

光路差のテクスチャ表現による構造色レンダリング

佐伯 昌彦 井村 誠孝 安室 喜弘 眞鍋 佳嗣 千原 國宏

奈良先端科学技術大学院大学

概要 自然界の色は色素色と構造色に大別することができる。色素色は色素による発色であるのに対し、構造色は波長以下の微細構造に起因する光学現象による発色であり、視点位置や照明条件により見え方が大きく変化するという特徴をもつ。本研究では構造色を生み出す光路差に着目し、汎用的な構造色のレンダリング手法を提案する。本手法では微細構造を光路差や反射強度などを格納したテクスチャ表現によりモデル化することで、リアルタイムでのレンダリングを実現している。

キーワード 構造色、干渉、回折、光路差、テクスチャ、リアルタイムレンダリング

Redering of Structural Color Using Texture Expression of Optical Path Differences

Masahiko SAEKI, Masataka IMURA, Yoshihiro YASUMURO,
Yoshitsugu MANABE, and Kunihiro CHIHARA

Nara Institute of Science and Technology

Abstract Colors in nature can be divided in two categories: colors which originate in pigments (coloring matter) and structural colors caused by optical phenomena at the level of microscopic structures. The structural colors have a unique characteristic that the color changes according to viewing directions and lighting conditions. This research focuses on optical path differences and proposes a generic rendering method for structural colors. This method models the microscopic structure by using textures storing physical parameters. The proposed model can be applied to various types of structural colors and is suitable for real time rendering.

Key words structural color, interference, diffraction, optical path differences, texture, real time rendering

1. 研究背景

コンピュータグラフィックス (CG) 分野における近年の発展は目覚しく、丁寧に作りこまれた映像は本物と見間違うほどである。色の表現はリアリティのある CG において非常に重要な要素のひとつであり、観測者が受ける印象にも大きな影響を与える。自然界の色は色素色と構造色の二つに大別することが出来る。色素色は色素による発色であり、一般的に色といえばこちらにあたる。一方、構造色は光の波長以下の微細構造により生じる光学現象に起因する発色であり、照明条件や視点位置によってその見え方が大きく変化するという特徴を持つ。

CG でこれらの表現を行う場合、対象となるオブジェクトに適切な色を与えればある程度表現可能な色素色に対して、構造色は前述の特徴ゆえ容易でない。このような照

明条件や視点位置に対して変化する色の表現方法のひとつに BRDF (双方向反射率分布関数) があるが、BRDF は多次元の関数になり計測、モデル化のいずれにおいても現実的でない。

構造色を表現する試みとして、BRDF を用いて構造色的一种であるモルフォ蝶の翅を再現した研究がある [1]。また微細構造をモデル化することで、オパール遊色現象、コンパクトディスクの表面、シャボン玉、玉虫の虹色などを表現する手法が提案されている [2] [3] [4] [5]。しかしこれらの手法は特定のモデルに特化しており、主にレイトレーシング等により描画を行うため画像生成に時間がかかる。

しかし構造色はその特性上、さまざま照明条件において任意の視点位置から観察できることが望ましいと考えられる。そこで本研究では光路差を持つ複数の波による干

渉などの複雑な計算をあらかじめ行い、計算結果をテクスチャとして参照することでリアルタイムでの画像提示を行う。上記の前計算は、あらゆる微細構造を光路差という共通のパラメータにより表現することで実現する。さらにこの共通のパラメータで表現するという方法により、特定のモデルに特化しない汎用的な構造色レンダリング手法を提案する。

2. 構造色

構造色の特徴は、視点位置や光源条件に応じて色が変化することである。構造色はシャボン玉やコンパクトディスク表面、オパールなどの宝石、昆虫や孔雀の羽根などに見られ、図1のような微細構造をもつ物質で観察される。これらの構造が複数の光路間に光路長の差異、すなわち光路差を生み、光路差をもつ波同士が互いに干渉合うことでさまざまな発色する。

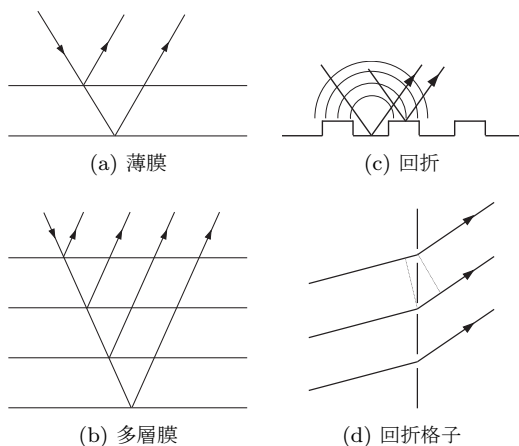


図1 構造色を生む微細構造

3. 提案手法

構造色を生み出す微細構造には図1のように種々あるが、いずれも光路差をもつ複数の波同士の干渉が構造色を生み出している。提案手法はこの光路差に注目しており、いかなる微細構造であろうとも光路差という共通のパラメータを利用することにより、あらゆる構造色がひとつのモデルで表現可能ではないかという考えに基づいている。

想定している微細構造において、この光路差は以下の仮定が成り立つ。光路差は表面上の一点に対して、入射(光源)・反射(視点)方向が決まると一意に決定される。さらに入射方向により決定される光路差は反射方向とは無関係であり、またその逆も成り立つため、お互いは独立である。

上記の仮定を元に、入射方向と反射方向との関係を図

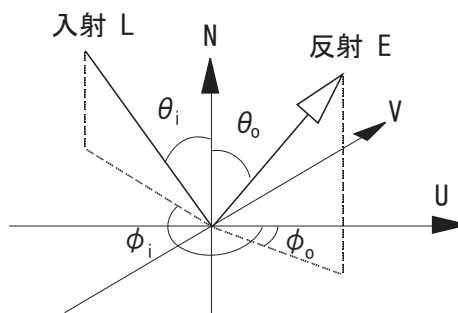


図2 入射光と反射光の関係

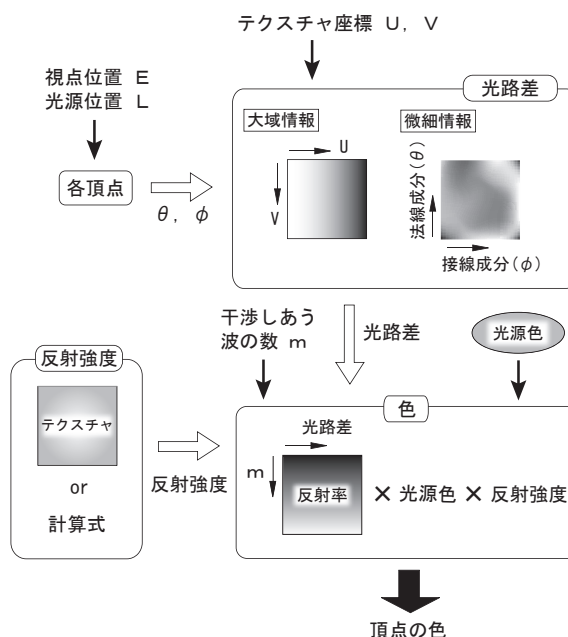


図3 提案手法の概略図

2のように定義し、提案手法の概略を図3に示す。本手法では光路差情報を格納したテクスチャを作成し、得られた光路差から最終的に観測される色を決定する。図3において、光路差を決定するテクスチャおよび反射強度のテクスチャは、値を参照するテーブルとして使用され、実際にオブジェクトにマッピングされる通常のテクスチャとしては、反射率のテクスチャのみが使用される。

具体的なアルゴリズムと各テクスチャの意味を光路差と色に分けて解説する。

3.1 光路差の決定

本手法では光路差を大域情報と微細構造に分けて表現しており、特に微細情報がより重要なテクスチャとなる。本テクスチャは図4に示すような座標軸をもち、値として光路差が格納されている。つまり図2に示したように、入射・反射方向をそれぞれLおよびE、法線・接線方向をそれぞれNおよびUとすると、入射方向からL・Nお

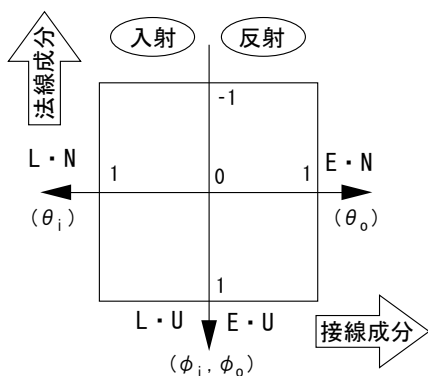


図4 光路差テクスチャの定義 (微細情報)

よび $L \cdot U$ が決まり、対応する点からその入射方向から入射した際に生じる光路差が求まる。同様に反射方向の $E \cdot N$ および $E \cdot U$ から光路差を求め、入射における光路差と加算したものが最終的な光路差となる。

大域情報のテクスチャでは、大域的に変化するパラメータを格納している。これはシャボン玉などの場合において、光路差を決定する膜の厚みといったパラメータを格納することで、部位によって異なる膜の厚み分布などの表現に利用する。

3.2 色の算出

図3における反射率テクスチャは、横軸には前項で得られた光路差 Δ 、縦軸には干渉しあう波の数 m をもつ。つまり m 個の光路差 Δ をもつ波同士が干渉しあった結果生じる RGB 各成分の反射率が格納されている。

以下に具体的な反射率の計算方法について説明する。光路差 Δ を基準に、各波長における位相差 $\delta(\lambda)$ をもつ波に変換し、それら m 個を加算する。これらを可視領域 (360~830nm) の波長それぞれに対して計算すれば、反射スペクトル分布が得られる。

このようにして得られたスペクトル分布を、以下の積分を用いて XYZ 表色系に変換する。

$$X = \frac{1}{c} \int_{360}^{830} R(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$Y = \frac{1}{c} \int_{360}^{830} R(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$Z = \frac{1}{c} \int_{360}^{830} R(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

ただし

$$c = \int_{360}^{830} \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

であり $R(\lambda)$ は反射スペクトル分布、 \bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} はそれぞれ等色関数を示している [6]。

最後に可視化のため、得られた XYZ 表色系を RGB 表

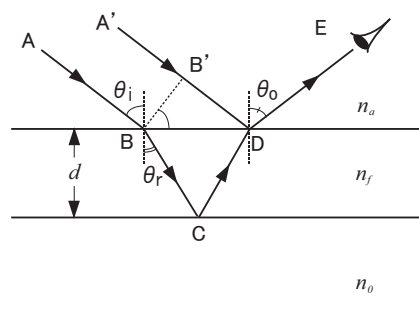


図5 薄膜モデル

色系に変換する。XYZ 表色系から RGB 表色系への変換には次の行列式を用いる [7]。

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.240479 & -1.537150 & -0.498535 \\ -0.969256 & 1.875992 & 0.041556 \\ 0.055648 & -0.204043 & 1.057311 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

最終的に観測される色は、反射率テクスチャに光源の色と反射強度を乗じたものとなる。光源に関しては反射率と同様の手法を用い、あらかじめスペクトルを RGB に変換した色を用いる。

4. 実装

本提案モデルを用いた薄膜および回折格子のモデル化について解説する。

4.1 薄膜モデル

薄膜モデルにおける構造色は、図5において $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ と進む光と、 $A' \rightarrow B' \rightarrow D \rightarrow E$ と進む光との間の光路差の干渉によって生じる。図5における n_f の部位が薄膜であり、 n は各部位における屈折率を示している。このときの光路差は以下のように表される。

$$n_f (BC + CD) - n_a \cdot B'D \quad (5)$$

ここで Snell の法則 $\sin \theta_i / \sin \theta_r = n_f / n_a$ を用いれば

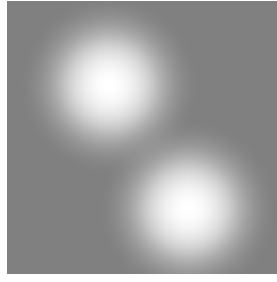
$$\begin{aligned} BC = CD &= \frac{d}{\cos \theta_r} = \frac{d}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_r}} \\ &= d \frac{n_f}{\sqrt{n_f^2 - n_a^2 \sin^2 \theta_i}} \end{aligned} \quad (6)$$

および

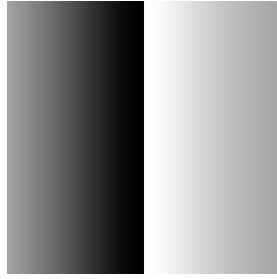
$$B'D = BD \sin \theta_i = d \frac{2n_a \sin^2 \theta_i}{\sqrt{n_f^2 - n_a^2 \sin^2 \theta_i}} \quad (7)$$

が得られるので、結局

$$\Delta = n_f (BC + CD) - n_a \cdot B'D$$



(a) 大域情報



(b) 微細情報

図 6 薄膜の光路差テクスチャ

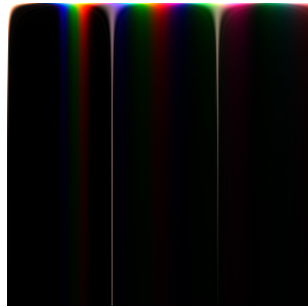


図 7 反射率テクスチャ

$$= d \frac{2(n_f^2 - n_a^2 \sin^2 \theta_i)}{\sqrt{n_f^2 - n_a^2 \sin^2 \theta_i}} \quad (8)$$

となる。

ここでは BC および $B'D$ は入射光に、 CD は反射光のみに依存すると考え、光路差を入射光および反射光のみに依存する成分に分解し、その結果を微細情報としてテクスチャを作成した。

$$\begin{aligned} \Delta_i &= n_f \cdot BC - n_a \cdot B'D \\ &= d \frac{n_f^2 - 2n_a^2 \sin^2 \theta_i}{\sqrt{n_f^2 - n_a^2 \sin^2 \theta_i}} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\Delta_o = n_f \cdot CD = d \frac{n_f^2}{\sqrt{n_f^2 - n_a^2 \sin^2 \theta_o}} \quad (10)$$

ただし実際に書き込む情報は膜の厚み d を除去した部分であり、値は 0 ~ 1 に正規化されている。膜の厚み d は

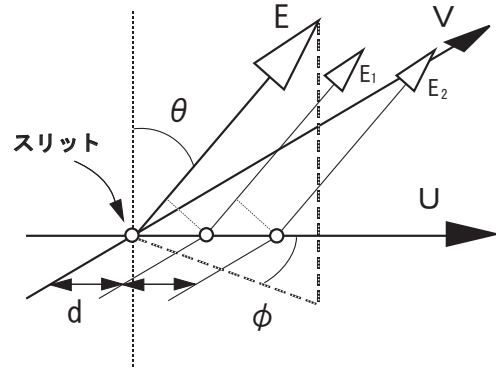


図 8 回折格子



図 9 回折格子の光路差テクスチャ

大域情報として、厚み分布を表現するテクスチャを作成する。よって最終的な光路差は、大域情報である厚み d と微細情報を乗算することで得られる。図 6 に作成した光路差テクスチャ、さらに図 7 に反射率テクスチャを示す。

4.2 回折格子

回折格子では図 8 に示すように、各スリットで回折した光路差をもつ波同士が互いに干渉する。このとき隣り合うスリットから生じる波の光路差 Δ は次式により表現できる。

$$\Delta = d \sin \left(\cos^{-1} (\tau \cdot E) - \frac{\pi}{2} \right) \quad (11)$$

ただし視点 E が各スリット間 d に比べ遠方にあるため、 E, E_1, E_2, \dots の各波が平行であると仮定している。上記の関係式は光源位置に関しても同様であり、光路差の微細情報を表現するテクスチャは図 9 のようになる。

反射率テクスチャに関しては、薄膜モデルと同じテクスチャが利用可能である。

5. 描画結果

薄膜モデルの描画例としてシャボン玉を想定し、アルファブレンディングおよび球面環境マッピングを行った結果を図 10 に示す。また描画オブジェクトとして現実にはありえない形状として、星型を適用した結果が図 11 である。

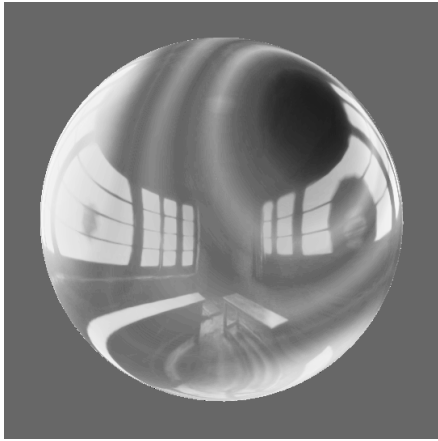
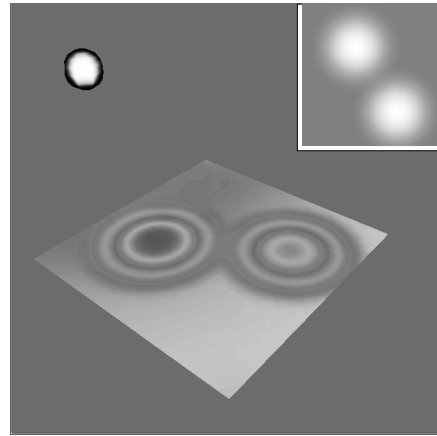


図 10 シャボン玉



(a)

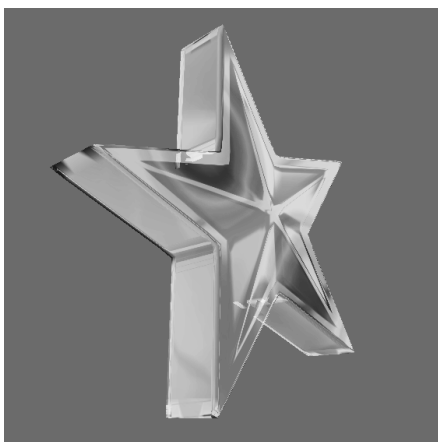
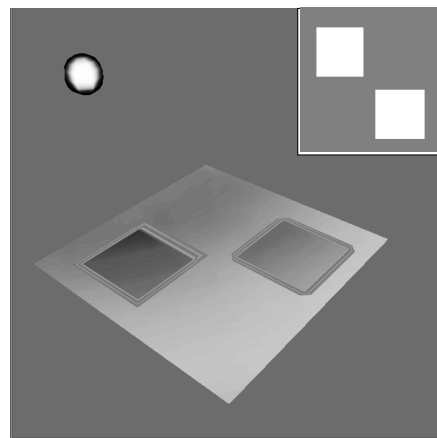


図 11 星型のシャボン玉



(b)

図 12 厚み分布の違いによる比較

図 12 は大域情報である厚み分布として、異なるテクスチャを適用した描画結果である。厚み分布は $0 \sim 1400\text{nm}$ を表現しており、 $0 \sim 1$ に正規化されている。

回折格子の描画例としてはコンパクトディスク (CD) を想定し描画を行った。CD の表面は多数のピットと呼ばれる溝が図 13 のように、円周方向と直径方向に並んでいる。

これらピットを反射する際、このピットがスリットの役割を果たすことで回折現象が起きる。よって CD を描画するためには円周方向と直径方向にあるスリット間距離の異なる回折格子を考慮する必要があるが、これは各方向の回折格子の影響を乗算することで得られる [3]。これを実現するため、各方向で光路差および反射率を求め乗算することで描画を行った。またそれらピットによる円周方向のハイライトは、図 3 における反射強度で実現している。このハイライトは単スリットによる干渉の結果であり、次式で示される。

$$R = \frac{\sin^2(\Delta)}{\Delta^2} \quad (12)$$

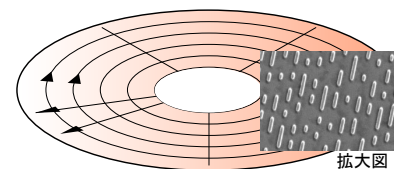


図 13 CD の構造とその拡大図 [8]

上式より反射強度 R は波長により異なるが、いずれにせよ $\Delta = 0$ でもっとも強くなるという特徴があるため、ここでは簡単化のため適当な波長における反射強度 R で代用した。

視点方向を変化した際に得られた結果例を図 14 に示す。描画には Microsoft DirectX 9.0 の HLSL Shaders を用いて実装し、各頂点ごとに Vertex Shader を使用して光路差を計算し、頂点間は線形補間を行っている。このとき各ピクセルは頂点間の色で補間されるのではなく、光路差により補間され、対応する色が描画されるべきである。これは光路差を UV 座標とするテクスチャマップ

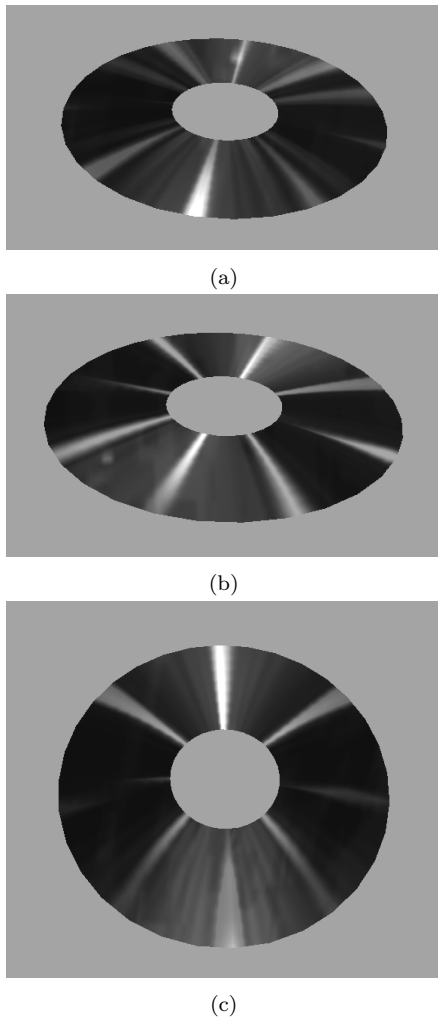


図 14 コンパクトディスクの描画結果

ングを用いることで、容易に実装可能である。

これら描画を表 1 の環境で行った結果、FPS は平均 30 程度でありリアルタイムレンダリングを実現している。オブジェクトの頂点数は形状により異なるが、最大で 2000 点ほどである。

表 1 計測環境

OS	Microsoft Windows XP
CPU	Mobile Intel Pentium4 2.66GHz
Memory	512MB
Graphic Card	Intel 82852/82855 GM/GME Graphics Controller

6. ま と め

本研究ではより汎用性のある構造色レンダリング手法を提案した。本手法による利点は大きく次の三点である。1 点目に微細構造を階層的に取り扱うことで、さまざまな構造色に適用可能であること。2 点目に物理パラメー

タをテクスチャとして管理することで、リアルタイムでの描画、大域情報の変更、光源の種類の変更等が可能である。3 点目はテクスチャに物理的意味を持たせることで、各テクスチャを見れば対象としている構造を想像することができることである。つまりこのことは逆にテクスチャを個別に編集しやすい構造であり、正確な構造が不明な未知の構造色も各テクスチャの設定次第である程度は表現可能であることを示している。

今後の展望としては、現在は干渉に関与する波の強さはすべて一定としている。しかし反射率や透過率によっては、互いの波の強さはそれぞれ異なり生じる色にも大きな影響を与える。ゆえに本提案モデルにおいて、他の微細構造を実装するためにも、それら波の強さの影響を考慮したモデルの検討をする。また現実世界における構造色には、単一の微細構造ではなく様々は微細構造の組み合わせにより生じるものがある。そのような構造色の描画を実現するためには、それら微細構造の取り扱いと、モデルを組み合わせる方法を検討していく。

現在得られた結果画像に対しては、どの程度シミュレートできているのかについて、実画像との比較等により確かめる必要がある。

文 献

- [1] J.-C.Gonzato and B.Pont: "A phenomenological representation of iridescent colors in butterfly wings", WSCG 2004, SHORT Communication Papers proceedings, **12**, 1-3, p. 79 (2004).
- [2] 安部: "構造モデルを用いたオパールの色散現象の再現", Master's thesis, 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科, NAIST-IS-MT0151003 (2003).
- [3] Y. Sun, F.D.Fracchia, M.S.Drew and T.W.Calvert: "Rendering iridescent colors of optical disks", Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques 2000, pp. 341-352 (2000).
- [4] N. Tsingos: "A geometrical approach to modeling reflectance functions of diffracting surfaces", Eurographics Workshop on Rendering (2000).
- [5] H.Hirayama, Y.Yamaji, K.Kaneda, H.Yamashita and Y.Monden: "Rendering iridescent colors appearing on natural objects", Pacific Graphics 2000, p. 15 (2000).
- [6] Colour and V. R. Labs: "Cvrl color & vision database", URL : <http://cvrl.ioo.ucl.ac.uk/>.
- [7] B.Gralak, G.Tayeb and S.Enoch: "Morpho butterflies wings color modeled with lamellar grating theory", Optics Express, **9**, 11, pp. 576-578 (2001).
- [8] M. University: "明星大学物性研究センター 電子顕微鏡写真集", URL : <http://www.amrc.meisei-u.ac.jp/xoops/modules/myalbum/>.