

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

長田 典子[†] 宇佐美照夫[†] 眞鍋 佳嗣^{††} 井口 征士^{††}

Modeling and Rendering of Pearl for Quality Evaluation with Visual Simulation

Noriko NAGATA[†], Teruo USAMI[†], Yoshitsugu MANABE^{††}, and Seiji INOKUCHI^{††}

あらまし 生産工程における検査・計測システムの構築にあたって、CGやVRによるビジュアルシミュレーション技術がAnalysis by Synthesisの手法として注目されている。本論文では、真珠品質評価シミュレータの中核技術となる、物理モデルに基づいた真珠の生成アルゴリズムを提案する。真珠は、光源方向に依存しない、極めて特徴的な光学現象を示す。これを説明するため、球体における多重反射を考慮した多層薄膜干渉の物理モデルを提案する。また生成アルゴリズムは、心理実験で得られた真珠の主要な評価要因である深み感、輝き感、きめ感の三つに対応させた、干渉、映り込み、テクスチャの物理的特徴の表現から構成した。更に「真珠らしさ」という心理尺度により、実物の写真と本方法による生成画像の各部分を評価し、生成画像が全体像だけでなく、部分的にも真珠らしさを表現できていることを示した。

キーワード CG, 検査, 品質評価, 物理モデル, 多層薄膜干渉, テクスチャマッピング, 心理評価, 真珠

1. ま え が き

コンピュータグラフィックス(CG)やバーチャルリアリティ(VR)によるビジュアルシミュレーション技術が、最近、生産工程における検査・計測システムの構築にも利用されるようになった[1], [2]。これは、検査対象のシミュレーションによって最適な検査条件や検査基準を求めるもので、一種のAnalysis by Synthesis手法と言える。検査システムの高度化、高精度化のニーズに対応していく上で重要な技術になると考えられる。

筆者らは真珠の品質評価システムの開発にあたって、これまでに各種のアナリシス的なアプローチを行ってきた[3]~[5]。今回は、シンセシス的なアプローチとして、仮想の真珠サンプルを生成するビジュアルシミュレータを検討する。

宝飾品として広く知られる真珠(図1参照)は、光学的、構造的にも多くの興味深い特徴を有している[6]。その独特の色と輝きは、結晶層による屈折、干渉、回折、多重反射などの光の振舞いによる。これま

でに光の挙動のシミュレーションとして、屈折についてはガラス[7]、ダイヤモンド[8]、更には異方性物質[9]などの例がある。干渉についても、しゃぼん玉[10]、薄膜干渉[11]、あるいはパールマイカ塗料の光学現象を扱った研究[12]などがある。しかし、真珠を表現するには、真珠層の多層薄膜干渉を表現する必要があるが、多層薄膜干渉に注目した研究はほとんど行われていなかった。

また、真珠は生物性宝石(Organic gemstone)と言われるように自然物の一種である。自然物の表現については、雲[13]、樹木[14]、果実[15]をはじめ多数の研究がなされている。これらの表現法に共通するのは、対象に強く依存した特徴や機能、例えば動きの要素、成長の要素、揺らぎ・質感の要素などをうまく取り入れた物理モデルを用いていることである。加えて、表示の目的に応じて、写実性を追求するだけでなく、計算速度や操作性を考慮したアルゴリズムを採用している。

本研究の最終目標は、種々の仮想サンプルを提示して検査員の判定結果を収集解析し、検査基準を明確化していくことである。真珠の品質評価は熟練した勘と経験に依存したあいまい、微妙なものである。従って、仮想サンプルの写実精度が検査精度に反映するため、十分な写実性が求められる。それと同時に、検査員の直感的判断(心理的な要因)と物理的な要因との対応付けが容易であることが重要となる。

[†] 三菱電機株式会社産業システム研究所, 尼崎市
Industrial Electronics & Systems Laboratory, Mitsubishi Electric Corporation, Amagasaki-shi, 661 Japan

^{††} 大阪大学基礎工学部システム工学科, 豊中市
Faculty of Engineering Science, Osaka University, Toyonaka-shi, 560 Japan

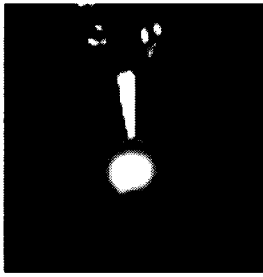


図1 真珠の外観
Fig. 1 Appearance of pearl.

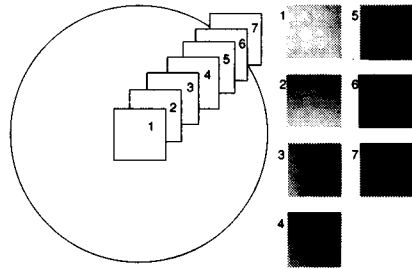


図2 部分写真と切出し位置
Fig. 2 Subregions of a picture of a pearl and their locations.

表1 真珠らしさの尺度距離行列
Table 1 Scale distance matrix on "suchness as pearl."

	1	2	3	4	5	6	7	θ	v
1	0.000	-0.739	0.643	-0.050	0.305	0.706	1.080	1.945	0.278
2	0.739	0.000	0.583	0.498	1.227	1.282	1.341	5.670	0.810
3	-0.643	-0.583	0.000	0.385	0.806	1.175	1.126	2.266	0.324
4	0.050	-0.498	-0.385	0.000	1.080	1.405	1.282	2.934	0.419
5	-0.305	-1.227	-0.806	-1.080	0.000	0.706	0.553	-2.159	-0.308
6	-0.706	-1.282	-1.175	-1.405	-0.706	0.000	0.915	-4.359	-0.623
7	-1.080	-1.341	-1.126	-1.282	-0.553	-0.915	0.000	-6.297	-0.900

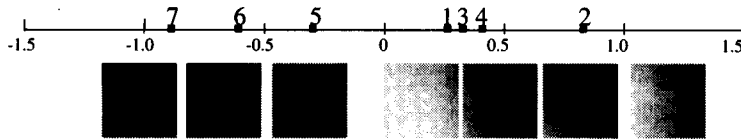


図3 真珠らしさの尺度構成結果—写真—
Fig. 3 A psychological scale of "suchness as pearl" - photograph -.

本論文では、上記の目的のためのシミュレータの中核技術となる、物理モデルに基づいた真珠の生成アルゴリズムを提案する。真珠の干渉現象は光源方向に依存しない、極めて特徴的な色相分布を示す。これを説明するために、球体における多層薄膜干渉の物理モデルを提案する。また真珠の品質評価における心理的要因は、深み感、輝き感、きめ感の3要素であることが、筆者らの心理実験[3]からわかっている。そこで画像生成アルゴリズムを、3要素に対応した干渉成分、映り込み成分、テクスチャ成分の三つの物理的特徴から構成する。更に画像生成の過程において、「真珠らしさ」という心理尺度を、真珠の写真の各部分領域から構成する。そしてこれらを、生成画像の各領域の真珠らしさと対応させて、生成画像を評価する。

2. 真珠らしさの主観評価1—写真—

真珠の画像を生成するにあたり「真珠らしさ」とはどのようなものを把握するために、一般人（非検査

員）を対象にして、サーストンの一対比較法[16]を用い、真珠らしさの心理尺度を構成する実験を行った。

2.1 実験方法

真珠の拡大写真から、図2に示すように各々異なる特徴をもつ七つの部分写真を切り出す。そして任意の二つを組み合わせた計21通りの評価サンプルを作る。理系学生を中心のべ104名に対して「どちらが真珠らしいか」を評価してもらった。比較のため、実物の真珠を見せながら評価してもら場合と、見せずに評価してもら場合との2通りについて実施した。

2.2 実験結果と考察

一対比較法による尺度距離行列および心理尺度値を表1および図3に示す。写真1から7は、真珠の中心から外側に向けて順に番号を付けたものである。また参考データとして、実物の真珠を見せた場合と見せない場合、および男性と女性で分けて求めた場合の心理尺度値を、それぞれ図4(a)(b)(c)(d)に示す。

実験により以下の結果が得られた。

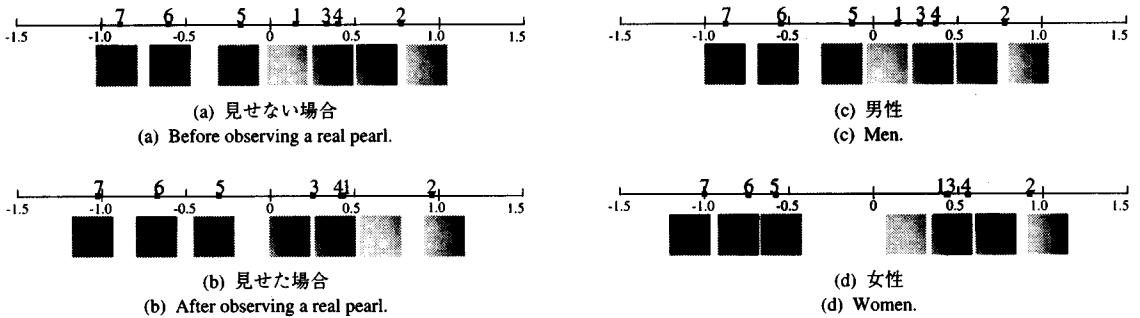


図4 真珠らしさの尺度値の比較
Fig. 4 Comparison of psychological scales.

(1) 全体の結果では、鏡面反射部分と、高彩度で色相変化の大きい干渉色の部分の双方を含む写真(写真2)を、最も真珠らしいと判断している。続いて干渉色部分のみの写真(写真4)、鏡面反射部分のみの写真(写真1)を、真珠らしく感じている。一方で、輪郭を含む写真(写真5,6,7)については、いずれも真珠らしさの評価が低い。

(2) 真珠を見せた場合は見せない場合に比べて、真珠らしい写真群(写真1,2,3,4)とそうでない写真群(5,6,7)の間の心理尺度距離が、写真群内の分散に比較して増大している。同様に男女別の結果からも、一般に真珠に親しいといわれる女性の方が、男性に比べて心理尺度距離が広がっている。これらは母集団が等しくないため、単純な心理尺度値の比較はできないが、分散に対する相対的距離をとらえると、真珠らしさの基準がはっきりしたと考えられる。

以上の結果から、非専門家にも「真珠らしさ」という共通の心理尺度が存在することがわかった。真珠らしさは鏡面反射部分と干渉色部分の両方の要素によって引き起こされている。これは専門家が用いる「照り」「巻き」という業界用語が示す真珠固有の光沢と干渉色に対応していると思われ、専門家の評価と共通点が見られる。一方、球の輪郭部分つまり形状要素が真珠らしさに与える影響は少ないことがわかった。

3. 真珠の干渉現象のモデリング

前章でも確認されたとおり、真珠らしさは、真珠層の干渉や光沢によるものである。ここでは、真珠表現の基本となる、多層薄膜干渉の物理モデルと干渉光計算アルゴリズムについて述べる。

3.1 多層薄膜干渉の物理モデル

真珠は直径3~6 mm程度の核と、核の周りを囲む厚

さ30~500 μ mの真珠層からなる。真珠層は膜厚が可視光の波長オーダー(300~800 nm)のアラレ石の結晶層と20 nm以下の極めて薄い結晶層間気質(蛋白質層)とが、交互に同心円層状に60~1000層積み重なって形成される。透明度の高い結晶層が均一に積層すると、干渉や多重反射などによる独特の光沢ある虹色(iridescence)が現れる[6]。この現象は屈折率の異なる2種類の光学的薄膜による多層薄膜干渉とみなされる[17]。

真珠の干渉現象でとりわけ特徴的なのは、干渉色の色相分布である。真珠の干渉色は、光源と反対側の光が当たらない面にも現れ、かつ、常に球の中心から同心円状に変化する。すなわち干渉色は、視線方向にのみ依存し、光源方向には依存しない。

一般の薄膜干渉では、干渉光の色相変化は光源の方向に強く依存する。これは干渉しあう波同士の位相差が光の入射角に依存するからである。この現象は、狭帯域フィルタや多層薄膜コーティングなどの多層薄膜の透過光/反射光スペクトルが、入射角を大きくすると短波長側にシフトすることで知られている。実際に光源に向けた狭帯域フィルタを徐々に傾けていくと、光が緑→青→紫→赤→…と変化していくのが容易に観察できる。ところで、真珠の母貝であるアコヤ貝の貝殻内側にも、真珠と同様の真珠層が平面状に形成されるが、この場合は、視点または光源を移動すれば色相が変化する。つまり色相は入射角すなわち光源方向によって変化する。このことから、真珠の干渉色の色相分布は、形状(球体)により引き起こされた光学特徴と考えることができる。

この現象をシミュレートするために、図5に示すような、真珠層における光の多重反射を考慮した、多層薄膜干渉の物理モデルを提案する。光源から真珠表面部に達した光の一部は真珠内部に入り込み、層内で反

射と屈折を繰り返して核の裏側まで伝搬し、真珠層全体に分布する。その結果、層内の各点では、あたかも点光源のごとく、あらゆる方向へ光が出ている状態になる。そして各光は図6のような局所的な干渉を起こす。すなわち極めて短い自然光のコヒーレンス距離内において、各層の境界面で反射した波同士が干渉する。ここで、反射波の位相差は、反射波と真珠層との成す角によって決まるから、干渉光のスペクトル強度は屈折角のみに依存する。干渉は真珠層のいたるところで起こっているため、各干渉光は真珠外部のあらゆる方向へ伝わっている。今、全干渉光のうち、視点方向へ伝わる波（図中(a)(b)）だけに注目すると、ある同心円上の各点からの光は、同じ屈折角で伝わってくる干渉光なので位相差すなわちスペクトル分布が等しい。このように考えると、干渉光の色相が光源方向に依存せず、同心円状に変化する現象が説明できる。

3.2 干渉光計算アルゴリズム

モデルに基づき干渉光のスペクトル強度を計算する。図6に真珠層の構造と干渉の様子を示す。厚さ d_l の結晶層膜と十分に薄い蛋白質層とが交互に L 層ずつ平行に重なった多層構造を考える。 n_0, n_1, n_2 はそれぞれ空気層、結晶層、蛋白質層の屈折率である。

また図7に干渉光計算のフローを示す。まず図7に沿って、アルゴリズムの大まかな流れを説明する。はじめに結晶層膜厚列の生成を行う。続いて視点からレ

イを放ち、真珠との交差計算をする。交差するものについて、入射角・反射率・透過率の計算をしたのち、干渉計算を真珠層の表層から深層へ向かってすべての可視波長域に対して行い、スペクトル強度を求める。

以下、各計算について説明する。

3.2.1 結晶層膜厚列の生成

前述のように真珠は自然物であり、その構造には不均一性が伴う。真珠の成長は季節的に変動し、夏は膜厚、膜数ともに大きいが透明度は低く、秋から冬にかけて500 nm以下の薄くそろった透明度の高い結晶層膜がつくられる。そのため真珠の浜上げは12月ごろに行われる[18]。従ってこうした成長過程を考慮した膜厚の生成方法を導入することで自然な真珠の表現が可能になると考えられる。

結晶層膜厚列 d_l の生成方法として、1層当りの膜厚(400 nm~700 nm) および1日当りの膜数(1~3)を

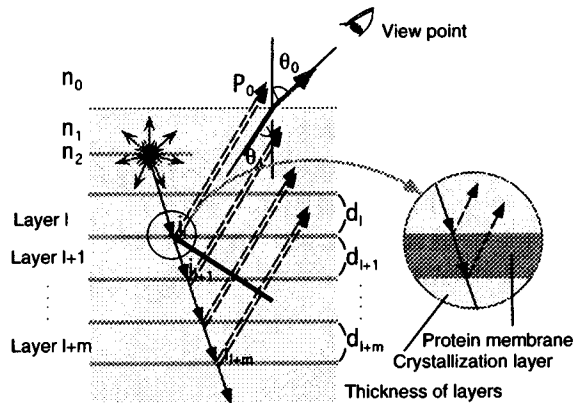


図6 真珠層における光の干渉
Fig. 6 Interference of incident light in nacreous layer.

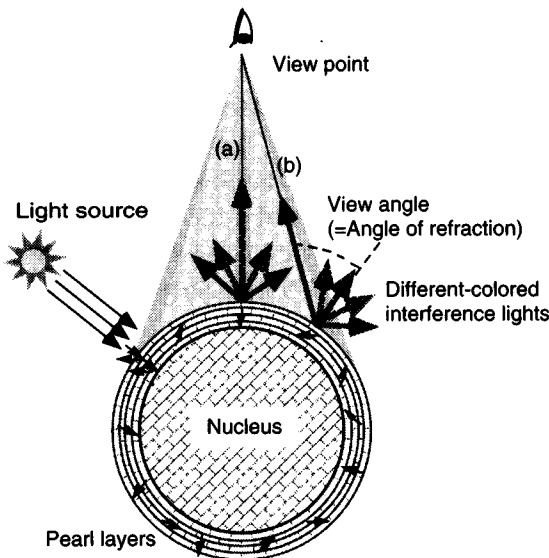


図5 真珠層における多層薄膜干渉の物理モデル
Fig. 5 Physics model of multilayer thin films of pearl.

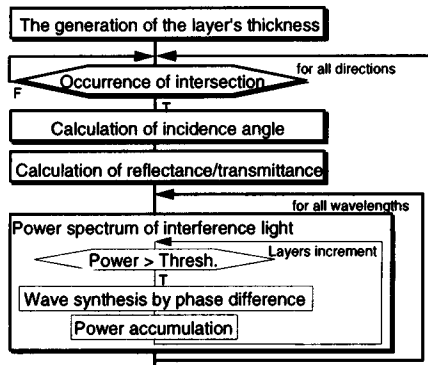


図7 干渉光計算の流れ
Fig. 7 Flow-chart for the simulation of interference light.

正規分布の確率密度関数でそれぞれ表し、更に一様乱数を用いて膜厚並びに膜数に変動を与えた。関数の各パラメータは真珠層の成長曲線[18]をもとに決定した。なお、蛋白質層の膜厚は定数20 nmを用いる。

3.2.2 入射角の算出

干渉光の計算は、視点に到達する光に対してのみ行う。すなわち次のように考える。真珠表面の点 P_0 から視点に到達する光は、まず層内のある光が第 l 層～第 $l+m$ 層で反射しコヒーレントな光 $i_l \sim i_{l+m}$ となって互いに干渉し、次に屈折率 n_1 の真珠層から屈折率 n_0 の空气中に角度 θ_1 で入射し（直感的には出射であるが、光の進行方向に従って計算を行う都合上、入射と表現する）、角度 θ_0 で屈折した光である。従って視点と点 P_0 の位置関係から、視角つまり屈折角 θ_0 が一意に決定し、スネルの法則から入射角 θ_1 が求められる。

3.2.3 反射率・透過率計算

反射率と透過率は本来、物体の屈折率と光の入射角とで決定される量であり、フレネルの公式によって導かれる[7]。二つの物体の屈折率の差が大きいほど、反射率は入射角によって変化する。本問題の場合、考慮すべき反射率は結晶膜層・空気層間と結晶膜層・蛋白質層間の二つの場合がある。

まず、結晶膜層から空気層へ光が入射するときのエネルギー反射率 R_1 （以後単に反射率と記す）、およびエネルギー透過率 T_1 （以後単に透過率と記す）は、フレネルの公式から次式で求められる。

$$R_1 = \frac{1}{2} (|r_1^p|^2 + |r_1^s|^2) \quad (1)$$

$$T_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{n_1 \cos \theta_0}{n_0 \cos \theta_1} |t_1^p|^2 + \frac{n_0 \cos \theta_0}{n_1 \cos \theta_1} |t_1^s|^2 \right) \quad (2)$$

$$= 1 - R_1$$

但し

$$r_1^p = \frac{n_1 \cos \theta_0 - n_0 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_0 + n_0 \cos \theta_1}, \quad r_1^s = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_0 \cos \theta_0}{n_1 \cos \theta_1 + n_0 \cos \theta_0}$$

$$t_1^p = \frac{2n_1 \cos \theta_0}{n_1 \cos \theta_0 + n_0 \cos \theta_1}, \quad t_1^s = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_0 \cos \theta_0}$$

$r_1^p, r_1^s, t_1^p, t_1^s$ はそれぞれp偏光, s偏光に対する振幅反射率, 振幅透過率である。自然光では両偏光が半分ずつ含まれるものとして R_1, T_1 が与えられる。図8に視角に対する入射角 θ_1 と反射率 R_1 の関係を示す。視角とともに反射率も大きくなっており、真珠の周辺部へいくほど干渉色の透過率すなわち強度が小さくなる様子を

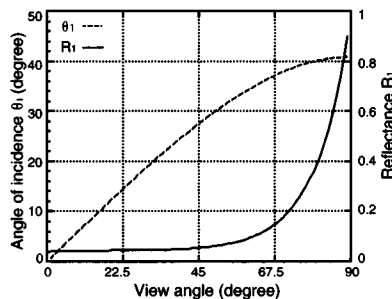


図8 視角に対する入射角と反射率の関係
Fig. 8 Angle of incidence and reflectance by view angle.

表している。ここで屈折率 n_1 はアラレ石結晶のC軸の屈折率1.53を用い、屈折率 n_0 は1.0として計算した。

次に、結晶膜層・蛋白質層間の反射率 R_2 ・透過率 T_2 についても、同様に計算を行う。蛋白質層の屈折率 n_2 は明らかではないが、1.43として計算した。この根拠は、多重反射は蛋白質層ではなくアラレ石の結晶層で起こっていると考えるのが妥当であるから n_2 は n_1 より小さいこと、また層が薄い(60~100層)場合に中の核が見えることから、かなり透過率が高い、言い換えれば n_2 は n_1 とあまり差がないことが挙げられる。

3.2.4 スペクトル強度計算

3.2.2で求めた入射角で表層から深層に透過する光を考え、その反射波同士の位相差と合成計算を行う。

第 l 層での反射光と第 $l+k$ 層での反射光との光路差による位相差は、波長 λ について

$$\xi = 4\pi \sum_{i=l+1}^k d_i (n_1/n_0) \cos \theta_1 / \lambda \quad (3)$$

である。式(3)および3.2.3で得られた反射率・透過率を用いて波の合成計算を行う。なお蛋白質層をはさんだ上下における反射波同士の合成計算も同様に行う。計算手順としては、まず蛋白質層上下の合成波を求めておき、その後合成波同士を式(3)を用いて更に合成している。これらの計算を可視波長帯(380~780 nm)について1波長ごとに行う。

この干渉計算は第1層から始め、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。コヒーレンス距離は $5\mu\text{m}$ とした。更に次層からも、光の強度が閾値を満たさなくなるまで、同様の計算によりスペクトル強度を求め、足し合わせていく手順を続ける。終了条件の光強度のしきい値は0.05とする。

図9に、ある2点における干渉光スペクトル強度の

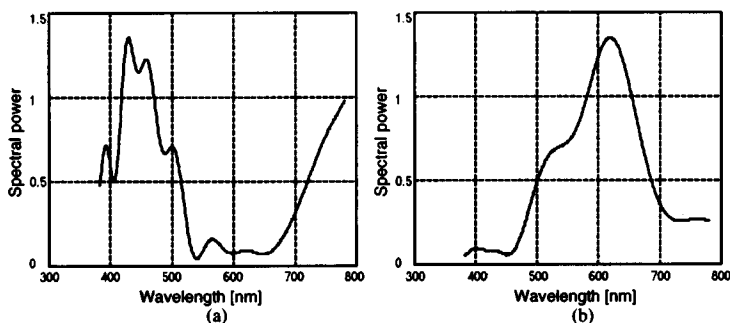


図9 干渉光のスペクトル強度例
Fig. 9 Spectral power distribution of an interference light.

例を示す。自然光（白色）のフラットなスペクトル分布が、干渉により変化している様子を示している。また、これらは図5における(a) (b)の視線方向に対応しており、視角によって異なるスペクトル分布が得られることがわかる。

4. 真珠画像の生成

得られた干渉光スペクトルをRGB画像に変換する。そしてシェーディングモデルを用いて計算した鏡面反射成分、拡散反射成分と合成することで、真珠の画像が生成される。特に真珠の品質を表現することを考え、真珠評価における三つの心理的要因、深み感（層の均一性）、輝き感（表面の反射性）、きめ感（面の均一性）を重点的に表現する。

4.1 干渉光による深み感の表現

深み感は、検査員へのアンケートで得られた「巻きが厚い」「色みが強い」などの表現に対応するもので、主に干渉色の強さと関係すると考えられる。深み感を変化させるためのパラメータとして、膜厚（膜数）以外に拡散反射が考えられる。すなわち、前節では真珠層を理想的な薄膜として計算したが、実際は

$$T_i + R_i + D_i = 1 \quad (4)$$

なる拡散反射係数 D_i が存在する。これは一般のレンダリングモデルにおける拡散係数とみなされる。従って、拡散反射光を真珠の物体色を用いて計算し、干渉光との混合比率を変化させることによって、深み感を表現する。図10に干渉光成分の画像例を示す。真珠の干渉色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。また図11に拡散反射光成分の画像を示す。

4.2 映り込みによる輝き感の表現

真珠を観察すると、周囲の背景や照明が、真珠表面に非常によく映り込んでいるのが見える。検査員への

インタビューでも「自分の顔がよく映る」という評定用語がある。また、映り込みは透明物体の質感に重要な役割を果たす[7]ことも知られており、輝き感を表現する有効な方法と期待される。

真珠の表面性状による映り込みの違いを表現するため、まず光源に対してはTorrance-Sparrow model[19]を用いた。表面の微小面分布や減衰係数のパラメータを変化させ、表面性状を表現した。また周辺物の映り込みにはレイトレーシングの手法を用い、真珠表面と物体までの距離による光の減衰効果も与えた。図12に光源とテーブルが映り込んだ画像の例を示す。

4.3 テクスチャによるきめ感の表現

真珠の表面には、ざらざら、めらめらと表現される独特のテクスチャが観察される。これは、結晶層が階段状に積み重なってできた真珠表面の不規則な縞模様や、真珠内部の結晶の配向むらなどによって起こる。

こうしたテクスチャの簡易的な生成法として、実物の真珠の写真から2次元FFT/逆FFTにより抽出した高周波成分を真珠表面にマッピングした。但し直感的理解を助けパラメータ設定を容易にするため、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)の各テクスチャを扱った。

2.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。各画像に対しハニング窓関数をかけた後、2次元FFTによりパワースペクトルを求め、帯域フィルタ処理後、逆FFTを行い、HVC空間のテクスチャ画像を得た。図13に明度(V)テクスチャの例（濃度スケールを拡大したもの）を示す。

4.4 生成例

生成された各成分画像を合成する。テクスチャをマッピングするため、光強度をいったんHVC画像に変換し、あらかじめ用意したHVCの各テクスチャを適切



図10 干渉光成分
Fig. 10 An Interference image.

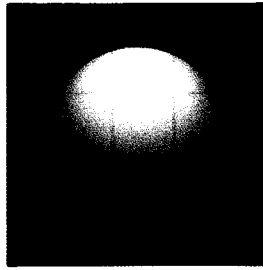


図11 拡散光成分
Fig. 11 A diffuse image.

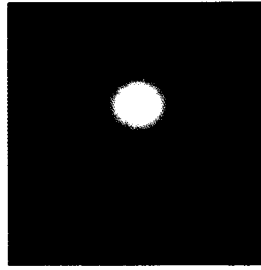


図12 映り込み成分
Fig. 12 A mirroring image.

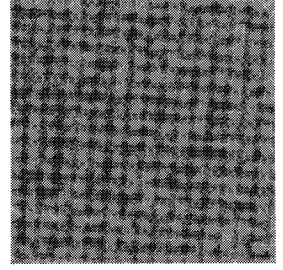
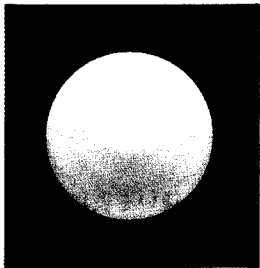
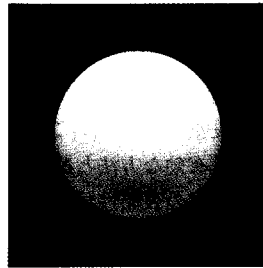


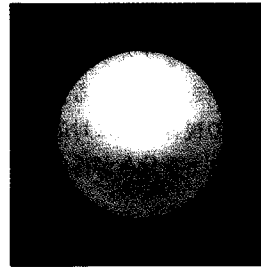
図13 テクスチャ成分 (明度)
Fig. 13 Texture(V).



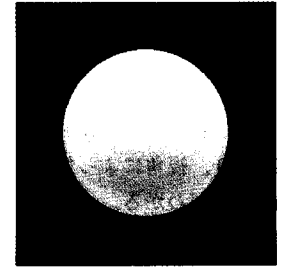
(a) 合成画像
(a) A synthesized image.



(b) 画像例 (深み感が弱い)
(b) Simulation of a feeling of depth (weak).



(c) 画像例 (輝き感が弱い)
(c) Simulation of a feeling of shininess (weak).



(d) きめ感の表現
(d) A synthesized image with texture.

図14 生成画像
Fig. 14 Synthesized images.

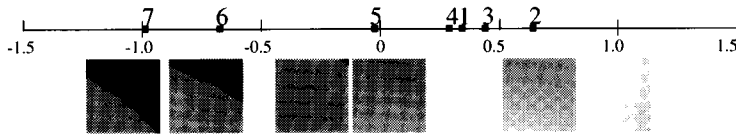


図15 真珠らしさの尺度構成結果-生成画像-
Fig. 15 A psychological scale of "suchness as pearl" - synthesized image -.

な重み値によりマッピングした後、RGB画像に変換して表示する。今回はHおよびCのテクスチャは拡散反射光画像に、またVのテクスチャは映り込み画像に対し、明度に比例し経験的に決めた重みを付けて乗じた。

本手法による表示例を図14に示す。(a)は干渉光成分、拡散光成分、および映り込み成分を合成したものである。光源方向は視線方向と45°の角度を成しており、干渉色は光源方向と独立に色計算がされているが、矛盾を感じないばかりか、まさに真珠の干渉現象が表現できている。また映り込みにより輝き感や透明感も表れている。(b)は干渉光画像と拡散光画像との合成比を変えることにより、深み感の違いを出している。(c)は映り込み画像のパラメータを変え、(a)に対し

て輝き感の違いを出した。(d)は(a)にテクスチャを付加したものである。わずかな色変化であるが、表面のきめ感とリアルさが向上することが真珠の専門家らによって確認されている。以上の表示例から、本方法が真珠の光学現象を表現できることが確認された。

5. 真珠らしさの主観評価2-生成画像一

以上のように生成された画像を、2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、写真の場合と比較する。

5.1 実験方法

生成画像から図2と同様の七つの部分画像を作り、理系学生を中心に50名に対して「どちらが真珠らしいか」を評価してもらった。

5.2 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15に示す。

順序について写真の場合の結果と比べると、画像4のみが順序を二つ下げているだけで、残りの順序に変化はない。全体的な傾向としては、生成画像が本物の各部分の特徴をよくとらえていると言える。画像4が順位を下げているのは、画像3と画像1が、色相の変化を滑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と考えられる。また、最も真珠らしいと評価された画像2が、順位こそ変わらないものの評価が下がっているのは、画像の粗さが目立つためと考えられる。逆に画像5の評価が上がっているのは、写真より滑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、全体像としてだけでなく部分的な真珠らしさも表現できていることが確認できた。また真珠らしさには、滑らかさ、とりわけ色相変化の滑らかさが関与すると考えられる。

6. むすび

真珠のビジュアルシミュレータ構築にあたり、物理モデルに基づく真珠の表現方法を提案した。本方法では、実際の真珠観察によって得られた、光源方向に依らない真珠固有の色相分布を、視点へ到達する光だけに着目した多層薄膜干渉の物理モデルにより表現した。また心理実験に基づいて、干渉、映り込み、テクスチャの三つの主要な物理的要因を選択し、真珠を効果的に表現した。これにより、最終目的である検査員の評価基準の明確化への適用が容易になると思われる。今回はパラメータを経験的に決めているが、これまでCGの分野でほとんど扱われていなかった多重薄膜干渉の表現として、ほぼ満足のいくものであった。

また「真珠らしさ」という心理尺度により、実物の写真と本方法による生成画像のそれぞれを評価した。その結果、生成画像が全体像だけでなく、部分的にも真珠らしさを表現できていることが確認された。更に、真珠らしさは非専門家にとっても共通的な心理尺度であり、光沢と干渉色によって引き起こされ、滑らかな色相変化が関与しているなど、リアルな真珠を表現する上で、種々の知見が得られた。

しかしながら、フォトリアリスティックな真珠の表現という点で、改良の余地がある。今回の生成画像に対して、専門家から輝き感が足りないとの指摘があった。映り込みの表現において表面荒さや光のにじみを取り入れた物理モデルを検討していきたい。またテク

スチャにおいてダイナミックな揺らぎを表現するため、カオスなどのモデルの導入も考えられる。

今後、本モデルをベースにして検査員の心理的要因と物理的要因の対応付けを検討する。また真珠らしさに寄与する物理パラメータの選択を行う予定である。

謝辞 実験およびソフトウェア作成に従事して頂いた大阪大学井口研究室土橋外志正君、山田剛士君に感謝します。

文 献

- [1] 高本健治, 伊藤正弥, 福井厚司, 高田和政, 西井完治, “浸み出し光を用いたセラミックのクラック検出,” SICE第12回センシングフォーラム資料, pp.85-90, 1995.
- [2] 奥田泰生, 千葉直樹, 安富文夫, 松浦英文, 河田 宏, 富田 洋, “官能検査の判断に寄与する画像特徴量の特定,” 日本機械学会講演論文集, 324, pp.71-73, 1995.
- [3] 長田典子, 亀井光仁, 赤根正樹, 中嶋敏之, “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.
- [4] 長田典子, 亀井光仁, 宇佐美照夫, “ニューラルネットの感度解析とその色彩識別への応用,” 電学論(C), vol.116, no.5, pp.556-563, 1996.
- [5] 長田典子, 宇佐美照夫, 亀井光仁, 永尾俊繁, 瀬藤 誠, 井田芳明, “感性計測技術の開発—真珠表面性状評価への適用—,” SICE第11回センシングフォーラム資料, 1994.
- [6] 和田浩爾, “真珠,” 全国宝石学協会, 1982.
- [7] 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,” 情処論, vol.25, no.6, pp.953-959, 1984.
- [8] 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.
- [9] 斉藤 泰, 牧野光則, 大石進一, “レイトレーシング法を用いた異方性不均質透明体の表現,” 信学論(D-II), vol.J76-D-II, no.8, pp.1755-1762, Aug. 1993.
- [10] 安田孝美, “光線追跡法干渉色表現,” PIXEL, no.115, pp.150-153, 1993.
- [11] 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,” グラフィクスとCADシンポジウム, pp.87-93, 1995.
- [12] J.S.Gondek, G.W.Meyer, and J.G.Newman, “Wavelength dependent reflectance functions,” SIGGRAPH'94 Comput. Graphics Proc., Annual Conf. Series, pp.213-220, 1994.
- [13] 西田友是, 土橋宣典, 金田和文, 山下英生, “多重散乱および天空光を考慮した雲の表示法,” グラフィクスとCADシンポジウム, pp.125-132, 1995.
- [14] 千葉則茂, 大川俊一, 村岡一信, 三浦 守, “CGのための樹木の成長モデル—架空の直物ホルモンによる自然な樹形の生成—,” 信学論(D-II), vol.J76-D-II, no.8, pp.1722-1734, Aug. 1993.
- [15] 東海彰吾, 宮城 真, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎, “CGによる柑橘果実の質感表現の一手法,” 信学論(D-II), vol.J76-D-II, no.8, pp.1746-1754, Aug. 1992.

- [16] 原島博監修, 井口征士編, “感性情報処理,” オーム社, 1994.
- [17] H.A.Macleod, “光学薄膜,” 日刊工業新聞社, 1989.
- [18] 中原 皓, “テトラサイクリンの使用による真珠層の生長度の測定,” 国立真珠研報6, pp.607-614, 1961.
- [19] K.E.Torrance and E.M.Sparrow, “Theory for Off-Specular Refraction From Roughened Surfaces,” J. Opt. Soc. Am., vol.54, no.91, pp.1105-1114, 1967.

(平成8年1月9日受付, 6月28日再受付)



長田 典子 (正員)

昭58京大・理・数学卒。同年三菱電機(株)入社。産業システム研究所において、知識情報処理、感性情報処理の計測システムへの応用に関する研究に従事。平8阪大大学院基礎工学研究科博士課程了。工博。情報処理学会、電気学会等各会員。



宇佐美 照夫

昭46阪市大・工・応用物理卒。昭48同大大学院修士課程了。同年三菱電機(株)入社。産業システム研究所において、プラント機器の診断システムに関する研究に従事。計測自動制御学会、IEEE各会員。



眞鍋 佳嗣 (正員)

平2阪大・基礎工・制御卒。平6同大大学院博士課程了。平7同大・基礎工・システム助手。工博。カラー画像処理の研究に従事。



井口 征士 (正員)

昭37阪大・工・電気卒。昭39同大大学院修士課程了。昭40同大基礎工助手, 昭44助教授, 昭59教授(現システム工学科)。工博。昭45仏国サクレ原子力研究所, 昭54南カリフォルニア大学画像処理研究所。パターン計測, 画像処理, 感性情報処理の研究に従事。情報処理学会, 計測自動制御学会, システム制御情報学会, IEEE各会員。