

材料の組成を考慮した立体の色彩表現について

久保嶋 司¹ 古川 進²

山梨大学大学院^{1,2}

1. 緒言

コンピュータグラフィックスは近年、工業や医療、娯楽などのさまざまな分野において利用されている。特に、貴金属などの宝飾品の分野では、材料の色彩の微小な違いが製品の価値を決める重要な要素の1つとなるため、現実に近い感覚を取得できるようなリアルな画像が求められている。それには物体の光学的性質を考慮した色彩を表現する必要がある。そのため、物体の可視領域における光の波長の反射特性（分光反射率）を模擬して画像を生成する方法が提案されている。^[1]しかし、合金のように幾つかの元素で構成されている物体では混合割合によって分光反射率が変化するため、合金の色彩を表現するには全ての混合割合の分光反射率を測定する必要があり、任意の混合割合における合金の色彩を正確に表現するのは困難になる。

そこで、本研究では、材料を2元合金に絞り、任意の混合割合においても合金を表現する方法を提案する。具体的には、表現したい合金と同元素で構成された混合割合が異なる複数の合金の既知である光学的性質とドルーデの式^[2]を用いて、任意の混合割合における合金の分光反射率を推測し、その方法を用いて合金を表示する。

2. 物体の色彩の表現

物体の分光反射率を利用した色彩の表現方法について述べる。可視領域における光の波長ごとに複素屈折率から反射率を求める。反射率から反射光の色彩が決まるので、XYZ値で表す。XYZ値をモニター上に表現するためRGB値に変換する。

(1) 複素屈折率

光学的性質である複素屈折率 $N(\lambda)$ は、

$$N(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda) \quad (1)$$

で表せられる。ここで、 λ は波長、 i は虚数、 $n(\lambda)$ は屈折率、 $k(\lambda)$ は消光係数である。

(2) XYZ 値

XYZ 値は色彩を表現する値である。モニター上に色彩を表現するために用いる RGB 値と異なり、可視領域における光の波長ごとの色彩を表現できる。そのため、分光反射率を用いて物体の色彩を表現する値を算出する部分に XYZ 値を用いた。

(3) XYZ 値を利用した色彩の表現

最初に、物体の分光反射率を求める。光は振動しており、その振動を表すため2つの方向に分解して扱い、それぞれの反射率の平均を使用する。2つの振動方向の光をそれぞれ p 波と s 波とし、それらの波の反射率を求める公式を式(2)、(3)に示す。 $R_p(\lambda)$ 、 $R_s(\lambda)$ は p 波と s 波の反射率、 ψ_0 は光の物体表面への入射角、 $R(\lambda)$ は光の波長が λ のときの p 波と s 波の反射率の平均値（分光反射率）を示す。

$$R_p(\lambda) = \frac{\left| N(\lambda)^2 \cos \psi_0 - (N(\lambda)^2 - \sin^2 \psi_0)^{1/2} \right|^2}{\left| N(\lambda)^2 \cos \psi_0 + (N(\lambda)^2 - \sin^2 \psi_0)^{1/2} \right|^2} \quad (2)$$

$$R_s(\lambda) = \frac{\left| \cos \psi_0 - (N(\lambda)^2 - \sin^2 \psi_0)^{1/2} \right|^2}{\left| \cos \psi_0 + (N(\lambda)^2 - \sin^2 \psi_0)^{1/2} \right|^2} \quad (3)$$

$$R(\lambda) = \frac{R_p(\lambda) + R_s(\lambda)}{2} \quad (4)$$

次に、物体の分光反射率 $R(\lambda)$ から得られた反射光の色彩の XYZ 値を求める式を(5)に示す。

$P(\lambda)$ は光源の分光組成、 $x(\lambda)$ 、 $y(\lambda)$ 、 $z(\lambda)$ は波長 λ の色彩の XYZ 値である。

$$\begin{aligned} X &= \int P(\lambda) R(\lambda) x(\lambda) d\lambda / \int P(\lambda) y(\lambda) d\lambda \\ Y &= \int P(\lambda) R(\lambda) y(\lambda) d\lambda / \int P(\lambda) y(\lambda) d\lambda \\ Z &= \int P(\lambda) R(\lambda) z(\lambda) d\lambda / \int P(\lambda) y(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (5)$$

また、XYZ 値から RGB 値に変換する式を(6)に示す。

$$\begin{aligned} R &= (1.90X - 0.53Y - 0.29Z) \\ G &= (-0.99X + 2.00Y - 0.03Z) \\ B &= (0.06X - 0.12Y + 0.90Z) \end{aligned} \quad (6)$$

About a color expression of the solid that considers the composition of the material

¹Tukasa Kuboshima, ²Susumu Furukawa

^{1,2}University of Yamanashi

3. 合金の表現方法

ドルーデの式と複素屈折率が既知の合金の散乱時間と有効質量から、任意の混合割合における分光反射率を推測して合金の色彩を表現する方法について述べる。

(1) ドルーデの式

金属の誘電率は式(7)に示すドルーデの式で求めることができる。 $\varepsilon(\lambda)$ は誘電率、 ω は入射光の振動数、 M/V は自由キャリアーの単位体積あたりの数、 τ は散乱時間、 m^* は有効質量、 e が自由電子の質量となる。式(8)は式(7)を実数部 $\varepsilon_1(\lambda)$ と虚数部 $\varepsilon_2(\lambda)$ に書き換えたものである。

$$\varepsilon(\lambda) = 1 - \frac{Me^2/m^*V}{\omega(\omega + i\tau^{-1})} \quad (7)$$

$$\varepsilon(\lambda) = \varepsilon_1(\lambda) + i\varepsilon_2(\lambda) \quad (8)$$

(2) 合金の複素屈折率の推測方法

式(9)、(10)は誘電率 $\varepsilon(\lambda)$ と屈折率 $n(\lambda)$ 、消光係数 $k(\lambda)$ との関係を示した式である。単体の金属 A、B と、A と B から構成される合金で複数の混合割合における金属の複素屈折率 $N(\lambda)$ が既知の場合、屈折率 $n(\lambda)$ 、消光係数 $k(\lambda)$ を式(9)、(10)に代入すると、それらの金属の誘電率 $\varepsilon(\lambda)$ が求まる。

$$\varepsilon_1(\lambda) = n^2(\lambda) - k^2(\lambda) \quad (9)$$

$$\varepsilon_2(\lambda) = 2n(\lambda)k(\lambda) \quad (10)$$

式(7)から、散乱時間 τ と有効質量 m^* は式(11)、(12)のように求まるので、求めた値を式(11)、(12)に代入すれば、散乱時間 τ と有効質量 m^* が求められる。

$$\tau = \frac{1 - \varepsilon_1(\lambda)}{\varepsilon_2(\lambda)} \quad (11)$$

$$m^* = \frac{Me^2\tau^{-1}/V}{\varepsilon_2(\lambda)(\omega^3 + \omega\tau^{-2})} \quad (12)$$

ここで、合金の混合割合が変化すると散乱時間 τ と有効質量 m^* の変数が連続的に変化すると仮定すると、求めた散乱時間 τ と有効質量 m^* の間を補間することで、A と B から構成される任意の混合割合における合金の散乱時間 τ と有効質量 m^* が求まり、式(7)から誘電率 $\varepsilon(\lambda)$ が求まる。式(9)、(10)より求められる式(13)、(14)に誘電率 $\varepsilon(\lambda)$ を代入して複素屈折率 $N(\lambda)$ を求め、複素屈折率 $N(\lambda)$ から分光反射率 $R(\lambda)$ を求めると式(5)から XYZ 値が求まる。最後に式(6)から XYZ 値を RGB 値に変換して合金の色彩を表現する。

$$n^2(\lambda) = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\varepsilon_1^2(\lambda) + \varepsilon_2^2(\lambda)} + \varepsilon_1(\lambda) \right) \quad (13)$$

$$k^2(\lambda) = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\varepsilon_1^2(\lambda) + \varepsilon_2^2(\lambda)} - \varepsilon_1(\lambda) \right) \quad (14)$$

4. 適用例

図 1 は金と銀の合金が混合割合によってどのように色彩が変化するかを示した図である^[3]。単体の金と銀の光学的性質と金と銀の合金で金がそれぞれ、80%、60%、50%、20%の混合割合の光学的性質を用いて、今回提案した方法から金が75%と55%のときの混合割合である合金の色彩を図 2 に示す。図 2 における合金の色彩の変化は図 1 に示されたものと同様傾向を示した。

5. 結言

本研究では、任意の混合割合の合金を表現する場合、表現したい合金と同元素で構成された混合割合が異なる複数の合金の既知である光学的性質とドルーデの式を用いて任意の混合割合における合金の分光反射率を推測する方法を述べた。その結果、任意の混合割合における合金の色彩を表現できた。

参考文献

- [1] 富永昌治：3次元空間における物体色のリアルな生成とその評価：情報処理学会論文誌：Vol. 34, No. 2, pp289-301(1993)
- [2] 佐藤勝昭：光と磁気：朝倉書店：pp59-64, 1989年6月20日
- [3] 社団法人日本金属学会：金属便覧：丸善株式会社：pp588-589, 平成12年5月30日

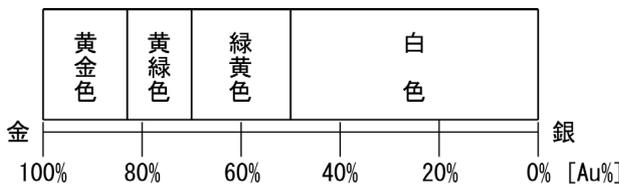
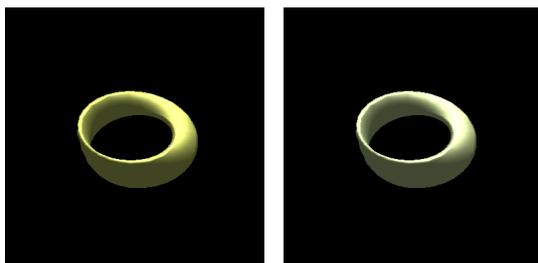


図 1. 金と銀の合金の色彩



(a) 金 75% 銀 25% (b) 金 55% 銀 45%

図 2. 生成された合金の画像