

多層薄膜干渉モデルに基づいた真珠の表現と真珠らしさの評価

土橋 外志正[†] 長田 典子* 眞鍋 佳嗣[†]
宇佐美 照夫* 井口 征士[†]

[†]大阪大学 基礎工学部 システム工学科

*三菱電機(株) 産業システム研究所 センシングシステム開発部

本研究の目的は物理モデルを用いて真珠の表現を行うことである。真珠は生物性の宝石であり、その内部では干渉や多重反射など様々な光学現象が起っている。真珠に見られる干渉の特徴的な点はその色相分布であり、真珠の中心から周囲へと同心円上の変化を成す。我々はこの現象を説明する真珠の多層薄膜干渉モデルを提案し、真珠画像を生成した。さらに心理実験により真珠らしさを尺度化し、生成画像の評価を行った。その結果、生成画像が真珠らしさを表現できていること、真珠らしさは専門家、非専門家に共通な心理尺度であること、光沢、干渉色、なめらかな色相変化が関与していることなど、CGを用いて真珠を表現する上での様々な知見が得られた。

RENDERING OF PEARL IMAGES USING A MULTILAYER INTERFERENCE MODEL AND ESTIMATION OF "LIKENESS TO PEARL"

Toshimasa Dobashi[†] Noriko Nagata* Yoshitsugu Manabe[†]
Teruo Usami* Seiji Inokuchi[†]

[†]Department of Systems Engineering, Faculty of Engineering Science,
Osaka University

*Sensing Systems Department, Industrial Electronics & Systems Laboratory,
Mitsubishi Electric Corporation

The purpose of our research is to generate pearl images using a physics based model. The complicated structures of a pearl cause various optical phenomena such as interferences, diffractions and so on. One of the notable features of the interference seen in a pearl is the peculiar color distribution. We propose a model of multilayer interference of a pearl that explain this phenomenon. Also we construct a psychological scale of "likeness to pearl" and estimate a generated image by psychological experiments.

1 はじめに

現在、石や木などの自然物の質感表現の研究が行われている。自然物の表現にはその構造の持つ不規則性やゆらぎなどを表現することが必要である。その複雑さを表現するためにテクスチャマッピングなど様々な手法が用いられており、近年では物理モデルを用いた表現も行われている。その利点として、物理モデルを用いることでより物理現象に近い表現が行えるということや、物理パラメータを用いて画像を変化させることが出来ることなどがあげられる。本研究の対象である真珠も自然物の一つであり、真珠に見られる干渉現象などは、単なるシェーディング、モデリング技術の組み合わせだけでは表現できない。このような対象固有の性質に深く依存した現象を表現するには、その光学的、構造的現象をシミュレーションすることが必要となる。

光の挙動のシミュレーション例としては、屈折の表現としてガラス^[1]、ダイヤモンド^[2]などの表現があり、多層膜の表現例としては植物の葉や皮膚のシミュレーション^[3]などがある。また光の干渉については、シャボン玉^[4]、薄膜干渉^[5]、パールマイカ塗料の光学現象^[6]のシミュレーション例がある。しかし、これまでに多層薄膜干渉に注目した研究はほとんど行われていない。そこで本研究では、多層薄膜干渉のシミュレーションを行い、CGを用いて真珠を表現することを目的とする^[7]。

また質感表現を行う際には、生成画像を見て感じる印象と実物を見て感じる印象とを近づける必要があるが、どの程度よく質感表現が出来ているかを定量化するのは困難である。本研究では一対比較法による心理実験により真珠らしさを抽出し、生成画像の評価を行った。さらに心理実験の結果をモデルの修正や、パラメータの決定などCG生成の過程に取り入れる^{[8][9]}。

2 真珠について^[10]

真珠はアコヤ貝などによって作られる生物性の宝石であり、少し鈍く柔らかい、いわゆる真珠光沢を持っている。図1に真珠の外観を示す。真珠の構造は直径3～6mm程度の核と、核の周りを包む厚さ300～500 μm の真珠層からなる。真珠層は単結晶ではなく、一層の厚さが300～800nmのアラレ石結晶層と一層の厚さが20nm以下のタンパク質層（コンキオリン層）からなる多結晶集合体

である。これらは真珠の核を同心円状に包み、交互に60～1000層積み重なった層状構造を成している（図2参照）。このような層状の構造等によって、真珠内部では光の屈折、干渉、多重反射、回折など、様々な光学現象が起っていると考えられる。

真珠色の特徴的な色調は、物体色に干渉色が重なって現れているものである。真珠層が厚く積み重なると真珠特有の干渉色が認められ、この干渉現象が、真珠に独特の光沢ある虹色(iridescence)を与える。

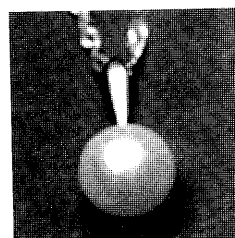


図1 真珠の外観

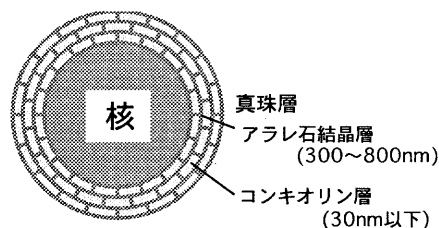


図2 真珠の構造

3 真珠らしさに関する主観評価と尺度化

リアルな真珠の画像を生成するにあたって、「真珠らしさ」とはどういうものかという事を明らかにすることは重要である。もし「真珠らしさ」という尺度が存在しているならば、それらの要素を重点的に表現することによる効果的なCG表現や、真珠らしさと物理量の対応付けを行うことができる。この節では、真珠の専門家と一般の人に対して行った「真珠らしさ」に関する心理実験の結果と、その結果から導かれる考察について述べる。

3.1 専門家の注目する真珠らしさ

真珠の品質検査の際、検査員は真珠のランク付けを非常に再現性高く行う。つまり、真珠の検査員の中では真珠に対するはっきりとした基準が存在すると思われる。しかし、検査員が用いる真珠

の評価用語は「中がメラメラ」や「軽い」といった曖昧な言葉が多く、真珠の検査員は真珠らしさの基準を持っているものの、それらをうまく言葉として表現できていない。

以前、長田らは、検査員たちが用いる真珠の評価用語を分析した¹⁴⁾。その結果、評価用語に内在している深み感、輝き感、きめ感という3つの要素を抽出した。これらの要素はそれぞれ層の均一性、表面の反射性、面の均一性を表していると考えられる。

3.2 非専門家による真珠らしさ

次に、真珠の専門家でない一般の人に対して、真珠らしさに対する心理実験をサーストンの一対比較法¹²⁾を用いて行った。一対比較法とは、一群の対象を2刺激ずつ組にして提示し、どちらが「より好ましい」とか「より美しい」などの判断をすべての可能な組に対して求めるもので、得られた選択比率に基づいて尺度が構成される。

(1) 実験方法

真珠の拡大写真からそれぞれ異なった特徴を含んでいる7枚の部分画像を切り出し、2枚の画像のうち「どちらがより真珠らしいか」の比較をすべての組み合わせ(計21通り)に対して評価してもらった。図3に真珠写真の切り出し位置を示す。実験は理系の大学生を中心に延べ104名に対して、真珠を見せてから心理実験を行った場合と、見せ

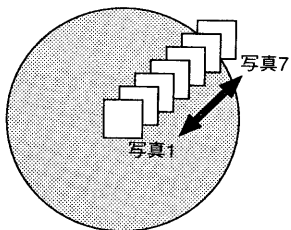


図3 真珠写真の切り出し位置

ずに行った場合の2通り実施した。

(2) 実験結果と考察

心理尺度値を数直線上に配置したものを図4に示す。また実際の真珠を見せてから心理実験を行った場合と、見せずに行った場合の心理尺度値を図5に示す。心理尺度値が大きいくほど、より真珠らしいと感じていることを意味している。

結果をまとめると、

(1)最も真珠らしいとされた画像は写真2で、鏡面反射成分と干渉色の色相変化の両方を含む部分である。続いて干渉色が強く現れているもの(写真4)、鏡面反射成分が強いもの(写真1)を真珠らしいと感じている。

(2)真珠らしい写真群を写真1, 2, 3, 4, 真珠らしくない写真群を写真5, 6, 7という様に分けると、真珠を見せた後で心理実験を行った場合の真珠らしい写真群とそうでない写真群との心理尺度距離は、真珠を見せないときの心理尺度距離よりも大きくなっている。

これらの結果から「真珠らしさ」という心理尺度が存在し、真珠らしさは干渉色と輝き感の要素が重要であることが分かる。これらは真珠の専門家の用いる「照り」や「巻き」という業界用語が示すものに対応すると考えられ、真珠の専門家と一般の人とで、真珠らしさに対する共通の価値観が存在することが分かる。

また心理尺度値は母集団が異なるため、単純に値を比較することはできないが、写真群の分散に対する相対距離を考えると、真珠をよく知ることによって真珠らしさに対する基準がよりはっきりすると考えられる。

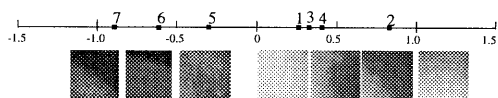
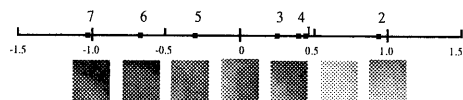
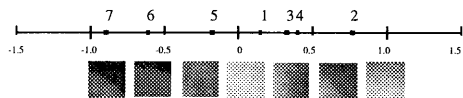


図4 真珠らしさの尺度構成結果 (写真)



見せてから行った場合



見せずに行った場合

図5 真珠らしさの尺度値の比較

4 真珠の多層薄膜干渉モデルと生成アルゴリズム

心理実験の結果より、真珠の質感を表現するには、干渉現象を表現する必要があることがわかる。しかしこれまで、薄膜の多層干渉現象のシミュレーションについてはほとんど行われた例はない。そこで本章では真珠の多層膜干渉の物理モデルと、そのモデルを用いた干渉成分画像生成アルゴリズムについて述べる。

4.1 多層薄膜干渉の物理モデル

一般的な薄膜干渉では、干渉光の色相変化は光源の方向に強く依存する。これは干渉し合う波同士の位相差が物体への光の入射角に依存しているため、光の入射角の増大に伴うスペクトルの短波長側へのシフトは干渉現象の特徴の一つである。実際、アコヤ貝などの貝殻の裏を観察するとこの特徴（光の入射角の増大に伴うスペクトルの短波長シフト）を満たす干渉現象が認められる。ところが真珠に見られる干渉の場合、干渉光の色相は光源方向を変化させてもほとんど変化せず、さらに光が当たっていない場所にも干渉色が認められるという特徴がある。

貝殻の裏側も真珠層と同様な層状構造が形成されていると考えられるので、真珠の特徴的な干渉光の色相変化は真珠の球体という形状に一因があると考えられる。また真珠にレーザー光を入射させると、一点にしか光が入射していないにもかかわらず、その光によって真珠層全体が明るく輝く。これは真珠層全体に光が回り込んでいることを示している。

そこで我々は、真珠層内部での光の多重反射により真珠層に光が一様に分布しており、至る所で局所的な干渉が起っているというモデルを考え、真珠に見られる干渉現象を説明する。ここでは太陽光の空間的、時間的な干渉性を満たす範囲の干渉現象のことを局所的な干渉という。このモデルにより、光源方向要素を考慮する必要がなくなり、さらにすべての方向に干渉が起きている状態を考えることができる。

図6に示されるように、我々のモデルでは各点ですべての方向に干渉光が出射している。その中で視点に到達するレイはただ一本であり、その光の出射角は真珠の中心から外側へと大きくなることがわかる。色相が中心から周辺に向かって

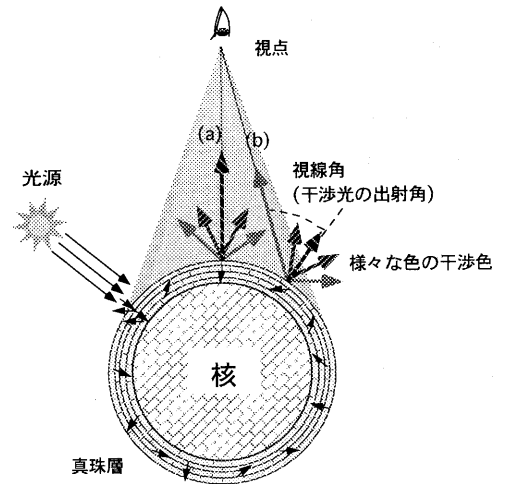


図6 真珠の干渉の概念図

変化する現象は、干渉の原因となる波同士の位相差が視線方向と真珠表面の法線とが成す角度に依存する（図7参照）ということから説明できる。

次に実際の干渉計算について詳しく述べる。

4.2 多層薄膜干渉計算のアルゴリズム

真珠層のモデルとして、図7のようなアラレ石結晶膜層と、アラレ石結晶層と比較して非常に薄いタンパク質の層が交互にL層ずつ平行に重なった多層膜構造を考える。 n_0, n_1, n_2 はそれぞれ空気層、結晶層、タンパク質層の屈折率であり、 d_k は結晶層kの膜厚である。

干渉計算は視点に光が到達するレイに対してのみ行う。まず視点から視線のレイを出射し、真珠

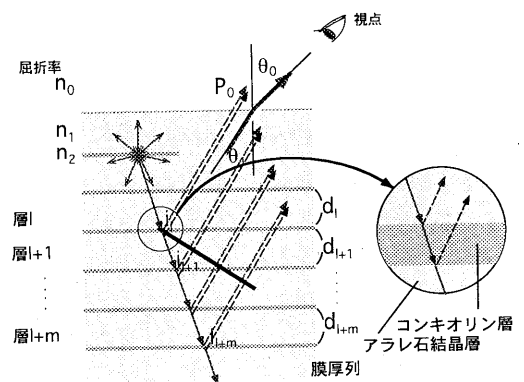


図7 真珠層のモデル

との交差判定を行う。視線が真珠と交差する場合、視線方向と面の法線とが成す角度 θ_0 から角度 θ_i を求め、この方向に反射光を出射するレイを一意に決定する。干渉計算はこのレイが各層の境界（アラレ石結晶層とコンキオリン層、またはコンキオリン層とアラレ石結晶層との境界）において反射する波同士を次々合成することによって行われる。この計算をすべての可視波長域(380～780nm)に対して行い、その結果得られたスペクトルからRGB等色関数を用いてRGB値に変換する。この干渉計算の流れを図8に示す。

干渉の計算には、それぞれの波の振幅と基準となる波との位相差を計算しなくてはならない。波の振幅は振幅反射率、透過率を計算することによって求められる。一般に反射率、透過率は、光線の入射角と物体を構成する材質固有の屈折率によって決定され、この関係はフレネルの式によって表される。光の入射側、出射側の物体の屈折率をそれぞれ n_{in} 、 n_{out} とし、光の入射角、出射角を

それぞれ θ_{in} 、 θ_{out} とすると、p偏光に対する振幅反射率、透過率 r_p 、 t_p 、さらにs偏光に対する振幅反射率、透過率 r_s 、 t_s はそれぞれ次のように表される¹¹⁾。

$$r_p = \frac{n_{out} \cos \theta_{in} - n_{in} \cos \theta_{out}}{n_{out} \cos \theta_{in} + n_{in} \cos \theta_{out}}, \quad t_p = \frac{2n_{in} \cos \theta_{out}}{n_{out} \cos \theta_{in} + n_{in} \cos \theta_{out}} \quad (1)$$

$$r_s = \frac{n_{out} \cos \theta_{out} - n_{in} \cos \theta_{in}}{n_{out} \cos \theta_{out} + n_{in} \cos \theta_{in}}, \quad t_s = \frac{2n_{out} \cos \theta_{out}}{n_{out} \cos \theta_{out} + n_{in} \cos \theta_{in}} \quad (2)$$

さらにエネルギー反射率R、エネルギー透過率Tは、自然光にp偏光とs偏光が半分ずつ含まれていると考えると次のように表される。

$$R = \frac{1}{2}(|r_p|^2 + |r_s|^2) \quad (3)$$

$$T = 1 - R \quad (4)$$

また各波間の位相差は、図7に示される点Pから点線までの光路差を考慮することで求めることができる。層1で反射する波と、層1+kで反射する波との光路差による位相差は、波の波長を λ とする

$$\zeta = 4\pi \sum_{i=1}^k d_i \cdot (n_i/n_0) \cos \theta_i / \lambda \quad (5)$$

である。

これらの値を用いて波の合成計算を行う。干渉計算は表層から始め、層1で反射する波と層1+mで反射する波の光路差が、自然光のコヒーレンス距離に達するまでを1回の干渉として扱う。なお今回コヒーレンス距離は $5\mu\text{m}$ とした。さらに次層から同様に計算を行い、表層までの減衰を考慮しながらスペクトル強度を足し合わせていく。視点に届く干渉光は真珠の表層近くのものほど強いので、表層から深層に向かって干渉計算を行い、強度が閾値以下になった時点で計算を打ち切るものとする。反射は1次反射のみを扱い、2次反射以上は十分小さいものとし考慮しない。

図9に、図6に示される(a)、(b)の干渉光のスペクトル強度分布の例を示す。自然光(白色)のフラットなスペクトルの形状が、干渉により変化していること、視線方向によって異なるスペクトル形状に変化することが分かる。また図10に干渉光成分の画像例を示す。真珠の干渉光の中で最も美しいとされる青系の虹色の干渉色が観察される。

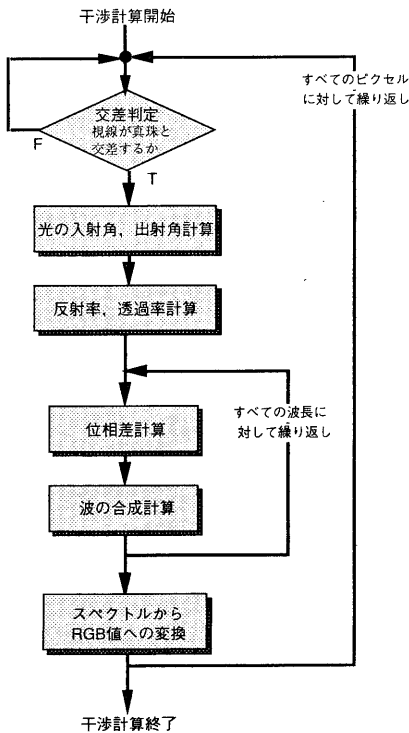
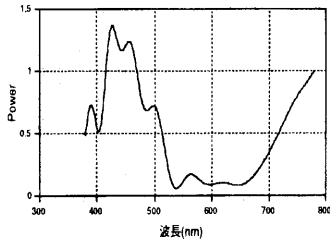
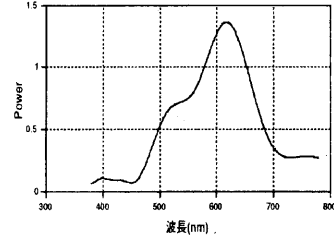


図8 干渉計算の流れ



(a)



(b)

図9 ある2点における干渉光のパワースペクトル例

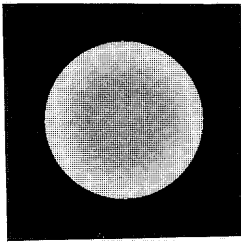


図10 干渉光成分画像

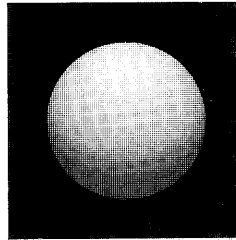


図11 物体色成分画像

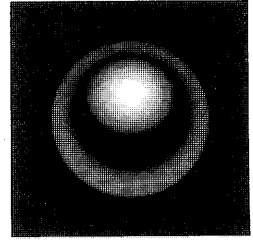


図12 ハイライト・映り込み成分画像

4.3 自然物の不均一性の導入

2章でも述べたように真珠は自然物であるため、その構造には不均一性が伴う。真珠の成長は水温の変化などと関係があり、季節的な変動がある。夏の成長は膜厚、膜数ともに大きいけど透明度は低く、秋から冬にかけて500nm以下の薄くそろった、透明度の高い結晶層膜が作られる。そのため、真珠の浜上げは12月頃行われる^[10]。

膜厚生成計算には、このような層の成長の不均一性をモデルに組み込んだ。真珠膜厚列 d_k の生成方法として、結晶層膜の膜厚および1日あたりの膜数の1年における変化を、それぞれ正規分布の確率密度関数で表し、各膜に一樣乱数を用いて膜厚に変動を与えた。このような自然物の不均一性を導入することで、より自然な真珠の表現ができると思われる。

5 真珠画像の生成と表示例

真珠画像は干渉光成分画像(図10)、物体色成分画像(図11)、映り込み・ハイライト成分画像(図12)を合成して生成する。

3章で明らかになった真珠らしさを利用して真珠を効果的に表現し、真珠らしさと画像の生成アルゴリズムを対応づけてみる。これにより人間の

感覚に近い形で、様々な真珠画像の生成が行えると思われる。

5.1 干渉光による深み感の表現

深み感は、専門家へのアンケートで得られた「巻きが厚い」、「色味が強い」等の表現に対応するもので、干渉色の強さと深い関係があると思われる。そこで拡散光である真珠の物体色成分画像(図11)と、干渉色成分画像(図10)との混合比を変えることによって真珠の深み感を表現した。

5.2 ハイライト・映り込みによる輝き感の表現

真珠を観察すると、照明や周囲の背景が表面に映り込んでいるのがわかる。専門家による真珠の評定用語にも「自分の顔がよく映る」という言葉があり、映り込みは真珠の輝き感を表現するには非常に重要である。

輝き感はハイライトと周囲の映り込みを計算することによって表現する。ハイライトはシェーディングモデルの一つである Torrance-Sparrow model を用い、表面の微小鏡面の分布を変化させることで輝き感を変化させる。また周囲の映り込みとして、真珠が置かれている面を映り込ませる。図12にハイライト・映り込み成分の画像を示す。

5.3 テクスチャによるきめ感の表現

テクスチャとは画像中の構成要素が表す形状、分布密度、方向などの特徴をいう。

真珠の表面を拡大すると図13に示すような、不規則な模様が観察される。この図にみられる縞模様は真珠の成長の際に出来るもので、結晶層が階段状に積み重なってできたものである。「ざらざら」、「めらめら」と表現される独特のテクスチャはこのような表面形状や真珠内部の結晶の配向むらなどによって起っていると考えられる。

真珠のテクスチャを簡易的に生成するため、実際の真珠の画像から二次元FFT/逆FFTによって生成した高周波成分のテクスチャを真珠表面にマッピングする。その際、直感的な理解を助けパラメータ設定を容易にするために、画像のRGB値をMunsell表色系(HVC空間)に変換し、色相(H)、明度(V)、彩度(C)それぞれのテクスチャを扱うこととした。

まず3章で用いた真珠の部分写真のRGB画像(64*64)をHVC画像に変換する。それぞれの画像に対してハニング窓関数をかけた後、二次元FFTによりパワースペクトルを求める。バンドパスフィルタ処理を施し、逆FFTを行うことによって、HVC空間のテクスチャ画像が得られる。図14にテクスチャの例として、明度(V)テクスチャ(濃度スケールを拡大したもの)を示す。

それぞれの成分画像を合成して生成された画像に対して、テクスチャをマッピングする。テクスチャマッピングを行うために画像を一度HVC画像に変換し、あらかじめ用意したHVCそれぞれのテクスチャを適当な重み値によりマッピングし、RGB値に変換して表示する。

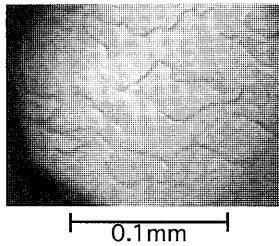


図13 真珠表面の拡大写真

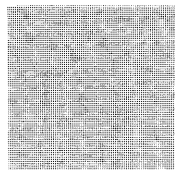


図14 テクスチャの例
(明度)

5.4 表示例

本手法による表示例を図15に示す。光源方向は視線方向と45度の角度を成しているものとして計算した。干渉光は光源方向と独立に計算されているが、真珠の干渉現象が再現されている。またテクスチャを施すことにより、表面のきめ感が表現されている。以上の表示例から本方法が真珠の光学現象のシミュレーションに有効であることが確認された。

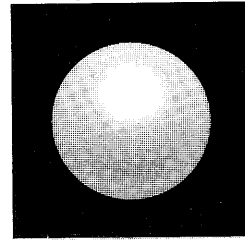


図15 表示例

6 生成画像に対する主観評価

生成画像がうまく真珠らしさを表現できているかを評価するために、生成画像に対しても心理実験を行った。

6.1 実験方法

以上のように生成した画像を、3章と同じ心理評価の方法を用いて「真珠らしさ」の尺度で評価し、実際の真珠の写真で行った場合の結果と比較する。対象は理系学生を中心とした50人である。

6.2 実験結果と考察

一対比較法による心理尺度値の結果を図16に示す。順序について写真の場合と比べると、画像4のみが順序を下げているだけで、残りの順序に変

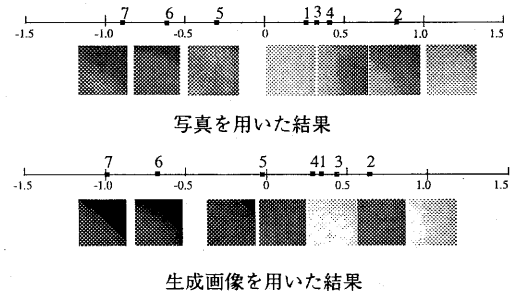


図16 真珠らしさの尺度構成結果
(写真・生成画像)

化はない。全体的な傾向としては、生成画像は本物の各特徴をよく捉えているといえる。画像4が順位を下げているのは、画像3と画像1が、色相の変化をなめらかに表現していたため、相対的に真珠らしさの評価が下がったためと考えられる。また画像5の評価が上がっているのは、写真よりなめらかな色相変化をなしているからと考えられる。

以上のことから、生成画像は全体としてだけでなく、部分的な真珠らしさも表現していることが確認できた。また真珠らしさには、なめらかさ、とりわけ色相変化のなめらかさが関与していると考えられる。

7 むすび

本研究では物理モデルに基づく真珠の表現について提案し、実際の真珠観察によって得られた光源方向に依存しない真珠固有の色相分布を、視点へ届く光だけに注目した多層膜干渉の物理モデルにより表現した。さらに心理実験に基づいて干渉、映り込み、テクスチャの3つの主要な要因を選択し、真珠を効果的に表現した。

また「真珠らしさ」という心理尺度により、実物の写真と本手法による生成画像のそれぞれの評価を行った。その結果、生成画像は全体像のみでなく、部分的にも真珠らしさを表現できていることが確認できた。さらに「真珠らしさ」は専門家だけでなく非専門家にとっても共通な心理尺度であり、光沢、干渉色、なめらかな色相変化が関与しているなど、CGを用いて真珠を表現する上での様々な知見が得られた。

今回生成した画像を、真珠の専門家に評価してもらった際に、輝き感が足りないという指摘があった。今後は物理モデルを用いた真珠の輝き感の表現のために、真珠内での光の挙動のモデル化、シミュレーションを行う予定である。さらに混合比率のパラメータなど、今回は経験的に設定したものに対する基準の導入を検討したい。

参考文献

- [1]安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎, 鶴岡信治, 三宅宏康: “透明物体表示のための改良光線追跡法”, 情報処理学会論文誌, Vol.25, No.6, pp.953-959 (1984)
- [2]井上一夫: “ダイヤモンドの特性の可視化と輝きの定量化について”, 情処研報, GC51-3, pp.1-8 (1991)
- [3]Pat Hanrahan, Wolfgang Krueger: “Refraction from Layered Surface due to Subsurface Scattering”, SIGGRAPH '93 Computer Graphics Proceeding, Annual Conference Series, pp.165-182(1993)
- [4]安田孝美: “光線追跡法干渉色表現”, PIXEL, No.115, pp.150-153 (1993)
- [5]鈴木郁子, 二上範之, 新開謙三: “拡張光線追跡法による光伝播解析”, 情報処理学会グラフィクスとCADシンポジウム論文集, pp.87-93 (1995)
- [6]Gondek, Jay S., Meyer, Gary W. and Newman, Jonathan G.: “Wavelength Dependent Reflectance Functions”, SIGGRAPH '94 Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pp.213-220 (1994)
- [7]土橋外志正, 長田典子, 真鍋佳嗣, 宇佐美照夫, 井口征士: “CGを用いた真珠の表現(1) - 多層薄膜干渉の物理モデルとCG表現 -”, 信学会春季大会, 7-422 (1996)
- [8]山田剛士, 長田典子, 真鍋佳嗣, 宇佐美照夫, 井口征士: “CGを用いた真珠の表現(2) - 真珠らしさの心理実験と真珠テクスチャの表現”, 信学会春季大会, 7-423(1996)
- [9]長田典子, 宇佐美照夫, 真鍋佳嗣, 井口征士: “品質評価のためのビジュアルシミュレーションによる真珠の表現”, 信学論(D-II), (1996-11 掲載予定)
- [10]和田浩蔵: 真珠, 全国宝石学協会(1982)
- [11]長田典子, 亀井光仁, 赤根正樹, 中嶋紘之: “感性計測技術に基づく真珠品質評価システムの開発”, 電学論C, vol.112, no.2, pp.111-116 (1992)
- [12]原島博著, 井口征士編: “感性情報処理”, オーム社, 1994