

## 構造色を持つ宝石の CG 表現

熱田 一仁<sup>†</sup> 藤堂 英樹<sup>†</sup> 柿本 正憲<sup>†\*</sup>

<sup>†</sup>東京工科大学 メディア学部 メディア学科 \*UEI リサーチ

### 1. はじめに

宝石を CG で表現するという試みは以前から行われてきている。先行研究としてダイヤモンドや真珠、オパールを扱ったもの等がある。しかしながら、ブルームーンストーンなどのある種の宝石が持つ構造色に起因する現象はあまり多く研究されていない。構造色を CG で表現することにより、宝石を動かした時の色の見え方の変化といった、写真では分かりにくい情報を伝えることが可能になる。本研究では、撮影画像を参考にして構造色の現象を推定し、レイトレーシング法を用いて再現することを試みた。

### 2. 関連研究

関連研究として宝石を CG で表現するものと構造色を CG で表現するものがある。宝石関連の研究では、光の散乱と回折を考慮しボリュームモデルを用いてオパールを表現するもの[1]や多層薄膜を考慮して真珠を表現するもの[2]がある。

構造色関連の研究では光路差をテクスチャで表現することで構造色を表現するもの[3]がある。この研究では1次反射のみしか扱っていないが、本研究ではレイトレーシング法により2次以上の反射や屈折・透過も伴う構造色表現を行いブルームーンストーンの描画を行う。

### 3. 提案手法

#### 3.1 構造色のための薄膜モデル

本研究では宝石の構造色が内部に存在する薄膜で生じていると仮定する。そこで、宝石の形状モデル内に板状のポリゴンを配置する。そのポリゴン上で光の反射は薄膜の表面と裏面で起こると仮定し、2つの反射光の光路差に基づく光波の干渉の結果として構造色を求める。

図1に薄膜モデルの例を示す。薄膜の光の透過率は一定ではなく、その値の分布をテクスチャ画像として設定する。この分布に基づき、背景側からの透過光と次節で述べる構造色の干渉光との色を合成する。



図1 スクエアカットの宝石形状モデル内に配置した薄膜モデル例

#### 3.2 薄膜における干渉計算

処理の手順としてはまず2つの反射光の光路差を求め、次に光路差から各反射光の位相を求める。波の重ね合わせにおける位相差によって変化した光の強度を、複数のサンプル波長に基づき計算する。これらの光の強度にXYZ等色関数と照明の分光分布を掛け合わせ波長 $\lambda$ の分だけ積分計算し、最終的にはRGB値を求める。

薄膜上で発生する光の干渉モデルを図2に示す。

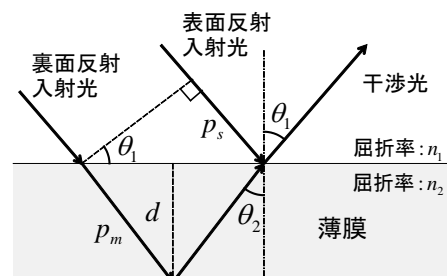


図2 薄膜における干渉の模式図

ここで、 $d$ は薄膜厚、 $p_m$ は薄膜内部反射の幾何学的光路長の片道分、 $p_s$ は、内部反射と干渉する薄膜表面反射光の光路長、 $\theta_1, \theta_2$ は薄膜表面の干渉光の出射角および薄膜内側からの入射角である。 $n_1, n_2$ はそれぞれ宝石、薄膜の屈折率である。薄膜表面反射光および裏面での内部反射光の光学的光路差 $D$ は次のようになる。

$$D = 2n_2 p_m - n_1 p_s \quad (1)$$

ここで、各幾何学的光路長は次式で得られる。

$$p_m = \frac{d}{\cos \theta_2} \quad (2)$$

$$p_s = 2d \sin \theta_1 \tan \theta_2 \quad (3)$$

光学的光路差 $D$ に基づく波長 $\lambda$ の光の位相差 $P_D(\lambda)$ は

$$P_D(\lambda) = 2\pi \text{mod}(D/\lambda, 1) \quad (4)$$

で与えられる。最終的な干渉光の強度は光波の振幅の2乗で次のようになる。

$$I = I_0(\lambda) \cos^2 \frac{P_D(\lambda)}{2} \quad (5)$$

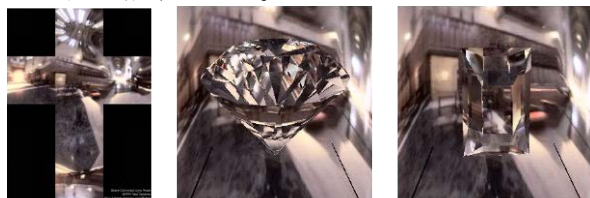
ここで $I_0(\lambda)$ は薄膜への入射光強度である。

#### 4. 実験結果

実装には数値計算言語である MATLAB を利用した。使用した PC のマシンスペックは Windows10、CPUは Core i7-4770 3.40GHz、メモリ 16.0GB である。

##### 4.1 キューブマッピングによる宝石の表現

宝石の屈折を表現するためにキューブマッピングを用いた。図 3 にその結果を示す。(a)は使用したキューブマップで、(b)(c)はそれぞれブリリアントカット、スクエアカットのレイトレーシング表示結果である。



(a)マッピング画像 (b)ブリリアントカット (c)スクエアカット

図 3 キューブマッピングの結果

##### 4.2 構造色の表示

板状のポリゴンを膜とみなし、図 1 に示すようにスクエアカットの宝石モデルに埋め込んだ。その膜において 3.2 の式(5)に示した構造色の計算を行った。膜表面の出射点の場所によって光路差が変化して色の変化が起こる。今回は薄膜の膜厚分布は一定としパラメータにより与えた。干渉光のための点光源は 1 か所配置した。実際の宝石に近い結果になるように膜厚のパラメータを調整した。図 4 に、それぞれ膜厚 7 $\mu\text{m}$ 、16 $\mu\text{m}$ 、35 $\mu\text{m}$ での表示結果を示す。波長 $\lambda$ のサンプリング数は可視光の範囲 (400nm~700nm) で等間隔に 30 か所とした。

図 5 左は実物のブルームーンストーンをハロゲ

ンランプ下で分光撮影した結果画像で RGB 値を簡易計算したものである。右のグラフは結果画像ある一画素における分光分布を示す。

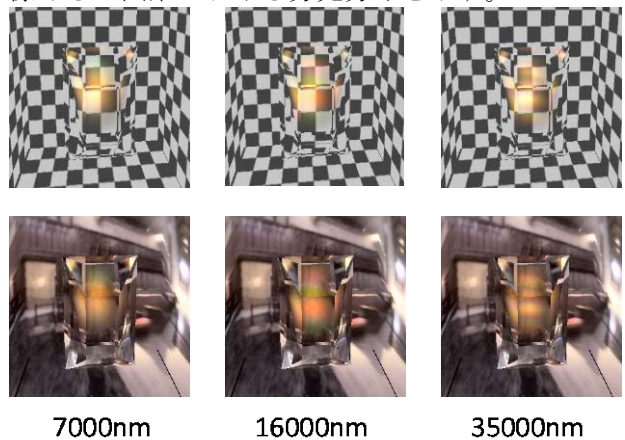


図 4 構造色を持つ宝石の表現

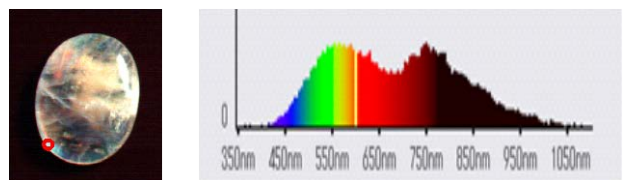


図 5 ブルームーンストーンの分光撮影結果および画素 (左図の赤丸部分) の分光分布

#### 5. おわりに

本研究ではブルームーンストーンが持つ構造色をレイトレーシング法で再現することを試みた。その結果構造色による独特の視覚効果を再現することができた。今後の課題として、実物に見られる宝石内部の白濁も合わせて表現することが挙げられる。

#### 参考文献

- [1] 小森淳矢, 河合利幸, ボリューム表現されたオパールモデルにおける散乱光と回折光計算の改善, 情報処理学会関西支部 支部大会 (2012)
- [2] 土橋外志正, 長田典子, 眞鍋佳嗣, 宇佐美照夫, 井口征士, 多層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, 情報処理学会研究報告, グラフィクスと CAD 82-5 (1996)
- [3] 佐伯昌彦, 井村誠孝, 安室喜弘, 眞鍋佳嗣, 千原國宏, 光路差に着目した汎用的な構造色レンダリング手法, 映像情報メディア学会誌, Vol.60, No.10, pp.1593-1598 (2006)