

NAIST-IS-MT0451061

修士論文

汎用的な構造色レンダリング手法の開発

佐伯 昌彦

2006年2月2日

奈良先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科 情報処理学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に  
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

佐伯 昌彦

審査委員：

千原 國宏 教授 (主指導教員)

横矢 直和 教授 (副指導教員)

眞鍋 佳嗣 助教授 (副指導教員)

# 汎用的な構造色レンダリング手法の開発\*

佐伯 昌彦

## 内容梗概

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が生む光路差に起因する光学現象による発色である。この構造色は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。

本論文では構造色を実時間で描画可能な汎用的なレンダリング手法を提案する。本手法では光路差を共通のパラメータとして用いることで、構造色を生み出す微細構造の一元的な取り扱いを可能にしている。また複雑な現象を光路差のみで表現し、それらをテクスチャによりモデル化することで高速化を図っている。

本手法はテクスチャがマッピング可能な任意形状のオブジェクトに適用でき、光路差により生じる構造色を任意の視点・光源位置において実時間で描画することが可能である。

## 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

---

\*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報処理学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT0451061, 2006年2月2日.

# Generic Rendering Method of Structural Color Objects\*

Masahiko Saeki

## Abstract

Colors in nature can be classified into two categories: colors which originate in pigments(coloring matter) and structural colors caused by optical path differences 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 paper proposes generic rendering method of structural colors in real time. The proposed method uses the optical path differences as a common parameter to allow unified treatment of various types of microscopic structures. Moreover, representation by textures storing optical path differences can speed up rendering.

Proposed method can be applied to arbitrarily-shaped objects and enables us to real time rendering in arbitrarily viewing directions and lighting conditions.

## Keywords:

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

---

\*Master's Thesis, Department of Information Processing, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT0451061, February 2, 2006.

# 目次

第1章 序章	1
1.1. 研究の背景と目的	1
第2章 CGによる構造色の表現	3
2.1. 構造色のしくみ	3
2.1.1 薄膜による干渉	5
2.1.2 多層膜による干渉	6
2.1.3 回折格子による干渉	7
2.2. BRDFのCGへの利用	9
2.3. 色の可視化	11
2.4. CGでの構造色表現に関する過去の研究	12
第3章 汎用的な 構造色のレンダリング手法	16
3.1. 光路差をパラメータとした構造色の表現	16
3.2. 光路差テクスチャ	18
3.3. 色テクスチャ	20
3.3.1 干渉波の表現	20
3.3.2 色の前計算	22
3.3.3 色の決定	23
第4章 実装と描画結果	25
4.1. 実装環境	25
4.2. 光路差テクスチャ・色テクスチャの作成	26
4.2.1 薄膜・多層膜	26

4.2.2	回折格子	32
4.3.	描画結果	35
4.3.1	薄膜モデル	35
4.3.2	多層膜モデル	36
4.3.3	回折格子モデル	39
第5章	考察	41
5.1.	描画結果の考察と本手法の制限	41
5.2.	本手法で用いた方法の有効性の検証	43
第6章	まとめ	45
	謝辞	47
	参考文献	48

# 目次

2.1	構造色の例	4
2.2	構造色を生む微細構造	4
2.3	薄膜	5
2.4	多層膜	7
2.5	ホイヘンスの原理による回折	8
2.6	単スリット	8
2.7	複スリット	8
2.8	回折格子による強度分布	9
2.9	視点・光源位置の定義	10
2.10	Rendering Iridescent Colors of Optical Disks	13
2.11	A Geometrical Approach to Modeling Reflectance Functions of Diffracting Surfaces	13
2.12	Diffraction Shaders	13
2.13	Rendering Iridescent Colors Appearing on Natural Objects	14
2.14	Bubble Shader	14
2.15	Simulation of Iridescence and Translucency on Thin Surfaces	15
2.16	Real-Time Rendering of Soap Bubbles Taking into Account Light Interference	15
3.1	概略図	17
3.2	視点位置と光源位置	18
3.3	光路差テクスチャの定義	19
3.4	構造色テクスチャ	24

4.1	フレネル項 (屈折率:1.5)	29
4.2	シャボン玉を想定したテクスチャ( $n = 1.3$ )	30
4.3	屈折率の違いによるテクスチャの比較	31
4.4	コンパクトディスクの拡大図	32
4.5	回折格子により生じる光路差	33
4.6	回折格子の光路差テクスチャ	33
4.7	回折格子の構造色テクスチャ:考慮するピット数の違いによる比較	34
4.8	シャボン玉の描画例	35
4.9	星型に薄膜を適用した描画例	36
4.10	場所依存テクスチャの違いによる描画結果	37
4.11	レンズ表面の色変化	38
4.12	多層膜モデルの描画結果	38
4.13	CD の描画方法	39
4.14	CD の描画例	40
5.1	多層膜と回折格子の組み合わせ例	42
5.2	色による補間と光路差による補間の比較	44

# 表 目 次

4.1 実装環境 . . . . .	25
5.1 構造色テクスチャ作成速度の比較 . . . . .	43

# 第1章 序章

## 1.1. 研究の背景と目的

コンピュータグラフィクス (CG) の技術的進歩の速さは目覚しく、その利用機会も増えてきている。近年の CG の流れとしてノンフォトリアリスティックな研究も盛んではあるが、やはりリアリティの追求は恒久的な目標といえ、CM や映画などでは本物と区別がつかない程、リアリティのある映像も多く見受けられるようになった。

リアリティのある CG において、色表現は非常に重要な要素のひとつである。自然界の色は色素色と構造色の2つに大別することができる。色素色は色素による発色であり、一般的に色と言えはこちらにあたる。構造色は波長以下の微細構造が生み出す光路差に起因する光学現象による発色である。構造色は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っている。構造色の例として、シャボン玉やコンパクトディスク表面の虹色などがある。また最近ではナノテクノロジーによる産業分野への応用も進み、構造色を利用した環境にやさしい塗料や繊維も商品化されている [1][2][3]。

本研究では構造色を対象としている。構造色を CG で表現する利点として、エンターテインメントの分野はもちろん、上記の構造色を利用した商品の色変化を再現することで、ウェブ上で視覚的にユーザへその効果を提示することも可能である。また構造色は玉虫、蝶、孔雀の羽など自然界に多く存在し、生物図鑑などへの応用も考えられる [4]。

実際 CG で構造色を表現する場合、色素色はオブジェクトに適切な色を与えることで、ある程度表現可能であるのに対し、構造色は視点・光源に対して複雑な依存性を示すため高次元のデータとなる。高次元データを取り扱う関数として、

CGでは双方向反射率分布関数(BRDF)が用いられることが多いが、BRDFの高次元データは取り扱いにくく、そのデータを作成する手法も確立されていない。

先行研究の例として、対象物体の微細構造をモデル化することで、モルフォチョウと呼ばれる蝶の翅やオパールの変色現象を再現した研究がある[5][6]。しかし先行研究では、描画対象の微細構造に特化したモデル化を行っているため汎用性に乏しく、また視点・光源に依存した多次元データを、レイトレーシングにより作成・描画しているためレンダリングに時間がかかる。

本研究では、より汎用的な構造色のレンダリング手法を提案する。提案手法では、構造色を生み出す原因である光路差に着目し、この光路差を共通のパラメータに用いることで様々な微細構造を表現する。これにより一つのモデルでさまざまな構造色を再現でき、汎用性を持たせることが出来る。本研究では描画対象を特定していないが、視点と光源の位置が定まった場合の微細構造による光路差が導出可能な構造色であれば、実時間で描画可能なモデルの構築を目指している。これは構造色の特徴を最大限に表現するには、任意の視点・光源条件で観察できることが望ましいためである。実時間での描画を可能にするため、複雑な条件を光路差のみの表現に置き換え、それらをテクスチャで表現することにより高速化を図る。光路差から色を算出する過程がもっとも時間がかかるため、光源の種類ごとにあらかじめ計算した積分値を用いて算出する。これにより複雑な色計算を単純な加算により求めることができ、さまざまな光源や微細構造による色の比較が容易になる。

本論文の構成として、まず2章で構造色のCGによる表現を過去の研究とともに紹介する。3章にてそれら先行研究の問題点を受け、光路差をパラメータとして用いる構造色レンダリング手法を提案する。4章では提案手法を用いていくつかの微細構造を対象に、その実装法を述べるとともにあわせて描画例も示す。そして5章で提案手法に関するいくつかの考察を行った後、最後に6章にて総括を行う。

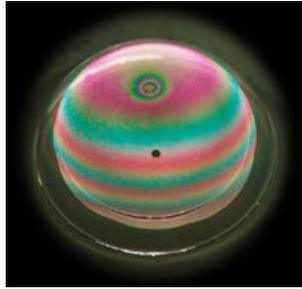
## 第2章 CGによる構造色の表現

構造色のような多次元データを必要とする複雑な物質の色を表現する手法として、BRDFが存在する。本章では干渉による構造色の発生原理およびBRDFを解説し、それらをCGで表現するための色の可視化手法を述べ、構造色を表現した過去の研究例を紹介する。

### 2.1. 構造色のしくみ

構造色は微細構造がもたらす光学現象による発色であるため、視点位置や照明環境に応じて色が変化するという特徴がある。構造色の例としては図 2.1 のような、シャボン玉やコンパクトディスク表面に生じる虹色があげられる。また蝶や孔雀の羽など生物にも多く存在し、それらは敵の目を欺くためであったり、仲間に自らの位置を伝える役割を果たしているとされている。微細構造の違いにより上記の例以外にも構造色は存在する。構造色を生み出す主な微細構造としては、薄膜、回折格子などが挙げられる(図 2.2)。

微細構造へ入射した光の光路は一つに定まらず複数存在するため、光路の違いが光路差を生み出すことになる。微細構造は光の波長以下のスケールをもつため、生じた光路差により複数の波同士で干渉が起こり様々に発色する。ただし光路とは屈折率  $n$  の媒質を通過する光が、距離  $l$  だけ進んだとき  $nl$  として定義される。これは真空を  $l$  だけ進むのに要する同じ時間で、屈折率  $n$  の媒質を通過することができる距離を意味している。



(a) シャボン玉 [7]



(b) コンパクトディスク

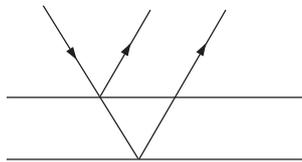


(c) モルフォチョウ [8]

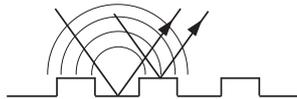


(d) 孔雀の羽 [8]

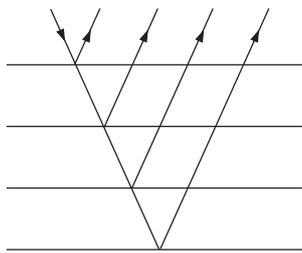
図 2.1 構造色の例



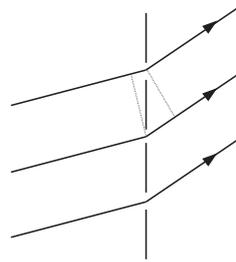
(a) 薄膜



(c) 反射型回折格子



(b) 多層膜



(d) 回折格子

図 2.2 構造色を生む微細構造

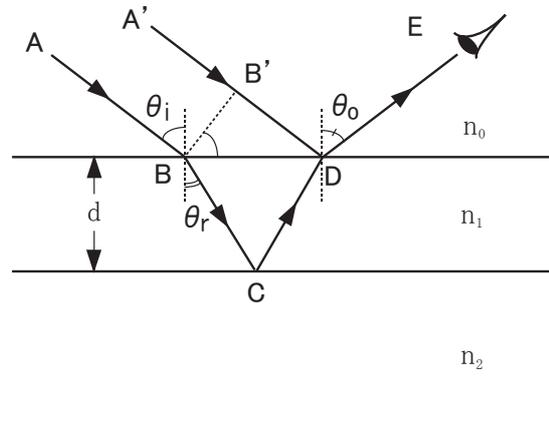


図 2.3 薄膜

### 2.1.1 薄膜による干渉

薄膜はシャボン玉や水面に浮いた油膜などに見られ、図 2.3 のような構造をしている。 $n$  は各部位における屈折率であり、 $n_1$  の部位が厚み  $d$  の薄膜を示している。

薄膜が生む構造色は、多重反射を無視すれば  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$  と、 $A' \rightarrow B' \rightarrow D \rightarrow E$  とに進む 2 つの光路の存在によるものである。異なる光路を通る 2 つの波は  $BC$ 、 $CD$  および  $B'D$  の違いにより差が生じ、反射光である  $D \rightarrow E$  の光路上で干渉が起こり発色する。式で表現すれば、光路差は以下のように表される。

$$n_1 (BC + CD) - n_0 \cdot B'D \quad (2.1)$$

ここで Snell の法則

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{n_1}{n_0}$$

を用いれば

$$\begin{aligned} BC &= \frac{d}{\cos \theta_r} = \frac{d}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_r}} \\ &= d \frac{n_1}{\sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_i}} \end{aligned} \quad (2.2)$$

となり、 $CD$  も同様に

$$CD = d \frac{n_1}{\sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_o}} \quad (2.3)$$

が得られる。次に

$$\begin{aligned} BD &= BC \sin \theta_r + CD \sin \theta_r \\ &= BC \frac{n_0}{n_1} \sin \theta_i + CD \frac{n_0}{n_1} \sin \theta_o \end{aligned} \quad (2.4)$$

であるので

$$\begin{aligned} B'D &= BD \sin \theta_i \\ &= \frac{n_0}{n_1} \sin \theta_i \cdot (BC \sin \theta_i + CD \sin \theta_o) \end{aligned} \quad (2.5)$$

となり、結局、光路差  $\Delta$  は次のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta &= n_1 (BC + CD) + n_0 B'D \\ &= \left( n_1 - \frac{n_0^2}{n_1} \sin^2 \theta_i \right) BC + \left( n_1 - \frac{n_0^2}{n_1} \sin \theta_i \sin \theta_o \right) CD \\ &= d \left( \sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_i} + \frac{n_1^2 - n_0^2 \sin \theta_i \sin \theta_o}{\sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_o}} \right) \end{aligned} \quad (2.6)$$

ここで  $n_0$ 、 $n_2$  を空気、 $n_1$  を油とすれば、 $n_0 = n_2 < n_1$  の関係がある。よって  $D$  点の反射は固定端反射となり位相が反転し、 $C$  点では自由端反射となるため位相の反転は起きない。生じる色を計算する際には、屈折率の大小関係による反射の種類が位相差に与える影響も考慮する必要がある。

### 2.1.2 多層膜による干渉

多層膜は図 2.4 のような構造であり、薄膜を重ねた構造であるため薄膜による干渉と同様の原理で発色する。ただし薄膜が複数あるため光路も複数存在し、その結果  $A_0 \sim A_n$  の波による干渉が生じる。このとき生じる光路差は薄膜と同様に考えることができ、 $A_0$  と  $A_m$  との間に生じる光路差  $\Delta_m$  は次式で表現できる。

$$\Delta_m = \sum_{p=1}^m \left[ d_p \sqrt{n_p^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_i} + d_p \frac{n_p^2 - n_0^2 \sin \theta_i \sin \theta_o}{\sqrt{n_p^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_o}} \right] \quad (2.7)$$

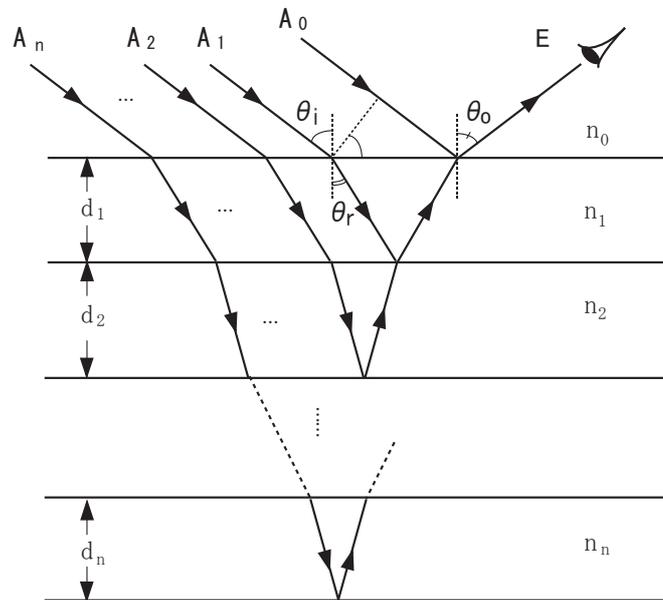


図 2.4 多層膜

### 2.1.3 回折格子による干渉

光の性質として回折があり、構造色を生み出す要因のひとつである。回折は障害物にぶつかった波が、背後に回りこむ現象であり、ホイヘンスの原理により説明できる。

単スリットを平面波が通過したとき、通過後の波は図 2.5 のようにスリットを中心とした円状に広がる。これは波面上の各点は新たな波源として次の瞬間における波面を構成するというホイヘンスの原理に基づくものであり、円状に広がった波面はスリットを通過した素元波の形に相当する。障害物に衝突した際も同様の現象が起こり、円状に広がることにより背後に回り込んで見えるように見える。

図 2.6 のようにスリットに幅があれば、通過するスリットの位置により光路が異なるため、単スリットにより回折した波は干渉が起こる。例えばスリットの両端では  $aa'$  の光路差が生じることになり、スクリーンに投影すれば干渉縞を見ることができる。また複数の単スリットで構成される複スリットでは、図 2.7 のように  $L_A$  と  $L_B$  との間で  $AA'$  の光路差が生まれる。このときスリット間距離  $D$  に対して十分遠方から観測すれば、各光路による光路差は等しくなり  $AA' = BB'$

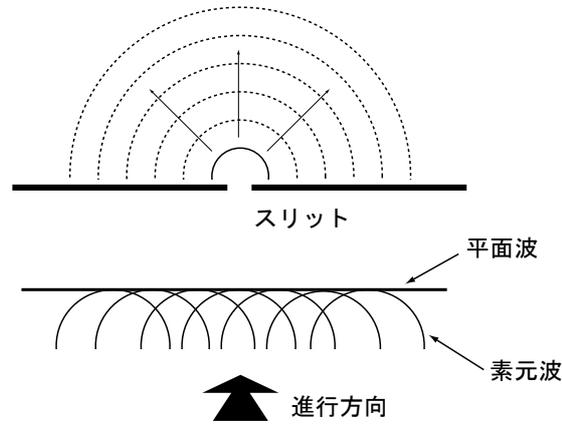


図 2.5 ホイヘンスの原理による回折

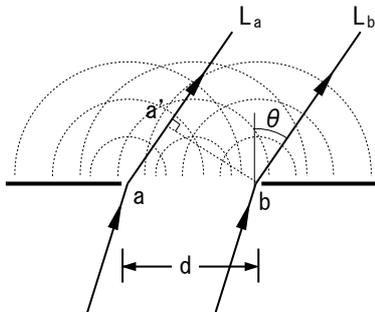


図 2.6 単スリット

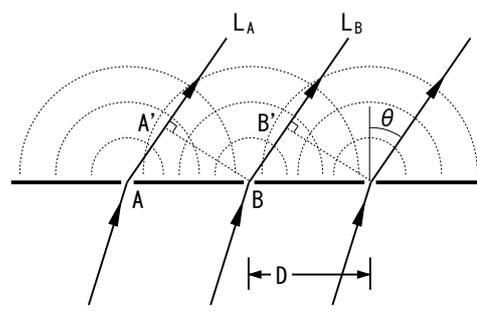


図 2.7 複スリット

が成立することになる。

回折格子は単スリットに相当する幅のあるスリットを、複スリットのように等間隔に配置した構造をしている。回折格子による強度分布は単スリットによる干渉と、複スリットの干渉による影響を乗算することで得られる。図 2.8 の実線が回折格子の強度分布であり、点線がそれぞれ単スリットおよび複スリットの強度分布を示している。

強度分布の形状はスリット幅  $d$  とスリット間距離  $D$  により決まり、以下の式で表現できることがわかっている [9]。

$$I = \frac{\sin^2 \delta_d}{\delta_d^2} \cdot \frac{\sin^2 (m\delta_D)}{\sin^2 \delta_D} \quad (2.8)$$

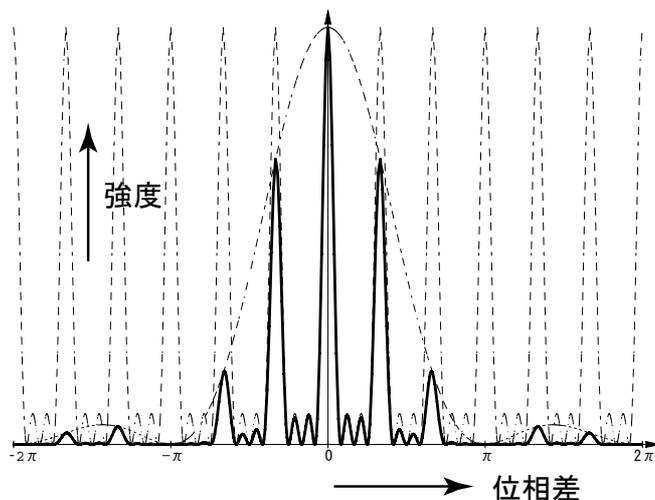


図 2.8 回折格子による強度分布

前項が単スリットによる干渉であり、第二項が複スリットによる干渉である。ここで  $\Delta_d$  および  $\Delta_D$  は各干渉の要因となる位相差に相当し、それぞれ以下で表される。ただし  $\lambda$  は光の波長であり、 $\theta$  は図 2.6 および図 2.7 で図示されている通りである。

$$\delta_d = \frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \quad (2.9)$$

$$\delta_D = \frac{\pi D \sin \theta}{\lambda} \quad (2.10)$$

## 2.2. BRDF の CG への利用

構造色のような複雑な変化を見せる材質を表現する手法として、BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) がある。ある材質の特性は、任意の入射光に対する反射光の強度を記述することで表現でき、BRDF はこの両者をつなぐ関数である。いま図 2.9 において、 $\theta_i, \phi_i$  の方向における単位面積あたりの入射光の強度を  $L_i(\theta_i, \phi_i)$ 、 $\theta_o, \phi_o$  の方向における単位面積あたりの反射光の強度を  $L_o(\theta_o, \phi_o)$  とする。このとき反射強度は以下の式で表現できる。

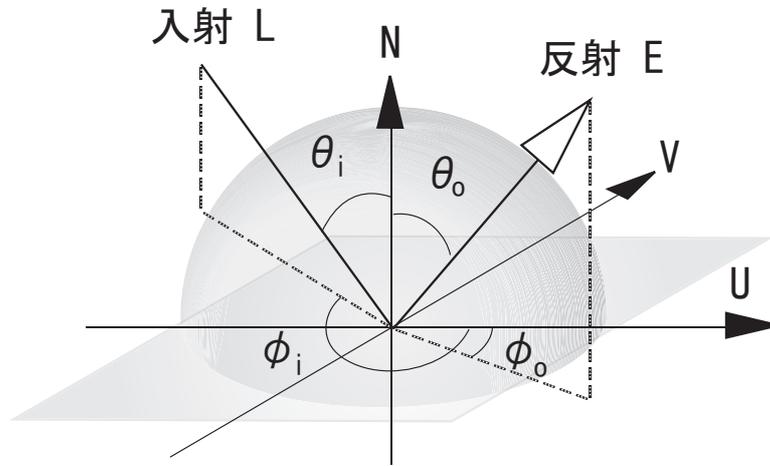


図 2.9 視点・光源位置の定義

$$L_o(\theta_o, \phi_o) = \iint_{\Omega} L_i(\theta_i, \phi_i) f(\theta_i, \phi_i, \theta_o, \phi_o) \cos \theta_i d\theta_i d\phi_i \quad (2.11)$$

関数  $f$  が BRDF であり、単位面積・単位立体角あたりの入射強度に対する、単位面積あたりの反射強度の比を表している。 $\cos \theta_i$  が入射強度を単位立体角あたりの強度に変換する項であり、その入射光を半球  $\Omega$  に渡って積分することで反射強度が得られることを示している。

BRDF の表現形式は、近似関数による表現形式とルックアップテーブルを用いた表現形式の 2 つに分けることができる。

近似関数による表現では、多次元になりやすいデータを保持する必要がないので、データ容量を大幅に削減することができる [10]。よって  $\phi$  に依存しない反射や単純な構造のリアルタイム描画などに適している。代表的な近似式として Phone モデル [11] があり、物理的に正しくないモデルにも関わらず十分な結果が得られることが多い。

より厳密な物理的制約を加えた Cook-Torrance モデル [12] などもあるが、複雑な構造を持つ材質を表現するには近似関数では限界がある。その場合、煩雑な近似関数で表現するよりルックアップテーブル形式で表現するほうが扱い易いこともある。また実物体を直接測定することでテーブルの作成を行えば、対象の材質

に関して忠実な再現が行える。しかし測定の際に生じるノイズや離散的な測定データによる問題、データ容量の増大などの欠点がある。

そこで複雑な変化を見せる材質を高速に表現する手法として、近似関数による手法を拡張した Factored BRDF が考え出された。Factored BRDF は高次元の BRDF を低次元の関数列により表現する手法であり、とくにハードウェアで扱いやすい 2D テクスチャに分解する手法はリアルタイムレンダリングに適している [13]。分解した関数のパラメータとして入射・反射方向を用いるのが一般的であるが、half vector および difference vector というベクトルを用いる方法などもある [14]。また関数化の方法もいくつか存在し、そのひとつが Singular Value Decomposition(SVD) を用いる方法である。SVD では最小二乗解を求めることで近似・次元圧縮を行うが、SVD を用いるには BRDF を行列式に当てはめる必要がある。そのため特に測定データは扱いが難しく、係数が負の値をとることがありテクスチャで表現できないなどの欠点がある。別の関数化の方法として Homomorphic Factorization があり、この方法を用いることで上記の SVD の問題をある程度解決することができる [15][16][17]。

しかし関数化 BRDF を用いても、すべての BRDF を表現できるわけではなく、BRDF のタイプによって適したモデルは異なってくる。また反射率が場所依存になればさらに次元が増え、構造色を取り扱うためには波長による影響も考慮する必要がある。

## 2.3. 色の可視化

構造色が見せる色変化は波長により異なる性質を持つため、構造色を求めるには波長による影響を考慮する必要がある。波長依存性を考慮したレンダリングは、スペクトルレンダリングと呼ばれる。さまざまな波長を含む光はスペクトル分布 (Spectral Power Distribution) として、単位時間・面積あたりの各波長における光の強度を記述することで表現できる。

一般的に物質は波長に依存した反射率  $R(\lambda)$  を持っており、反射光のスペクト

ル分布  $I_{out}(\lambda)$  は以下の式で表現できる。

$$I_{out}(\lambda) = R(\lambda) \cdot I_{in}(\lambda) \quad (2.12)$$

ここで  $I_{in}(\lambda)$  は入射光のスペクトル分布、つまり光源が持つスペクトル分布である。反射光のスペクトル分布が構造色として観測されるが、CGのようにモニタで観察するには、色を可視化する必要がある。

色を可視化するには RGB 表色系で表現すれば良いが、まずスペクトル分布を CIE 標準表色系として各表色系の基礎となっている XYZ 表色系に変換する。XYZ 表色系では Y が明度、XZ が色度に対応している。XYZ 表色系への変換は、可視領域 (360~800nm) の波長に渡って以下の積分を行うことにより得られる。

$$X = \frac{1}{c} \int_{360}^{800} I_{out}(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (2.13)$$

$$Y = \frac{1}{c} \int_{360}^{800} I_{out}(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (2.14)$$

$$Z = \frac{1}{c} \int_{360}^{800} I_{out}(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (2.15)$$

ただし  $c$  は光の明るさである。

$$c = \int_{360}^{800} \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (2.16)$$

$\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$  はそれぞれ XYZ の等色関数を示している。

最後に得られた XYZ 表色系を、変換式により RGB 表色系に変換することで色を可視化することができる。しかしスペクトルレンダリングでは、可視領域にわたる積分計算が必要となりリアルタイム処理には向いていない。

## 2.4. CG での構造色表現に関する過去の研究

Gondek らは半球状に格納した BRDF とレイトレーシングを用いて、薄膜による干渉を表現している [18]。Sun らも同じく薄膜による干渉および、微細構造を単純なモデルで置き換えることにより、コンパクトディスクにみられる構造色を再現している [19][20]。コンパクトディスクの構造色の再現は、光を波と捉え、回折現象をシミュレートすることで Tsingos や Stam によっても行われている [21][22]。

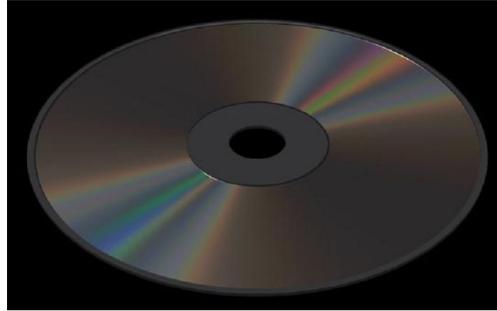


図 2.10 Rendering Iridescent Colors of Optical Disks[19]

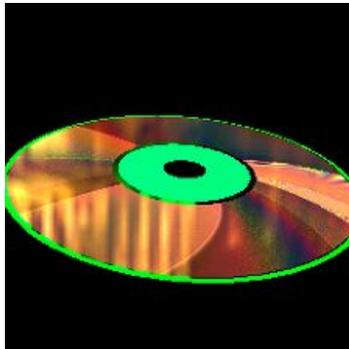


図 2.11 A Geometrical Approach to Modeling Reflectance Functions of Diffracting Surfaces[21]

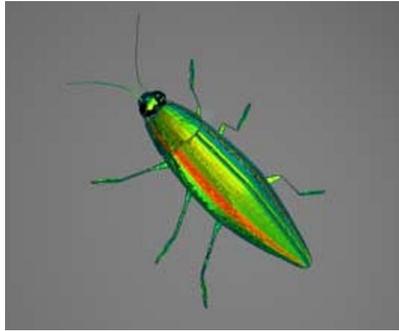


図 2.12 Diffraction Shaders[22]

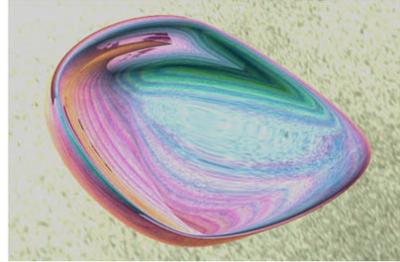
Hirayama らは各層の再帰的な計算により、多層膜のモデル化手法を提案し [23]、同手法の応用例として玉虫や貝がもつ構造色を再現している [24]。上記先行研究はいずれも波長による影響を考慮し、レイトレーシングを用いた描画であるため、実時間での実装はなされていない。

Isidoro らは法線と入射光との内積値を座標に持つテクスチャを用いることで、視点依存の薄膜をリアルタイムで描画する手法を紹介しており [25]、Tatarchuk らは同手法を蝶の翅に適用して視点依存の色を表現している [26]。しかし彼らの手法では生じる色に物理的根拠がなく、光源の位置にも無関係である。

Iwasaki らはしゃぼん玉を描画対象とした、薄膜による構造色のリアルタイム



(a) buprestid beetle



(b) seashell

図 2.13 Rendering Iridescent Colors Appearing on Natural Objects[24]



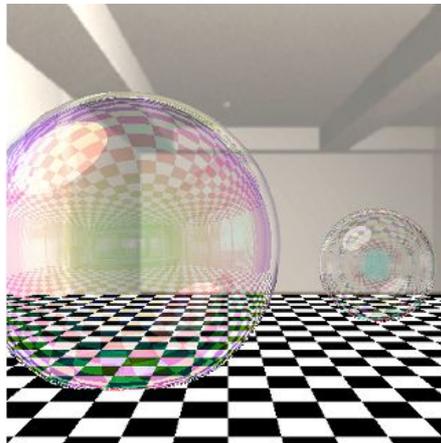
図 2.14 Bubble Shader[25]

レンダリング手法を提案している [27]。同手法では入射成分と薄膜の厚みを座標とするテクスチャを用いることで、リアルタイムでの描画を実現しているが、光源位置による色の変化は実装していない。

いずれの先行研究においても、特定の対象に特化したモデルを構築することで描画を行っているため、汎用的な構造色を取り扱うことはできない。



☒ 2.15 Simulation of Iridescence and Translucency on Thin Surfaces[26]



☒ 2.16 Real-Time Rendering of Soap Bubbles Taking into Account Light Interference[27]

# 第3章 汎用的な 構造色のレンダリング手法

先行研究により、テクスチャをテーブルとして用いる方法は、リアルタイムレンダリングに有効であるといえる。しかし何れの手法も特定の対象に特化しており、構造色を統一的に取り扱う手法は確立されていない。

本章では構造色を生む光路差に着目した、汎用的な構造色レンダリング手法を提案する。

## 3.1. 光路差をパラメータとした構造色の表現

構造色は視点位置、照明環境、色が生じる位置、波長といった複数の要素によって変化するため多次元で捉える必要がある。しかし 2.1 で述べたように、微細構造の違いにより生じる構造色はいくつかあるが、いずれの構造色も光路差を持つ複数の波による干渉の結果である。つまりこの光路差により構造色を捉えることで、光路差という一つのパラメータのみでさまざまな構造色を表現できる。

上記の考えに基づいた、本提案手法の概略図を図 3.1 に示す。視点・光源位置をそれぞれ  $L$  および  $E$ 、法線を  $N$ 、テクスチャ座標を  $UV$  とする。以降の説明も図 3.2 に従う。本手法はリアルタイムでの描画を想定しているため、光路差などはすべてテクスチャで表現される。テクスチャは光路差と色に関する 2 種類に大きく分けられる。光路差では 2 枚のテクスチャが用いられ、それぞれ場所依存テクスチャ、視点・光源依存テクスチャ、両テクスチャをあわせて光路差テクスチャと呼ぶ。また色に関して用いられてるテクスチャは色テクスチャと呼び、入射光および反射光の光路差に対する構造色が格納されているテクスチャは、構造色テクスチャと呼ぶこととする。

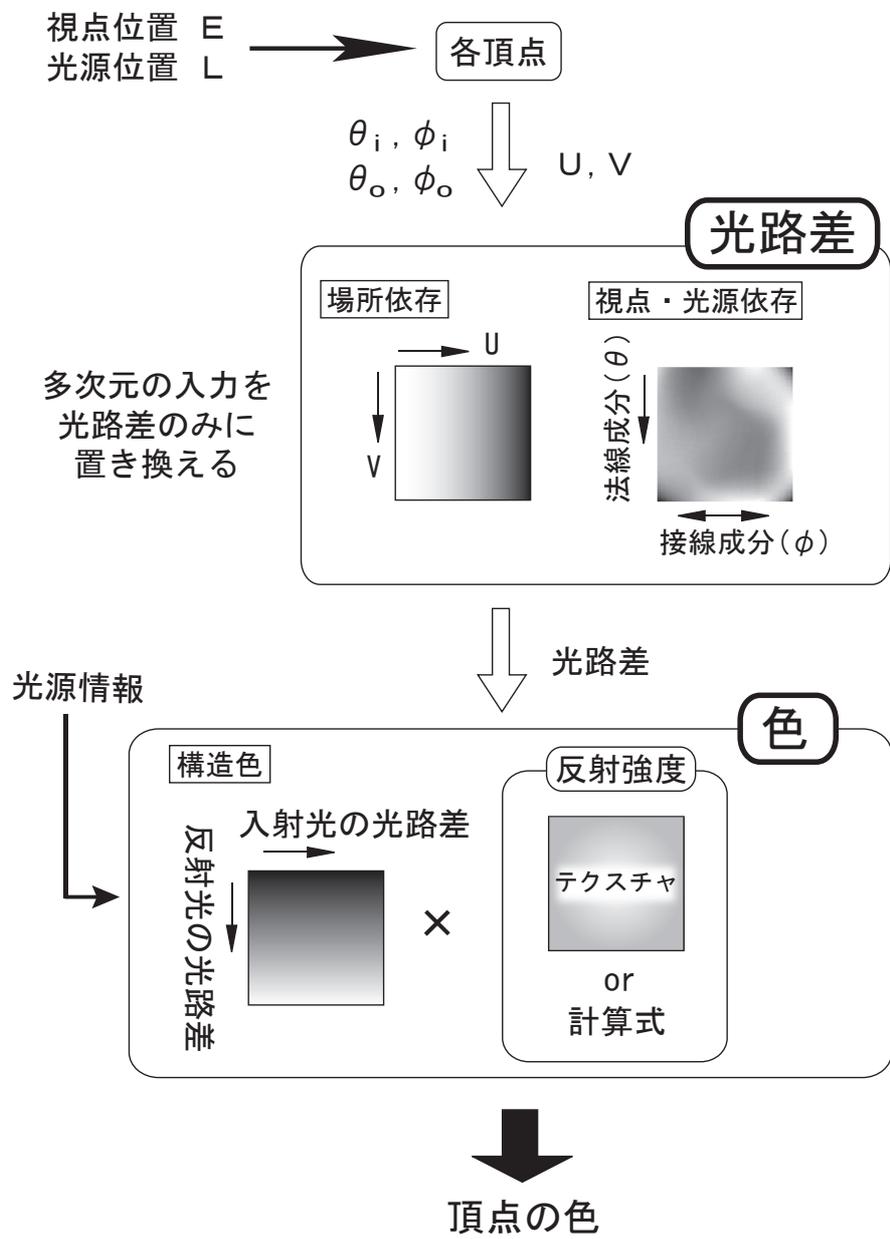


図 3.1 概略図

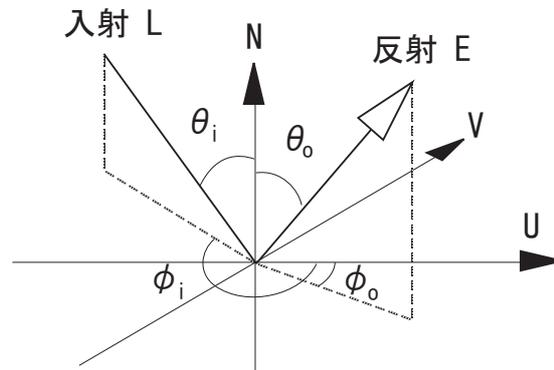


図 3.2 視点位置と光源位置

光路差テクスチャは光路差情報を格納したテーブルとして使用され、物体表面に対する相対的な視点・光源位置を示す  $\theta_i$ 、 $\phi_i$ 、 $\theta_o$ 、 $\phi_o$  およびテクスチャ座標  $U$ 、 $V$  を入力として受け取り、光路差情報を出力する。これにより多次元の入力情報を、光路差のみに置き換え次元数を削減する。

色テクスチャは光路差テクスチャで得られた光路差を元に、対象としている光源の種類と微細構造を考慮して生じる色を決定するために用いられる。テーブルとして使用される光路差テクスチャとは異なり、色テクスチャは実際にオブジェクトにマッピングされる。

### 3.2. 光路差テクスチャ

光路差テクスチャは図 3.3 の場所依存と視点・光源依存の 2 つのテクスチャで構成される。場所依存テクスチャは、オブジェクト上の場所により変化するパラメータを表現するテクスチャである。テクスチャの座標軸はオブジェクトの  $UV$  座標に対応しており、場所に依存した情報が格納されている。場所依存の情報としては薄膜の厚みなどがあり、シャボン玉に見られる厚み分布などを表現することができる。場所依存テクスチャは状況に応じて用いられるテクスチャであり、場所依存の情報が必要なければ使用しなくても良い。

視点・光源依存テクスチャは、視点および光源位置による光路差の変化を表現するテクスチャである。テクスチャは図 3.3 の座標軸をもち、横軸に法線成分、縦

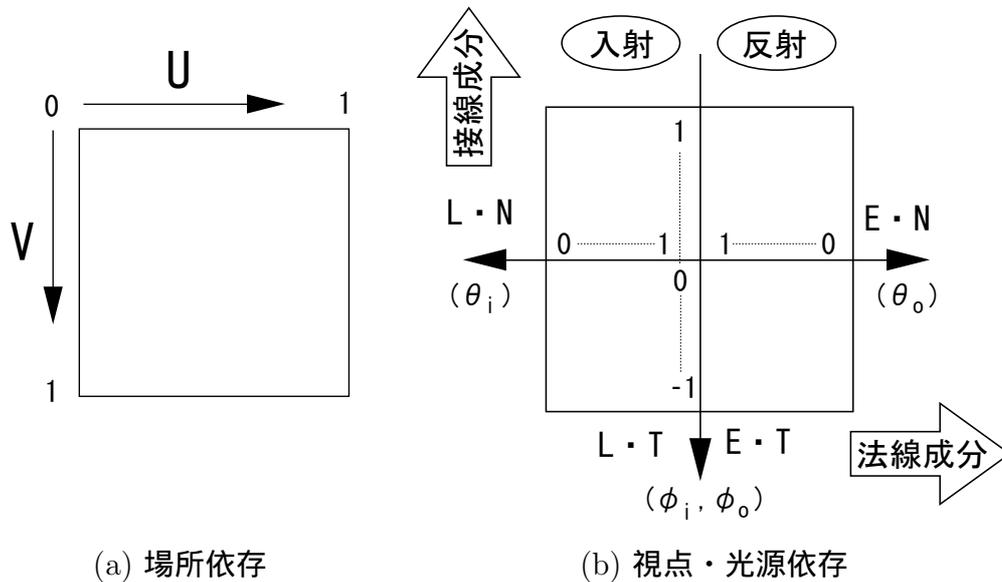


図 3.3 光路差テクスチャの定義

軸に接線成分が対応している。ただし  $T$  は接線ベクトルであり、テクスチャ座標の  $U$  の方向を持つ単位ベクトルである。左半分が光源位置による光路差であり、光源  $L$  により  $L \cdot N$  および  $L \cdot T$  が決まる。同様に右半分が視点位置による光路差であり、視点  $E$  により  $E \cdot N$  および  $E \cdot T$  が決まる。よってテクスチャの中心がオブジェクトの面に垂直な位置、つまり法線上に視点・光源がある場合に対応する。中心から横軸方向に離れるに従い、法線軸に対する角度  $\theta_i$ 、 $\theta_o$  が増加する方向への傾きに対応している。縦軸方向の上部へ近づくと  $U$  軸に近づく回転であり、下部は  $-U$  軸へ近づく回転となる。このような座標軸を設定することにより、視点・光源により変化する光路差のイメージを視覚的に捉えることができる。

場所依存および視点・光源依存ともにテクスチャの値は光路差のみであるため、グレースケールで表現され  $0 \sim 1$  に正規化して用いる。

光路差テクスチャにより得られた視点と光源による 2 つの光路差情報が、次節の色テクスチャに渡される。このとき渡される最終的な光路差は、場所依存と視点・光源依存の 2 つのテクスチャから求める。例えば薄膜の場合、両テクスチャを乗算することで得られる。これは光路差を場所依存と視点・光源依存の乗算で表現し、対応するテクスチャに格納して用いているためであるが、詳しくは 4 章

の実装で述べる。

干渉に關与する波が2つの場合、生じる光路差は1つであるが、複数の波による干渉では光路差は1つではなく複数存在することになる。しかしその時も本手法では、格納する光路差に関しては1つのみである。なぜなら対象としている微細構造が既知であるため、1つの光路差から他の光路差を導出可能なためである。

例えば多層膜の場合、2.1.2節で述べたように薄膜の数だけ光路差が存在することになるが、最上層で生じる光路差のみ選択し格納すれば、他の層による光路差も算出することができる。厳密には入射方向に依存する最上層の光路差がわかれば、他の層における入射方向に依存する光路差を一意に決定することができる。反射方向に依存する光路差に関しても同様であり、本手法が光路差を視点と光源に依存する2つに分けて取り扱っているのはこのためである。なお格納する光路差は最上層以外で生じる光路差でも問題はなく、他の層による光路差を算出することは可能である。しかし本手法では簡単のため、生じる光路差の中で最も小さいものを代表値として用いることとする。

### 3.3. 色テクスチャ

図 3.1 における構造色テクスチャは、横軸は前項で得られた視点位置による光路差  $\Delta_{in}$ 、縦軸は光源位置による光路差  $\Delta_{out}$  になっており、各光路差により生じる構造色を RGB 値として格納している。本節では、この色テクスチャの作成方法について説明する。

#### 3.3.1 干渉波の表現

2つの波  $f_1$ 、 $f_2$  による干渉では、波の重ねあわせにより  $f_{12}$  の干渉波が得られる。

$$f_1 = A_1 \cos(\omega t) \quad (3.1)$$

$$f_2 = A_2 \cos(\omega t + \delta_2) \quad (3.2)$$

$$f_{12} = f_1 + f_2 = A_1 \cos(\omega t) + A_2 \cos(\omega t + \delta_2) \quad (3.3)$$

ただし  $\delta$ 、 $A$ 、 $\omega$ 、 $t$  はそれぞれ位相差、振幅、角周波数、時刻である。位相差  $\delta$  は光路差  $\Delta$  と波長  $\lambda$  により与えられる。

$$\delta = \frac{2\pi \cdot \Delta}{\lambda} \quad (3.4)$$

干渉波  $f_{12}$  は

$$\begin{aligned} f_{12} &= A_1 \cos(\omega t) + A_2 \cos(\omega t + \delta_2) \\ &= A_1 \cos(\omega t) + A_2 \cos(\omega t) \cos(\delta_2) - A_2 \sin(\omega t) \sin(\delta_2) \\ &= \{A_1 + A_2 \cos(\delta_2)\} \cos(\omega t) - \{A_2 \sin(\delta_2)\} \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (3.5)$$

であるから、干渉波  $f_{12}$  は振幅  $A_{12}$  をもつ波となる。

$$A_{12} = \sqrt{\{A_1 + A_2 \cos(\delta_2)\}^2 + \{A_2 \sin(\delta_2)\}^2} \quad (3.6)$$

光の強度は振幅の 2 乗に比例するので [28]、干渉波による強度  $I_{12}$  は次式で示される。

$$\begin{aligned} I_{12}(\lambda) &= \{A_1 + A_2 \cos(\delta_2)\}^2 + \{A_2 \sin(\delta_2)\}^2 \\ &= A_1^2 + 2A_1A_2 \cos(\delta_2) + A_2^2 \cos^2(\delta_2) + A_2^2 \sin^2(\delta_2) \\ &= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\delta_2) \end{aligned} \quad (3.7)$$

同様に  $n$  個の波による干渉波の強度を求める。

$$\begin{aligned} f_1 &= A_1 \cos(\omega t + \delta_1) \\ f_2 &= A_2 \cos(\omega t + \delta_2) \\ &\vdots \\ f_n &= A_n \cos(\omega t + \delta_n) \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$I(\lambda) = \sum_{i=1}^n A_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n 2A_i A_j \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (3.9)$$

これより、干渉波による強度はそれぞれの波の強度と、干渉項と呼ばれる第 2 項との加算により表現できる。

### 3.3.2 色の前計算

構造色を生む材質が持つ波長に依存する反射率  $R(\lambda)$  は、式 (3.9) の複数の波による干渉波の強度と考えられる。

この反射率を用いて 2.3 節に従い、色の可視化を行う。式 (2.12) を式 (2.13 ~ 2.15) に代入すると

$$X = \int_{360}^{800} R(\lambda) \cdot I_{in}(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (3.10)$$

$$Y = \int_{360}^{800} R(\lambda) \cdot I_{in}(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (3.11)$$

$$Z = \int_{360}^{800} R(\lambda) \cdot I_{in}(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (3.12)$$

となる。いま式 (3.9) を反射率と考えているので  $R(\lambda) = I(\lambda)$  であり、上式の  $R(\lambda)$  に代入すると次のようになる。

$$X = \int_{360}^{800} \left\{ \sum_{i=1}^n A_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n A_i A_j \cos(\delta_i - \delta_j) \right\} \cdot I_{in}(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (3.13)$$

ただしここでは簡単のため  $X$  の結果のみを示す。同様の計算により XYZ 表色系が得られ、変換式により RGB 値に変換することで可視化することができる。しかし厳密な色計算をおこなうためには、可視領域全域にわたっての積分計算をする必要があり時間がかかる。そこでさらに上式を分解すると

$$\begin{aligned} X &= \int_{360}^{800} \left\{ \sum_{i=1}^n A_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n A_i A_j \cos(\delta_i - \delta_j) \right\} \cdot I_{in}(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ &= \int_{360}^{800} \sum_{i=1}^n A_i^2 \cdot I_{in}(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda + \int_{360}^{800} \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n A_i A_j \cos(\delta_i - \delta_j) \cdot I_{in}(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ &= C \sum_{i=1}^n A_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n A_i A_j V_{ij}(\Delta_{ij}) \end{aligned} \quad (3.14)$$

ここで  $C$  および  $V_{ij}(\Delta_{ij})$  は

$$C = \int_{360}^{800} I_{in}(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} V_{ij}(\Delta_{ij}) &= \int_{360}^{800} \cos(\delta_i - \delta_j) \cdot I_{in}(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ &= \int_{360}^{800} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta_{ij}\right) \cdot I_{in}(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (3.16)$$

ただし

$$\Delta_{ij} = \Delta_i - \Delta_j \quad (3.17)$$

$$\delta_i = \frac{2\pi \cdot \Delta_i}{\lambda} \quad (3.18)$$

$$\delta_o = \frac{2\pi \cdot \Delta_o}{\lambda} \quad (3.19)$$

となる。 $C$  は光源のスペクトル分布  $C_{in}$  が変化しない限り一定な値をとり、 $V_{ij}(\Delta)$  は光路差  $\Delta$  を変数とする関数になる。そこであらかじめ、 $C$  および起こりうる光路差  $\Delta$  の範囲内で  $V_{ij}(\Delta)$  を計算しておく。これにより式 (3.13) の積分は単純な加算に置き換えることができ、計算コストを大幅に削減することができる。

### 3.3.3 色の決定

構造色テクスチャは、入射光つまり視点位置により変化する光路差  $\Delta_{in}$  と、反射光つまり光源位置により変化する光路差  $\Delta_{out}$  を座標軸にもつ 2 次元テクスチャである (図 3.4)。よって全体の光路差  $\Delta$  は両者を加算することで得られる。

$$\Delta = \Delta_{in} + \Delta_{out} \quad (3.20)$$

なお光路差が複数存在する場合は、3.2 節で述べたように、現在対象にしている微細構造を考慮しながら、 $\Delta$  より他の光路差を算出する。この光路差から生じる色を前節の手法により求めて、最終的に得られた RGB 値を格納する。

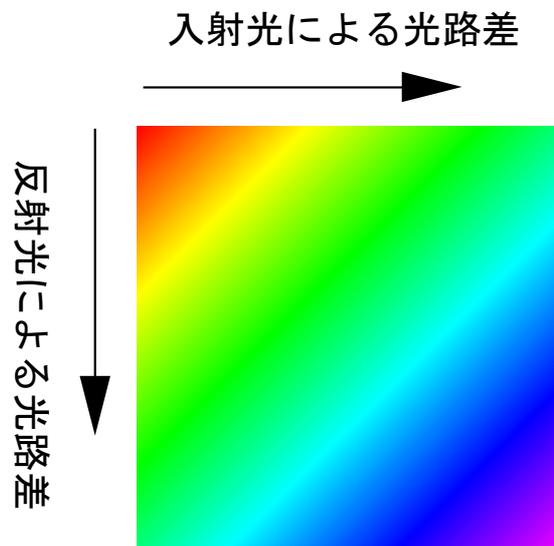


図 3.4 構造色テクスチャ

上記手順で得られた構造色テクスチャが、直接オブジェクトにマッピングされる。つまり光路差テクスチャから得られた光路差により、色テクスチャの UV 座標が決定される。図 3.1 の色を決定するプロセスはオブジェクトであるポリゴンの頂点ごとにおこなわれるため、頂点間は線形補間により色が決定される。これは頂点間の補間が RGB という色によるものではなく、UV 座標での補間がおこなわれるということである。構造色テクスチャの UV 座標は光路差と等価であるから、結局頂点間は光路差による補間となり、色による補間に比べて構造色をより厳密に表現できることになる。

実際に描画される色は、構造色テクスチャに反射強度を乗じた値になる。反射強度は構造色とは異なり、光の波長よりも大きな構造による影響であり、波長には依存しない全波長光の強度を定義する。本研究では構造色を対象としているため、反射強度は計算式またはテクスチャのいずれによっても可能である。

## 第4章 実装と描画結果

前章までに光路差を共通のパラメータとする、汎用的な構造色レンダリング手法を提案した。本章ではいくつかの微細構造を対象に、提案手法の実装方法および描画結果を示す。

### 4.1. 実装環境

表 4.1 の環境を用いて、提案手法の実装をおこなった。

表 4.1 実装環境

OS	Microsoft Windows XP
CPU	Mobile Intel Pentium4 2.66GHz
Memory	512MB
Graphic Card	Intel 82852/82855 GM/GME Graphics Controller
プログラミング言語	C++
API	Microsoft® DirectX ®
シェーダ言語	Microsoft DirectX 9 HLSL

光路差テクスチャおよび色テクスチャを含め本手法で用いるテクスチャは、画像サイズおよび色の階調を大きくすればするほど滑らかな画像が得られるが、それだけ多くのメモリを消費する。今回はテクスチャの画像サイズが  $256 \times 256$ 、色はRGB 各8ビットのフォーマットを採用した。

## 4.2. 光路差テクスチャ・色テクスチャの作成

光路差テクスチャおよび色テクスチャは対象とする微細構造により異なるため、いくつかの構造を対象として、各テクスチャの作成方法を述べる。ただし薄膜も多層膜の1つであると考えられ、実際内部的な計算も同じであるためまとめて記述する。

なお色テクスチャの作成にあたり式(3.15)のCおよび、式(3.16)の $V_{ij}(\Delta_{ij})$ を求めるが、その際必要な等色関数としてはCIE(1964)10-deg color matching functionsを用いた[29]。さらにXYZ表色系からRGB表色系への変換には、次の変換式を用いて可視化をおこなった[30][31]。

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.240479 & -1.537150 & -0.498535 \\ -0.969256 & 1.875992 & 0.041556 \\ 0.055648 & -0.204043 & 1.057311 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

### 4.2.1 薄膜・多層膜

シャボン玉表面に見られる虹色は、薄膜による構造色である。そこでシャボン玉を描画対象として、薄膜による干渉現象を提案手法により実装する方法を述べる。薄膜により生じる光路差は2.1.1節で述べたように、式(2.6)により表現可能である。光路差テクスチャの視点・光源依存テクスチャを作成するには、光路差を入射方向に依存する光路差と、反射方向に依存する光路差とに分解する必要がある。しかし図2.3の $B'D$ は入射・反射の両方向に依存しているため、式(2.6)を分解することができない。そこで以下に述べる方法を用いて、光路差を近似的に取り扱い光路差の分解をおこなう。

図2.3において、 $\theta_i = \theta_o$ のときは、

$$BD = 2BC \sin(\theta_r) \quad (4.2)$$

と表現できるので、

$$B'D = BD \sin(\theta_i)$$

$$\begin{aligned}
&= \sin(\theta_i) \cdot 2BC \sin(\theta_r) \\
&= 2BC \frac{n_0}{n_1} \sin^2(\theta_i) \tag{4.3}
\end{aligned}$$

となる。よって  $BD'$  の光路差に関しては  $\theta_i = \theta_o$  での値を用いることで、問題となる  $BD'$  の光路差を入射方向のみに依存する項に置き換えることができる。この近似による特徴は、光路差を入射と反射に依存する2つに分解できる以外にも存在する。その1つはこの近似による結果生じる光路差の誤差が  $\theta_i = \theta_o$  のときには生じないということである。 $\theta_i = \theta_o$  とはつまり正反射方向の干渉であるが、この正反射方向は強度が最も強いため、光路差による干渉の影響も大きい。よって  $\theta_i = \theta_o$  の正反射で誤差が生じないということは、全体として誤差による影響を抑えることができる。さらにもう1つの利点として、生じる誤差は  $\theta_i = 0$  のときも0となることである。 $\theta_i = 0$  とはオブジェクトを正面から観察している状況であり、最終的な見え方に与える影響も小さくすることができる。

この近似の結果、薄膜による光路差は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
\Delta &= n_1(BC + CD) - n_0B'D \\
&= \left\{ n_1 - 2\frac{n_0^2}{n_1} \sin^2(\theta_i) \right\} BC + n_1CD \\
&= \left\{ n_1 - 2\frac{n_0^2}{n_1} \sin^2(\theta_i) \right\} \frac{d \cdot n_1}{\sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2(\theta_i)}} + \frac{d \cdot n_1^2}{\sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2(\theta_o)}} \\
&= d \frac{n_1^2 - 2n_0^2 \sin^2(\theta_i)}{\sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2(\theta_i)}} + d \frac{n_1^2}{\sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2(\theta_o)}} \tag{4.4}
\end{aligned}$$

これにより、光路差  $\Delta$  を入射方向に依存した光路差  $\Delta_i$  と、反射方向に依存した光路差  $\Delta_o$  に分解することができる。

$$\Delta_i = d \frac{n_1^2 - 2n_0^2 \sin^2(\theta_i)}{\sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2(\theta_i)}} \tag{4.5}$$

$$\Delta_o = d \frac{n_1^2}{\sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2(\theta_o)}} \tag{4.6}$$

上式において  $d$  は膜の厚みであり、シャボン玉の場合この値は通常場所によって異なる。つまり  $d$  は場所依存の情報であるため、場所依存テクスチャに格納し、

残りの項を視点・光源依存テクスチャに格納する。これにより、両テクスチャの値を乗算することで、任意の場所、視点、光源位置における光路差を得ることができる。実際に格納される値はテクスチャに書き込むため、テクスチャが持つ色の階調に応じて0～1に正規化される。ただし  $n_0 > n_1$  の薄膜では、 $\theta_i$  が一定値を超えると光路差が無限大となり全反射が起こる。当然テクスチャで無限大まで表現することはできず、そもそも光路差が大きすぎると減衰等の理由により干渉も起きない。そのため  $n_0 > n_1$  では視点・光源依存のテクスチャを作成する際、光路差の最大値として適当な値を設定し、光路差がそれ以上大きくならないようにする。

場所依存テクスチャとしては任意の濃淡画像が使用可能であり、濃淡により厚み  $d$  を表現する。つまり

$$\text{各部位の厚み} = d \times \text{正規化された場所依存テクスチャの値} (0 \sim 1) \quad (4.7)$$

で与えられる。

次に光路差テクスチャにより得られた光路差を持つ、2つの波の干渉を3.3.2節の計算により求め構造色テクスチャを作成する。その際、計算に必要な式(3.15)の  $C$  および、式(3.16)の  $V_{ij}(\Delta_{ij})$  は光源の種類に応じてあらかじめ計算した値を使用する。

多層膜の場合、光路差テクスチャは薄膜と同じである。構造色テクスチャは最上層の光路差から他の層の光路差を計算するプロセスが加わり、干渉する波が複数になる。

干渉波の計算には振幅  $A$  の値が必要であるが、振幅は波の強さを示しているため、膜の反射率  $r$  により求めることが出来る。ただし反射率は一定ではなく、入射角  $\theta_i$  に応じて変化し以下のフレネルの式に従う(図4.1)。

$$R_p = \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)} \quad (4.8)$$

$$R_s = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} \quad (4.9)$$

$\theta_t$  は屈折角であり、 $R_s$  および  $R_p$  はそれぞれS偏光とP偏光の反射率である。S偏光とは入射面に垂直な方向に振動する光であり、P偏光とは入射面に平行な方

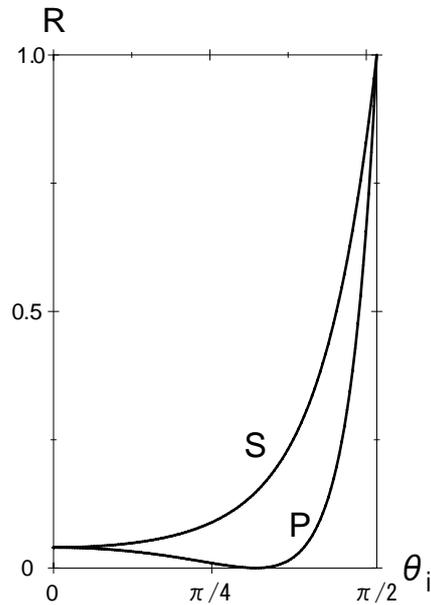
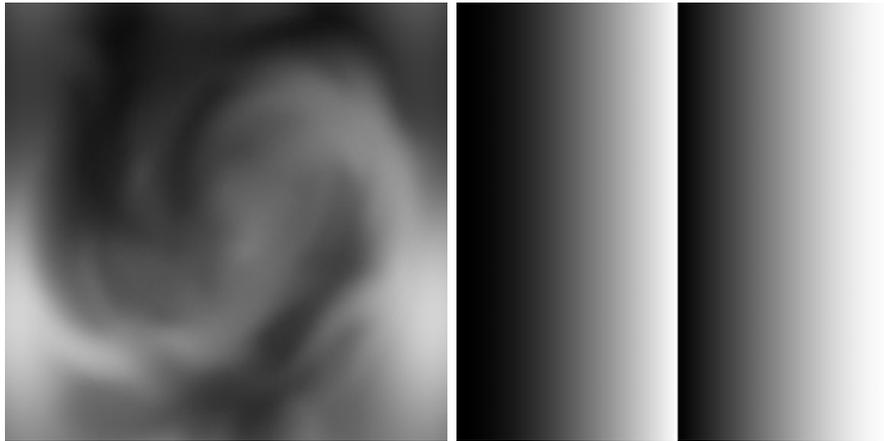


図 4.1 フレネル項 (屈折率:1.5)

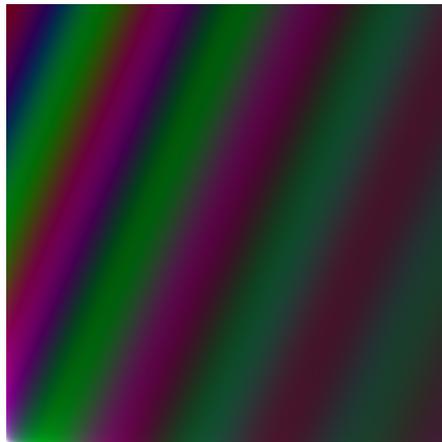
向に振動する光である。ただしここでは偏光による影響は無視するため、反射率  $r$  としては以下の式を用いる [32]。

$$r = \frac{R_p + R_s}{2} \quad (4.10)$$

以上の定式化によって薄膜および多層膜の構造は、各層の厚みと屈折率を定義することで表現できる。今回はシャボン玉を想定しているため、屈折率は溶液により異なるが、水の 1.33 とする。またシャボン玉の厚みは最大で  $1000nm$  程度であるので、厚み  $d$  を  $1000nm$  とし場所依存テクスチャの濃淡により  $0 \sim 1000nm$  の厚み分布を表現する。実際に作成したテクスチャは図 4.2 であるが、場所依存テクスチャは任意であり、示したテクスチャはその一例である。なお比較のため、膜の厚みをすべて同じとし、屈折率を変化させた場合の各テクスチャを図 4.3 に示す。屈折率 0.9 の結果では全反射が生じるため、光路差は膜の厚みの 5 倍に制限した。しかし図 4.3 (c) の視点・光源依存テクスチャの結果を見る限り、256 階調では表現できない印象を受ける。

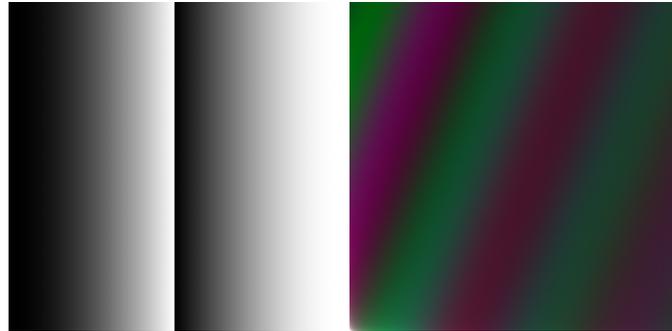


(a) 場所依存テクスチャ (b) 視点・光源依存テクスチャ



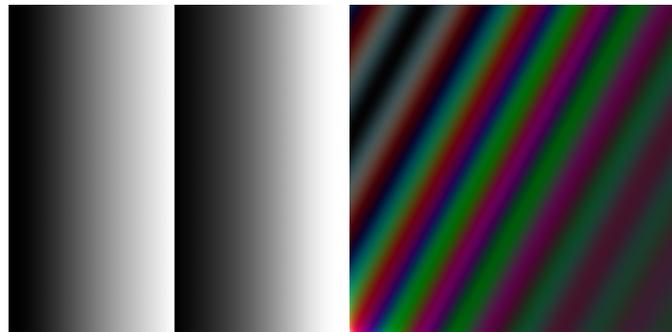
(c) 構造色テクスチャ

図 4.2 シャボン玉を想定したテクスチャ( $n = 1.3$ )



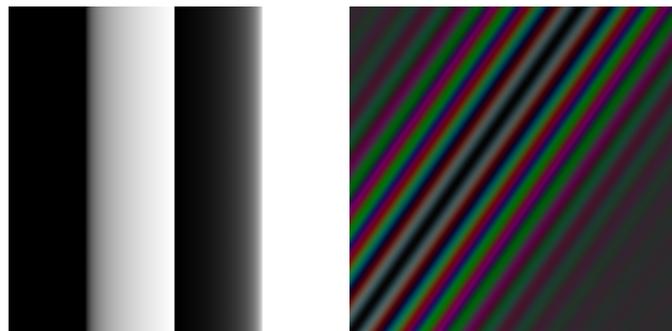
視点・光源依存      構造色テクスチャ

(a) 屈折率  $n = 1.5$



視点・光源依存      構造色テクスチャ

(b) 屈折率  $n = 1.1$



視点・光源依存      構造色テクスチャ

(c) 屈折率  $n = 0.9$

図 4.3 屈折率の違いによるテクスチャの比較

## 4.2.2 回折格子

回折格子による構造色の実装を、コンパクトディスク (CD) 表面に見られる虹色を対象に説明する。CD の表面にはピットと呼ばれる溝があり、この凹凸が生む反射率の変化を利用して情報を格納している。CD の虹色の原因はこのピットにあり、ピットに入射した光が反射する際、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。ピットは CD 表面に多数存在し、図 4.4 のように円周方向と直径方向に並んでいる。CD のピット間距離は直径方向は等間隔に並んでいるが、円周方向は等間隔ではない。一般的な CD-ROM の場合、直径方向は 1600nm の間隔で、円周方向は 300 の倍数になる 900 ~ 3300nm の範囲内の間隔で配置されている。しかし、このピット間距離は記録される情報により異なり、ランダムであると考えられるため、近似的にその平均の値で等間隔に配置されている構造とみなすことができる。これにより CD 表面のピットは、等価的に二次元上にスリットが並んでいる回折格子と等価であると考えることができる。二次元の回折格子による干渉は、円周方向と直径方向に並んでいる 2 つの回折格子により得られる強度分布を乗算することで得られる [19]。これを実現するには各方向で回折格子による色テクスチャの UV 座標を決定し、描画の際に両者の色を互いに乗算して表示すればよい。

よって光路差テクスチャは、一次元の回折格子により生じる光路差を計算し格納することで得られる。このときの  $E$  と  $E_1$  で生じる光路差は図 4.5 の  $AA'$  であり、

$$\Delta_o = d(E \cdot T) \quad (4.11)$$

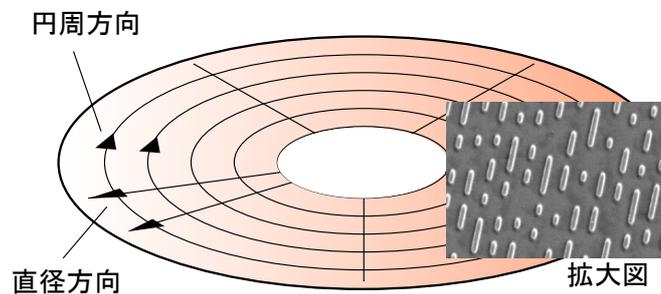


図 4.4 コンパクトディスクの拡大図

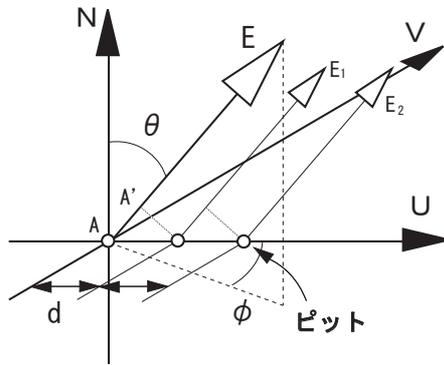


図 4.5 回折格子により生じる光路差

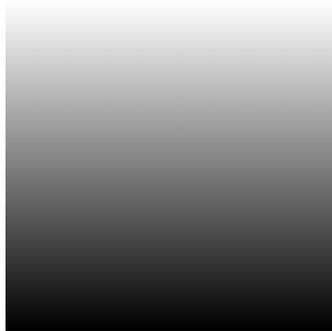


図 4.6 回折格子の光路差テクスチャ

で示される。このときピット間距離  $d$  に比べて視点  $E$  が十分遠方であれば、 $E_1$  と  $E_2$  との光路差も同じ式で与えられる。結局、ピットによる回折格子の干渉は同じ光路差を持つ複数の波の干渉と考えられる。なお入射に依存する光路差  $D_i$  も同様に、

$$\Delta_i = d(L \cdot T) \quad (4.12)$$

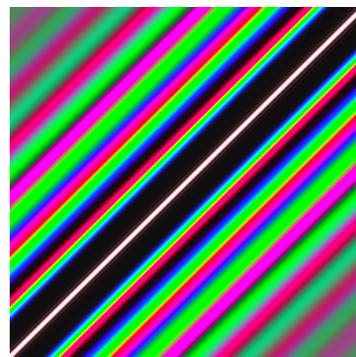
である。以上より、図 4.6 に示す視点・光源依存テクスチャが得られる。

CD の描画では場所に依存する要素がないため、場所依存テクスチャは使用しない。ただピット間距離は場所に依存しなくとも、円周方向と直径方向で異なる。この影響は光路差に場所依存テクスチャの代わりに、各方向で異なる定数値を乗算することで実現できる。しかし今回は簡単化のため、両方向で等しいピット間距離をもつ回折格子を想定して描画をおこなう。

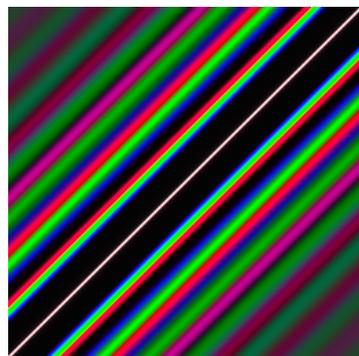
構造色テクスチャは多層膜などと同様に、得られた光路差から複数の波による干渉を計算することで得られる。問題はそのとき干渉し合う波の数であるが、これはある点の色を求める際その周囲のピットの影響をどの範囲まで考慮するかという問題に帰着する。これには関しては実際に範囲を変えて、経験的に適当な値を求める。図 4.7 に干渉に関与する波の数を変化させた場合の、各構造色テクスチャの作成結果を示す。ただしピット間距離は 2000nm として計算した。その結果、関与する波の数を 10 以上増やしてもそれ以上変化はあまり現れなかった。描画結果も考慮して、今回は波の数としては 10 を用いた。



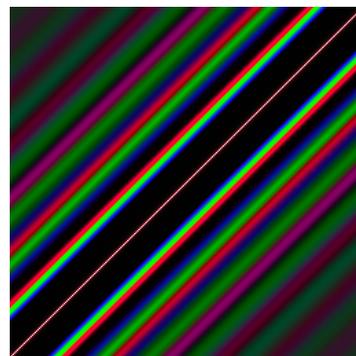
(a) ピット数 2



(b) ピット数 5



(c) ピット数 10



(d) ピット数 15

図 4.7 回折格子の構造色テクスチャ：考慮するピット数の違いによる比較

## 4.3. 描画結果

得られたテクスチャを用いて、実際に描画した結果を示す。色の決定が頂点単位で実行されるため、描画速度は対象となるオブジェクトの頂点数に依存する。今回使用したオブジェクトの場合、頂点数は多い場合でも 2000 点程であり、表 4.1 の環境において平均 30fps 以上で描画可能であった。

### 4.3.1 薄膜モデル

球体に薄膜を想定した光路差テクスチャおよび、色テクスチャを適用した描画例を図 4.8 に示す。より実際のシャボン玉に近い描画結果を得るために、球体に  $N \cdot E$  に比例した透明度を設定している [33]。また環境の映り込みを表現するために、キューブ環境マッピングを適用し、オブジェクトの頂点移動により表面の簡単な揺らぎを表現した。



(a) CIE Illuminant D65



(b) CIE Illuminant A

図 4.8 シャボン玉の描画例

図 4.8 の (a) では光源の種類として、CIE Illuminant D65 を用いている。異なる光源による描画例として、CIE Illuminant A を用いた結果が同図の (b) である。CIE Illuminant D65 は青空の光を含む昼光や北窓からの光に相当しており、CIE Illuminant A は白熱電球を規定の電圧で点灯した時に放つ光に相当している [29][34]。また図 4.9 は球体以外の描画例として、星型に薄膜モデルを適用した場

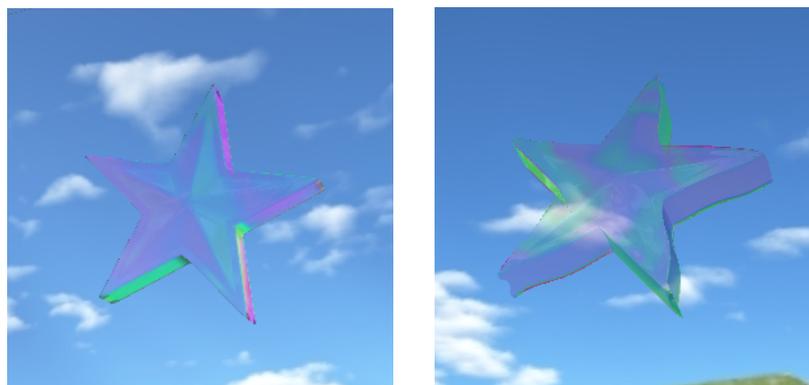


図 4.9 星型に薄膜を適用した描画例

合の結果である。さらに図 4.10 は、場所依存テクスチャの違いによる描画結果の比較である。

### 4.3.2 多層膜モデル

カメラや双眼鏡等のレンズでは、レンズに入射する光の反射を抑え、より多くの光を取り込む必要がある。そのため光の透過率を上げる目的で、反射防止膜がコーティングされている場合がある。反射防止膜は膜の上部と下部で反射した光が、膜の厚みにより生じた光路差により干渉し、打ち消しあうことで反射を抑えている。この原理により単層膜の場合、特定の波長光の反射を軽減することができるが、さらに多層にすることで他の波長光に対しても反射を抑えることができる。この多層膜により、レンズの表面では図 4.11 のような色が現れ、視点位置などにより変化する色を観察することができる。単純な反射防止膜では、反射を抑えたい波長の  $1/4$  の厚みをもつ膜を重ねた構造となる。

いま三層の多層膜において、 $n_1^2 n_3 / n_2^2 = n_0$  を満たすとき生じる反射率を 0 とすることができる。n は各層の反射率であり図 2.4 に示したとおりである。この関係を用いて、 $n_0 = 1.0$ ,  $n_1 = 1.4$ ,  $n_2 = 1.7$ ,  $n_3 = 1.5$  とした場合の描画例が図 4.12 である。一般に反射防止膜は、視感度の最も高い 550nm 前後の波長光の反射を防止するように設計されるため、これに習い膜の厚みとして 100nm と 200nm の結果を示す。描画に際してキューブ環境マッピング [35] に加え、シェーダにより擬似的な屈折表現を加えている。

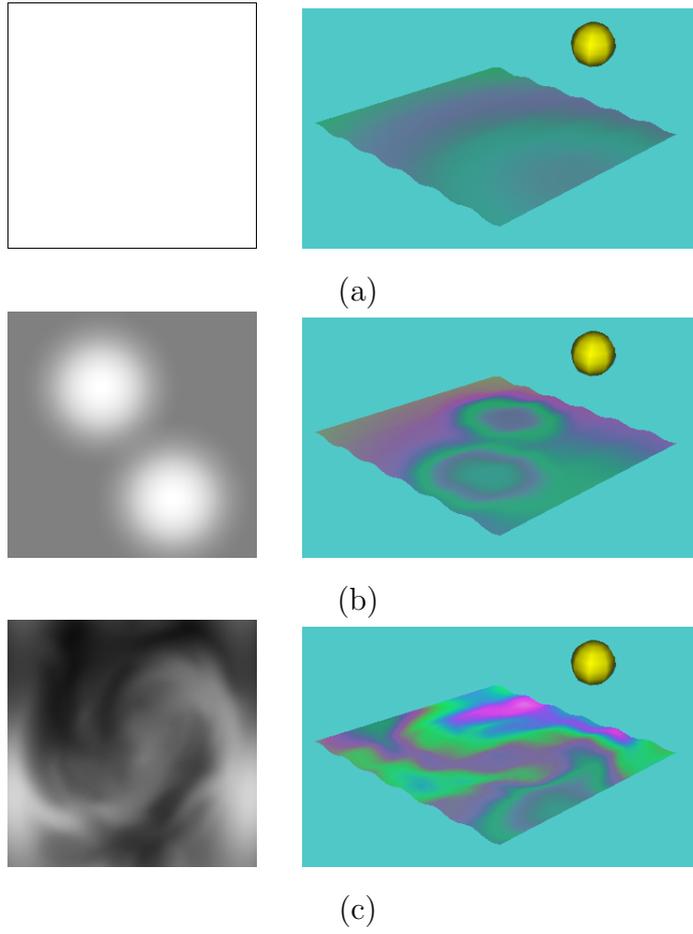


図 4.10 場所依存テクスチャの違いによる描画結果



図 4.11 レンズ表面の色変化

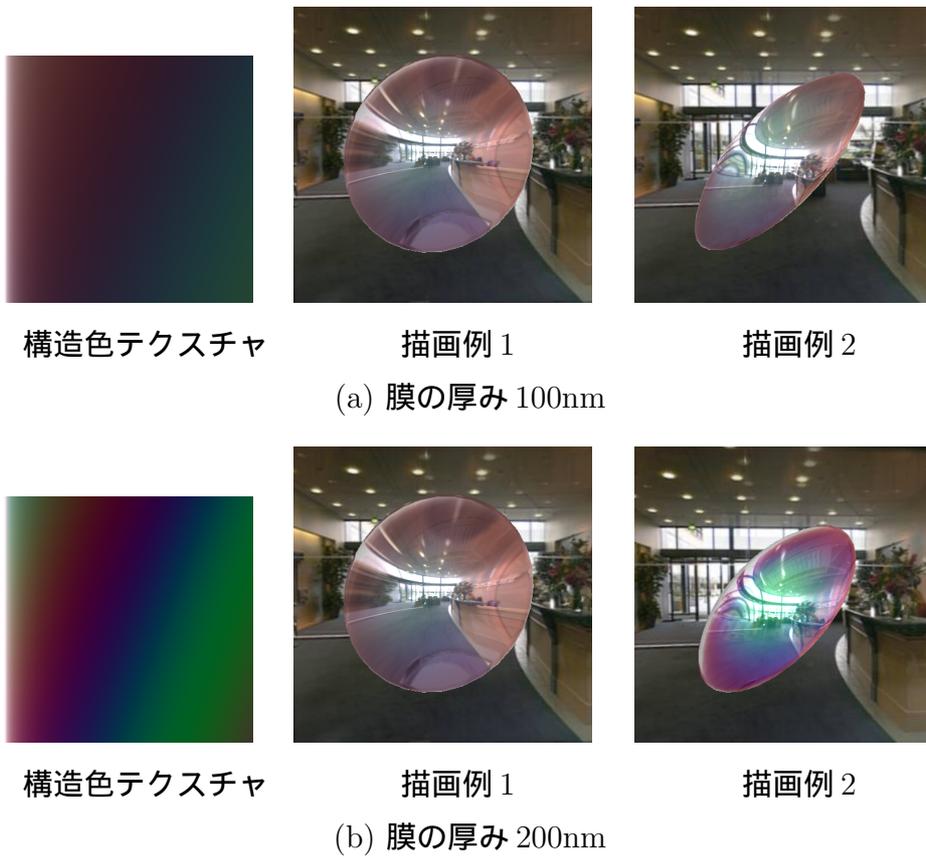


図 4.12 多層膜モデルの描画結果

### 4.3.3 回折格子モデル

4.2.2節で述べたように、CDは円周方向と直径方向に配列した回折格子とみなせるため、図4.13の方法により2枚の構造色テクスチャを用いて描画する。両方向で使用するテクスチャは全く同じであり、光路差テクスチャの縦方向の参照方法のみが異なる。直径方向の縦軸は前述の通り $L \cdot T$ または $E \cdot T$ で参照する。一方円周方向の縦軸は $L \cdot B$ または $E \cdot B$ となり、 $T$ はディスクの円周方向に一致する接線ベクトルであるのに対し、 $B$ はディスクの直径方向に一致する従法線ベクトルである。法線 $N$ 、接線 $T$ 、従法線 $B$ は互いに直交しており、

$$N = T \times B$$

の関係がある。最終的な色は、テクスチャから得られた色同士を乗算して表示することで得られる。

さらにCDの描画には次の反射強度 $R$ を乗算することで、CD表面に見られる放射状のハイライトを実現している。

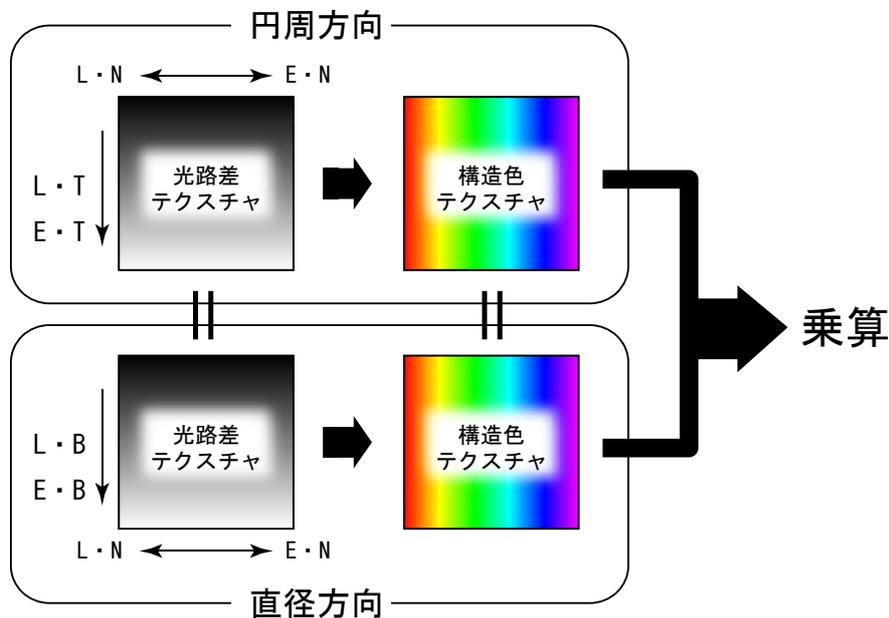
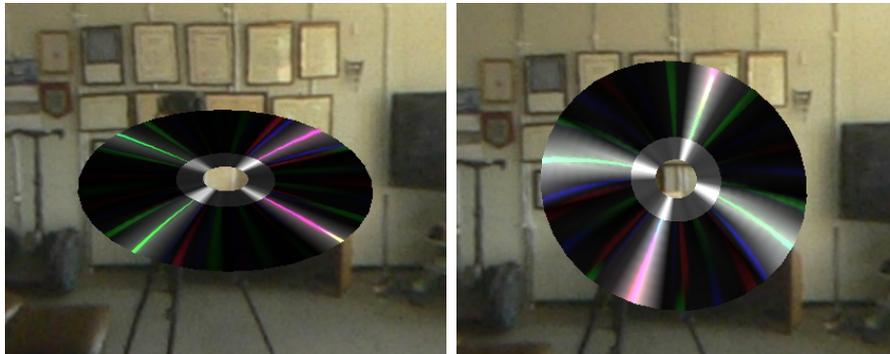


図 4.13 CDの描画方法

$$R = \frac{\sin^2(\delta)}{\delta^2} \quad (4.13)$$

上式は単スリットによる強度分布と同じであり、 $\delta$  は位相差を表しピットの幅に依存する。ゆえに反射強度  $R$  も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重要なため、ここでは可視領域における中間点の 500nm による固定値を使用した。描画例は図 4.14 に示すとおりである。



描画例 1

描画例 2



描画例 3 (光源がほぼ真上)

図 4.14 CD の描画例

## 第5章 考察

描画結果より、視点や光源位置などに応じて変化する色の描画をリアルタイムでおこなうことができた。本章ではこれらの結果および本手法の可能性に関する考察をおこなう。

### 5.1. 描画結果の考察と本手法の制限

描画結果により定性的な微細構造の表現ができたが、以下に挙げる事項を考慮することで、より実世界の対象に近づけることができると考えられる。実世界では通常、光源が複数ある環境でものを見ることが多い。一方、描画例で用いた光源はひとつである。光源が複数ある場合、各光源同士の干渉も考えなくてはならない。つまりこれは複数波の干渉であり、各光路で生じる光路差がわかれば、本手法でも実装は可能である。

また結果画像にはテクスチャを用いたことで生じる量子化誤差や、光路差の近似的な取り扱いによる影響もあり、この影響を除去することで構造色の再現性は上がるはずである。量子化誤差はテクスチャサイズや表現可能な色数を増やすことである程度対処可能であるが、これは計算機のメモリサイズや処理能力に依存する問題である。しかし別の議論として、現在、一般に流通しているディスプレイで表示できる色はRGB各8ビットが最大であるため、色テクスチャにそれ以上の色数を持たせることに意味はないことになる。

光路差の近似的な扱いは、光路差を入射光に依存する項と、反射光に依存する項に分解するために生じる。そもそも入射光・反射光に依存する項に分解するのは、複数の波をひとつのテクスチャで表現するための工夫である。つまりリアルタイムでの描画を想定しているためであり、より単純な構造での表現を求めて

の結果といえる。この問題に関しては、波の数に応じた複数の光路差テクスチャを用いる等の方法で対処できると思われる。

本手法は光路差が既知である構造色に関してはその描画が可能であるが、光路差が未知の構造色は取り扱えない。特に構造色を持つ自然界の生物の場合、その構造は非常に複雑であり完全に解明されていない部分もある。複雑な構造に対する本手法によるアプローチの1つとして、対象となる複雑な構造をいくつかの単純な構造に置き換える方法が考えられる。例えば貝殻の裏側には虹色に変化する構造色を見ることができ、これは表面にある溝による回折と、幾重にも重ねられた表皮が形成する多層膜による干渉の結果であるといわれている [36][37]。そこで回折による干渉と多層膜による干渉を、別々の光路差テクスチャと構造色テクスチャにより表現し、単純に加算することで描画した結果が図 5.1 である。実際の貝の構造はもっと複雑であり、如何に光路差で表現できる単純な構造に置き換えるかが問題である。またこのような複雑な微細構造には不規則性がみられことも多く、不規則な要素をどのように扱い、光路差により表現するのかという点も大きな課題である。

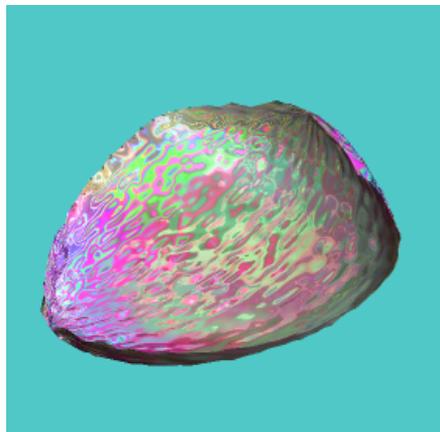


図 5.1 多層膜と回折格子の組み合わせ例

## 5.2. 本手法で用いた方法の有効性の検証

色の描画は構造色によりおこなわれるため、頂点間は色ではなく光路差により補間されるというのは既に述べた通りである。実際この手法による影響を比較した画像が図 5.2 である。頂点数が少ないほど色による補間と光路差による補間で、結果画像に違いが現われている。光路差による補間の場合、頂点数に関わらずピンク色の円状の縞が 2 本現われている。一方、色による補間では 2 つのピンクの縞の間に頂点がないと、2 つのピンクは色により補間され縞模様が消えていることが見て取れる。この影響は頂点数が多くなるほど軽減されるものの、頂点数を増やしても頂点の位置が目立ってしまい滑らかな表現はできていない。ゆえに光路差による補間は有効な手法であると言える。

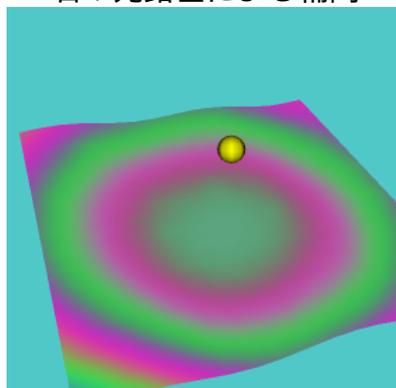
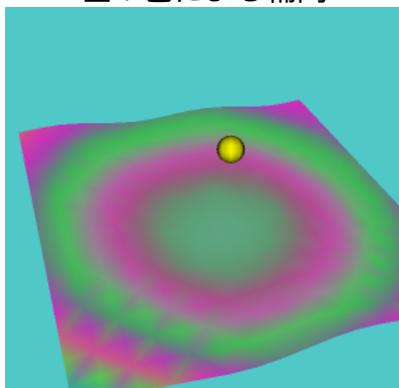
また構造色テクスチャの作成には、最も計算コストのかかる積分計算をあらかじめ行っておくことで、干渉波の計算を単純な加算により表現している。これにより構造色テクスチャ作成の高速化が期待できるが、実際に構造色テクスチャを作成するのに要する時間を計測し表 5.1 に示した。また比較のため、その都度厳密に計算した場合の作成時間も併せて示している。両者の比較からあらかじめ計算しておく手法はテクスチャ作成時間が短くなり、干渉する波の数が増すほどその効果が大きいことがわかる。その計算時間は 20 層でも 1 秒強、さらに単層の場合は 0.14 秒程度であり、異なる構造による色の違いをすぐに確認できるため、ストレスなくさまざまな構造色を観察することができる。またその都度厳密に計算した場合でさえも、単層の場合は 1 秒も要せずにテクスチャを作成することができる。これは複雑な構造色を光路差という 1 つのパラメータで表現しているため、色の計算においても光路差のみを考慮すればよいためである。

表 5.1 構造色テクスチャ作成速度の比較

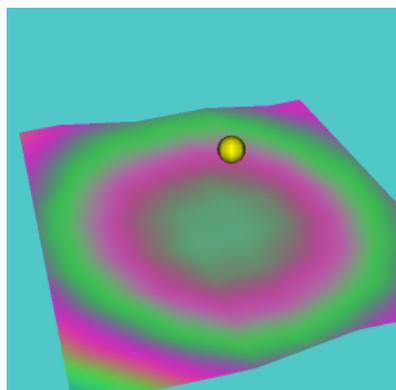
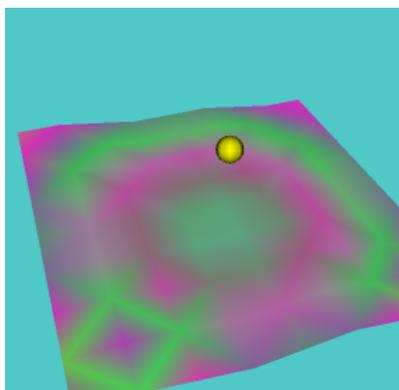
層の数	1	2	3	4	5	10	20
提案法 [ms]	141	171	220	270	314	554	1375
計算法 [ms]	323	577	944	1441	2060	6883	25463

左：色による補間

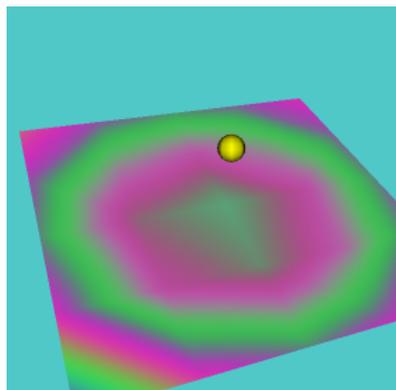
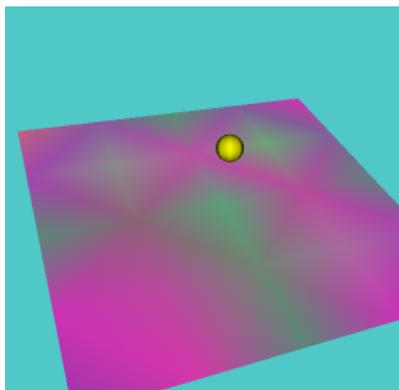
右：光路差による補間



(a) 頂点数  $16 \times 16$



(b) 頂点数  $8 \times 8$



(c) 頂点数  $4 \times 4$

図 5.2 色による補間と光路差による補間の比較

## 第6章 まとめ

本論文では様々な光学現象に起因する構造色を、光路差により表現することで一元的な管理をおこない、特定のモデルに特化しない汎用的なレンダリング手法を提案した。

光路差により表現するという本手法を用いることで、以下に挙げるような利点が考えられる。構造色を光路差という単一のパラメータで表現することにより、考慮すべきパラメータが光路差のみになるため、複雑な色計算を簡略化し、色の算出にかかる時間を短縮することができる。さらに光路差をテクスチャにより表現することで、GPUとの親和性が向上し、リアルタイムレンダリングを可能にしている。

本手法ではテクスチャによる構造色の表現として、光路差テクスチャおよび色テクスチャを導入した。これにより視覚的に微細構造が確認でき、場所に依存した色変化を表現することができる。さらにテクスチャを替えることで、異なる微細構造や光源により生じる色の違いを容易に比較することも可能となる。

本論文ではいくつかの微細構造を対象とし、本手法による実装および描画結果を示した。観察者は任意の視点位置および照明環境における色変化を、リアルタイムに観察することができた。これにより光路差を共通のパラメータとして用いる本手法は、光路差が既知である構造色に対しては有効であると考えられる。よってVRアプリケーションなどへ応用することで、比較的容易な実装にも関わらず、より材質の性質を反映した、リアリティのある映像を提供することができると考えられる。

今後の課題としては、光路差での表現が難しい複雑な微細構造の取り扱いであり、それらを如何に光路差で表現するかということが挙げられる。考察において、複雑な構造に対するアプローチの一案として、複雑な微細構造を単純な微細構造

の組み合わせに置き換えることで、ある程度複雑な構造にも適用できる可能性を示した。また未知の微細構造に対しては、各テクスチャを編集することで、逆に対象としている微細構造を推測するといった応用例なども考えられる。

## 謝辞

本研究の機会およびその環境与えてくださり、多岐にわたり貴重な御指導・御鞭撻を賜りました、情報科学研究科像情報処理学講座 千原國宏教授に深く感謝いたします。

副指導教官として数多くの御助言を頂きました視覚情報メディア講座 横矢直和教授に深く感謝いたします。

研究内容および本論文の執筆にわたり手厚く御指導を頂きました情報科学研究科 眞鍋佳嗣助教授に深く感謝いたします。

ミーティングにおいて多くの有用な情報と丁寧な御指導を頂きました像情報処理学講座 安室喜弘助手に厚く御礼申し上げます。研究全般にわたり様々な面で御指導を頂き、本論文の執筆にあたっては内容の推敲と多くの検討を加えて頂いた像情報処理学講座 井村誠孝助手に厚く御礼申し上げます。

報告会や発表練習の場において、数多くの有益な御助言を頂きました情報科学研究科 長縄美香研究員、坂田宗之研究員、報告資料の作成において英文の添削をして頂いた Damien Douxchamps 研究員に深く感謝いたします。

日頃より研究室内に気を配り、暖かい御支援を頂きました像情報処理学講座秘書 山田真絵さん、元像情報処理学講座秘書 田畑桂子さんに深く感謝いたします。

研究室内で共に過ごすことができた像情報処理学講座博士後期課程、博士前期課程の皆様に対し、日常生活を含めた多くの場面で暖かい御厚情を賜りましたことを心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] 日本ペイント株式会社. マジョーラ公式サイト.  
URL : <http://www.maziora.com/>, 2002.
- [2] 日本油脂株式会社. 日本油脂 - 事業案内 (塗料事業).  
URL : <http://www.nof.co.jp/depart/toryou.htm>, 1998.
- [3] 帝人ファイバー株式会社. 帝人ファイバー株式会社.  
URL : <http://www.teijinfiber.com/sozai/sozaimorpho.html>, 2004.
- [4] 沢小百合, 長縄美香, 増田泰, 安室喜弘, 眞鍋佳嗣, 千原國宏. 生体観察のための多面鏡を用いた3次元イメージング手法. 2004年映像情報メディア学会冬季大会 講演論文集 13-8(CD-ROM), December 2004.
- [5] J.C.Gonzato and B.Pont. A phenomenological representation of iridescent colors in butterfly wings. *WSCG 2004, SHORT Communication Papers proceedings*, Vol. 12, No. 1-3, p. 79, 2004.
- [6] M.Imura, T.Abe, I.Kanaya, Y.Yasumuro, Y.Manabe, and K.Chihara. Rendering of 'play of color' using stratified model based on amorphous structure of opal. In *Proceedings of the VIIth Biennial Australian Pattern Recognition Society Conference*, pp. 349–358, 2003.
- [7] 色いろいろ.  
URL : <http://ww8.tiki.ne.jp/takam/>.
- [8] 構造色研究会. Society of structural colors.  
URL : <http://mph.nb.fbs.osaka-u.ac.jp/ssc/>.
- [9] 草川徹, 横田英嗣. 光学の原理 II. 東海大学出版会, 1995年 第9刷.
- [10] C.Schlick. An inexpensive BRDF model for physically-based rendering. *Proceeding of the International Conference Eurographics*, pp. 233–234, 1994.

- [11] J.F.Blinn. Models of light reflection for computer synthesized pictures. In *SIGGRAPH 1977 Conference Proceedings*, pp. 192–198, 1977.
- [12] K.E.Torrance and E.M.Sparrow. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces. *Journal of the Optical Society of America* 57, pp. 1105–1114, 1967.
- [13] J.Kautz and M.D.McCool. Interactive rendering with arbitrary BRDFs using separable approximations. In *Proceedings of the 10th Eurographics Workshop on Rendering*, pp. 281–292, June 1999.
- [14] S.M.Rusinkiewicz. A new change of variables for efficient BRDF representation. In *In Eurographics Workshop on Rendering*, pp. 11–23, June 1998.
- [15] M.D.McCool, J.Ang, and A.Ahmad. Homomorphic factorization of BRDFs for high-performance rendering. *SIGGRAPH*, Vol. 35, pp. 171–178, 2001.
- [16] Latta and Kolb. Homomorphic factorization of BRDF-based lighting computation. *SIGGRAPH*, pp. 509–516, 2002.
- [17] F.H.Cole. *Automatic BRDF Factorization*. PhD thesis, Harvard University, April 2002.
- [18] J.S.Gondek, G.W.Meyer, and J.G.Newman. Wavelength dependent reflectance functions. In *Proceedings of SIGGRAPH*, pp. 213–220, 1994.
- [19] 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.
- [20] Y.Sun, F.D.Fracchia, T.W.Calvert, and M.S.Drew. Deriving spectra from colors and rendering light interference. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 19, pp. 61–66, 1999.

- [21] N.Tsingos. A geometrical approach to modeling reflectance functions of diffracting surfaces. In *Eurographics Workshop on Rendering*, 2000.
- [22] J.Stam. Diffraction shaders. In *SIGGRAPH*, pp. 101–110, August 1999.
- [23] H.Hirayama, K.kaneda, H.Yamashita, and Y.Monden. An accurate illumination model for objects coated with multilayer films. *Eurographics 2000*, pp. 145–150, 2000.
- [24] H.Hirayama, Y.Yamaji, K.Kaneda, H.Yamashita, and Y.Monden. Rendering iridescent colors appearing on natural objects. *Pacific Graphics 2000*, p. 15, 2000.
- [25] J.Isidoro and D.Gosselin. Bubble shader. Technical report, ShaderX, Wordware Inc., 2002.
- [26] N.Tatarchuk and C.Brennan. *Simulation of Iridescence and Translucency on Thin Surfaces*. Shader Programming Tips and Tricks with DirectX 9.
- [27] K.Iwasaki, K.Matsuzawa, and T.Nishita. Real-time rendering of soap bubbles taking into account light interference. *Computer Graphics International 2004(CGI'04)*, pp. 344–348, 2004.
- [28] 栖原敏明. 光波光学 (Optical-wave Engineerign). 株式会社 コロナ社, 1998 年初版第一刷発行.
- [29] CVRL Color & Vision database.  
URL :<http://cvrl.ioo.ucl.ac.uk/>.
- [30] B.Gralak, G.Tayeb, and S.Enoch. Morpho butterflies wings color modeled with lamellar grating theory. *Optics Express*, Vol. 9, No. 11, pp. 576–578, 2001.
- [31] M.Stokes (Hewlett-Packard), M.Anderson (Microsoft), S.Chandrasekar (Microsoft), and R.Motta (Hewlett-Packard). A standard default color space for

the internet - sRGB. November 5,  
URL :<http://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB> 1996.

- [32] Y.Sun. *A Spectrum-Based Framework for Realistic Image Synthesis*. PhD thesis, Department of Computing Science, Simon Fraser University, 2000.
- [33] D.Baker and C.Boyd. DirectX shader applications. Game Developers Conference 2001 DirectX Developer Day presentation slide.
- [34] 千々岩英彰. 色彩学概論. 東京大学出版会, 2003 年 第 4 刷.
- [35] NVIDIA Corporation. Nvidia developer web site.  
URL : <http://developer.nvidia.com>.
- [36] T.L.Tan, D.Wong, and Paul Lee. Iridescence of a shell of mollusk *haliotis glabra*. *Optics Express*, Vol. 12, No. 20, pp. 4847–4854, October 04 2004.
- [37] Y.Liu, J.E.Shigley, and K.N.Hurwit. Iridescent color of a shell of the mollusk *pinctada margaritifera* caused by diffraction. *Optics Express* 4, Vol. 4, No. 5, pp. 177–182, March 01 1999.