文献

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

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

[3] 甘 青, 小谷 一孔, 宮原 誠, "生理的明度関数による HVC 色空間の均等性の改善", 信学会 93 秋季大会, D-160, pp.162, 1993.