

カワラバトの構造色のリアルタイムレンダリング

荒川 祐太[†] 中本 啓子[‡] 小池 崇文[†]法政大学情報科学部[†] 法政大学大学院情報科学研究科[‡]

1. はじめに

本論文では、カワラバトの構造色のリアルタイムレンダリングの手法を提案する。本手法では、カワラバトの紫色と緑色に変化する構造色を、反射率モデルから計算したテクスチャを用いて描画する。構造色の描画を正確に行うことで、日常生活でよく見かけるカワラバトを写実的にリアルタイムで描画する。

2. 先行研究

2.1 カワラバトの構造色

構造色とは、光が物体に入射したとき、その物体の構造内において光が反射、散乱、偏光などの現象を起こして発色する色である。代表的な例としては、シャボン玉やCDの光沢が挙げられる。

カワラバトは首の羽に構造色を有しており、角度を変えて羽を見ると、紫色と緑色の光沢が確認できる。この光沢は、小羽枝の外皮に存在する薄い膜が光の薄膜干渉を引き起こすことで発色している。小羽枝の外皮の反射特性を把握するため、Yoshiokaらは、カワラバトの構造色を測定した [1]。小羽枝に白色光を照射し、反射光をスクリーンに投影したところ、入射光に対して90度の辺りで緑色から紫色へ急激に変化していた。これは、薄膜干渉の反射スペクトルのピーク間隔がRGB等色関数の赤色と青色の極大、または緑色の極大と重なるためである。

3. カワラバトの構造色のレンダリング

3.1 薄膜干渉による反射スペクトルの計算

薄膜干渉は、薄い膜の上面と下面のそれぞれで反射した光が干渉する現象である。媒質 a , c の間に厚さ d の薄膜 b が存在すると仮定し、それぞれの屈折率を n_a , n_b , n_c と示す。媒質 a から薄膜 b に角度 θ_a で光が入射したとき、薄膜干渉全体の振幅反射率 r は式(1)で表すことができる [2]。

$$r = \frac{r_{ab} + r_{bc}e^{i\phi}}{1 + r_{bc}r_{ab}e^{i\phi}} \quad (1)$$

ここで ϕ は、波長 λ の光が厚さ d の薄膜内で反射した際の位相差である。

r_{ab} , r_{bc} はそれぞれの媒質間の振幅反射率である。薄膜干渉の反射率 R は式(1)の二乗で、式(2)のように求めることができる。

$$R = |r|^2 \quad (2)$$

薄膜干渉のモデルをカワラバトの外皮に適用するため、媒質 a, b を空気とし、 $n_a = n_c = 1.0$ とする。また、薄膜 b はケラチンであるため、 $n_b = 1.5$ とする。膜の厚さは $d = 650\text{nm}$ とした。これらの値を用いて、式(1)を式(2)に代入し、カワラバトの小羽枝の外皮による薄膜干渉の反射スペクトルを求める。

3.2 RGB表色系への変換

CGの分野においては、一般的にRGB表色系を用いて描画を行う。そのため、計算した反射スペクトルを、等色関数を用いてCIE XYZ表色系へと変換し、その後RGB表色系へと変換する。

3.3 構造色のテクスチャの作成

RGB表色系へと変換した構造色を用いて、図1(a)のようなテクスチャを作成する。描画中にテクスチャから情報を取得することで、構造色の計算コストが軽減される。

カワラバトの構造色は羽全体ではなく先端部分のみに見られる。そのため、2枚のテクスチャを用いて一枚の羽の色を描画する。図1(c)のテクスチャの白色部分を描画範囲とすることで構造色の描画をテクスチャの一部のみに制限する。

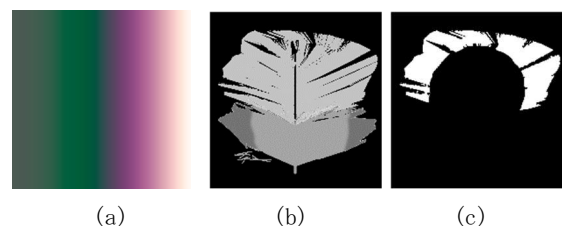


図1 構造色のテクスチャ

Real Time Rendering for Structural Color of Rock dove

[†]Yuta Arakawa, Takafumi Koike,

Faculty of Computer and Information Sciences, Hosei University

[‡]Keiko Nakamoto,

Graduate School of Computer and Information Sciences, Hosei University

それ以外の部分は図 1 (b) のテクスチャの色を描画する。

3.4 CG のレンダリング

反射スペクトルを RGB 値に変換したものを、シーンの描画に適した色へ再変換する。変換には式(3)のランバート反射を用いる。

$$I = C_i I_i (N \cdot L), (i = r, g, b) \quad (3)$$

N は物体の法線ベクトル, L は光源のベクトルを示す。 I は反射光強度, I_i は入射光強度, C_i は RGB 値に変換した反射スペクトルである。

4. 実験

計算した構造色の写実性を検証するために、鳥の 3D モデルに構造色を描画するシェーダーを適用した。モデルの表面には板状のポリゴンを設置し、テクスチャを適用することで羽を表現する。首の周りの羽にシェーダーを適用することで、カワラバトの構造色を再現した。

4.1 実装環境

構造色のレンダリングはゲームエンジンである Unity を使用し、リアルタイムで実行する。また、入射光は D65 光源とする。D65 光源は国際照明委員会(CIE)によって定義されている光源であり、屋外での照明環境を想定したものである。CPU は Intel Core i7-6700 3.40GHz を使用している。

4.2 実行結果

図 2 に描画結果を示す。図 2(a) はカワラバトの実物の写真、図 2(b) は本手法を用いた描画結果である。3D モデルの首元に提案手法を用いたシェーダーが適用されている。首元の羽に紫色と緑色の 2 色を確認できた。光源を回転させて構造色を変化させたとき、フレームレートは安定して 60fps 前後を保っていた。



図 2 (a) カワラバトの写真。首の羽に光沢が確認できる。
(b) 本手法を用いた描画結果。

5. 考察

レンダリング結果は構造色による緑色と紫色の変化の境界が直線的である。光源を移動させたとしても、2つの色の境界が直線に近い形を保っている。それに対してのカワラバトの写真では、2色の境界線は曲線状に変化している。

この原因として推測できるのは、小羽枝の膜の厚さである。本研究では羽の薄膜の厚さを全て 650nm としている。しかし、実際のカワラバトは首の付け根の膜の厚さが 480 ~ 580nm, 先端の膜の厚さが 600 ~ 700nm である [1]。薄膜干渉では膜の厚さが変化すれば発色も変化する。このことから、膜の厚さが一定であることが羽の色の変化を単調にしているものと考えられる。

6. 今後の課題

より写実的な構造色の描画のためには、首の羽の上下の位置による薄膜の厚さの変化を考慮する必要がある。本手法では構造色テクスチャは色と入射角の情報しか保持していない。そこで、構造色のテクスチャに膜の厚さによる色の変化を含め、新たに膜の厚さの分布を保存したテクスチャを作る。その情報をもとにテクスチャから色情報を取得することで、位置による膜厚の変化を実現することができると考える。

7. まとめ

カワラバトの構造色を再現するために、薄膜干渉の構造色のテクスチャを作成し、入射角から 3D モデルの描画色を計算した。また、鳥の 3D モデルに構造色を適用し、現実のカワラバトとの比較を行った。その結果、本研究の手法によってカワラバトの構造色の特徴である紫色と緑色の光沢を再現できた。

今後はより写実的なカワラバトを描くために、首の羽の上下の位置による薄膜の厚さの変化を考慮したい。

参考文献

- [1] S. Yoshioka, E. Nakamura, and S. Kinoshita, "Origin of Two-Color Iridescence in Rock Dove's Feather," *Journal of the Physical Society of Japan*, 76(1), 2007.
- [2] 小林 由枝, 森本 哲郎, 佐藤 いまり, 向川 康博, 池内 克史, "薄膜干渉の画像ベース BRDF 推定," *信学技報*, 113(196), page. 219-223, 2013.