

光源の制御による実物体の見かけの彩度の操作

高木 亜衣 日高 大地 岡部 孝弘

九州工業大学 情報工学部

1 はじめに

一般に、物体表面の見えは、時間が経つにつれて変化する [1]. この経年変化により物体表面の分光反射率が変化するために、観察される反射光の彩度が小さく・明度が大きくなる現象は、色褪せと呼ばれる。本研究では、経年変化による物体表面の色褪せ、特に、彩度の変化について考える。

物体表面で観察される反射光の色は、光源の分光強度、物体表面の分光反射率、および、観察者（ヒトやカメラ）の分光感度に依存する。本研究では、光源の分光強度を制御することで、実物体の彩度を操作し、物体表面の色の経年変化をシミュレーションする。

Tsuchida ら [2] は、16 種類の狭帯域 LED の強度を制御することで、ホワイトバランスを保ちつつ、実物体の彩度を強調する手法を提案している。しかしながら、彼らの提案手法は、実写画像に基づくデータ駆動型のアプローチであるために、なぜ彩度の操作が可能なのか明らかではない。また、光源の波長が固定であるため、操作可能な彩度の範囲が限られてしまう。

本稿では、実物体を照らす光源の波長と強度の両方を制御することで、実物体の見かけの彩度を操作する方法を提案する。具体的には、分光感度に基づいて光源の波長を選択するとともに、ホワイトバランスを保つように光源の強度を決定することで、観察される反射光の彩度を操作する。提案手法により、色褪せなどの経年変化に伴う実物体の見えの変化の再現が可能になる。

2 提案手法

実物体を n 番目 ($n = 1, 2, 3$) の光源で照らしたとき、ある画素の m 番目 ($m = 1, 2, 3$) のバンド（カメラの RGB バンドや CIE-XYZ）の画素値は、

$$i_{nm} = \int l_n(\lambda) \rho(\lambda) c_m(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

で表される。 $l_n(\lambda)$ は光源の分光強度、 $\rho(\lambda)$ は物体表面の分光反射率、 $c_m(\lambda)$ は観察者（ヒトやカメラ）の分光感度を示す。ここで狭帯域光源を仮定して、 n 番目の光源が λ_n の波長のみ強度を持つとすると、 $l_n(\lambda) = \delta(\lambda - \lambda_n)$ となることから、画素値は

$$i_{nm} = \rho(\lambda_n) c_m(\lambda_n) \quad (2)$$

で与えられる。つまり、 n 番目の光源下における被写体の色はその波長の分光感度で、明るさはその波長の分光反

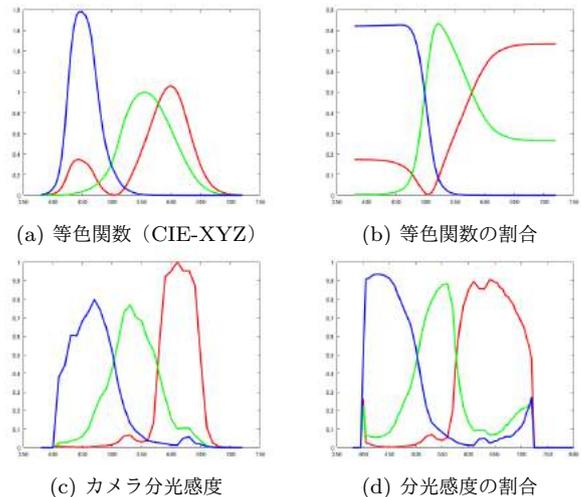


図1 等色関数 (CIE-XYZ) とカメラの分光関数

射率で決まることが分かる。

したがって、3 バンドの分光感度のうち、1つの分光感度が大きな値を持つ波長では、彩度が大きくなる。一方で、3つの分光感度が類似の値を持つ波長では、彩度が小さくなる。ゆえに、実物体を照明する光源波長を制御することで、観測される反射光の彩度を操作することができると考えられる。

各光源の強度は、白色（無彩色）の物体を照らしたときに白色（無彩色）に見えるように決定する。具体的には、分光感度に基づいて選択した3つの波長各々で無彩色の物体を照らしたときに、3つの色（画素値）の線形結合が無彩色になるように結合係数（光源の強度）を計算する。なお、実際には結合係数が非負になるように拘束を課して求める。

3 実験

分光感度の一例として、CIE-XYZ 表色系の等色関数を図 1(a) に示す。X は赤色、Y は緑色、Z は青色にピークを持つことから、それぞれ RGB に対応しているとみなす。図 1(b) に、図 1(a) の等色関数の割合、つまり、波長ごとに各バンドの分光感度を3バンドの分光感度の和で割ったものを示す。またカメラの分光感度として、Canon 5D Mark II を図 1(c) に示す。図 1(d) に、図 1(c) の分光感度の割合を示す。この図から、1つのバンドの割合が高い波長を選んで実物体を照明すると、反射光の彩度が高くなることが予想される。

CG 実験: 図 1(c) に示す分光感度のもと、式 (2) に基

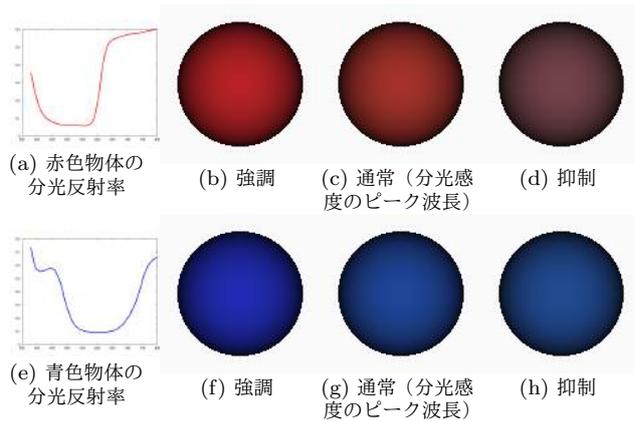


図2 CG 実験による物体の彩度の操作

づいて CG 画像を生成した. なお, 光源の分光強度は全波長に渡って一定とした. 図 2(a) の分光反射率を持つ赤色物体について, 彩度が最大となる波長を選択したときの画像を図 2(b) に, 各バンドの分光感度のピークの波長を組み合わせたときの画像を図 2(c) に, さらに R バンドの分光感度の割合が下がるような波長を選択したときの画像を図 2(d) に示す. また, 図 2(e) の分光反射率を持つ青色物体について, 同様に波長選択を行って生成した画像を図 2(f)(g)(h) に示す. これらの結果から, 波長を適切に選択することによって彩度が変化していることを確認できる.

実物体実験: 実物体実験では, 単波長の光源で実物体を照らして得られる画像の代わりに, 広帯域の光源に照らされた実物体のハイパースペクトル画像を用いた. 物体表面で生じる反射において光の波長は保存されることから, ある波長の光源下の画像と, その波長で撮影した画像は等価である. なお, 実物体を照らす広帯域光源の分光強度を予め計測して, その影響を補正している. また, CG 実験では白色 (分光強度が一定) の光源を仮定していたのに対して, 実物体実験では実光源を用いる. このとき, 選択した 3 波長の光源の強度は, 白色 (無彩色) の物体の色が実光源下のものと等しくなるように決定すればよい.

実物体実験に使用した光源は白色光源と赤熱灯の 2 種類であり, その分光強度を図 3(a)(b) に示す. また, 今回は被写体としてカラーチェッカーを用いた. 各バンドの分光感度の割合のピークの波長を組み合わせることで彩度を強調したカラーチェッカーの画像を図 3(c)(d) に, 各バンドの分光感度のピークの波長を組み合わせたときの画像を図 3(e)(f) に, 彩度を抑制するように波長を選択したときの画像を図 3(g)(h) に示す.

彩度を強調した画像 (c)(d) と通常の画像 (e)(f) の差は, 例えば赤色のパッチに顕著に現れている. また, 彩度を抑制した画像 (g)(h) と通常の画像 (e)(f) の差は, 緑色のパッチに顕著に現れている. 一方で, 光源波長の選択による彩度の強調・抑制に伴い, すべてのパッチの

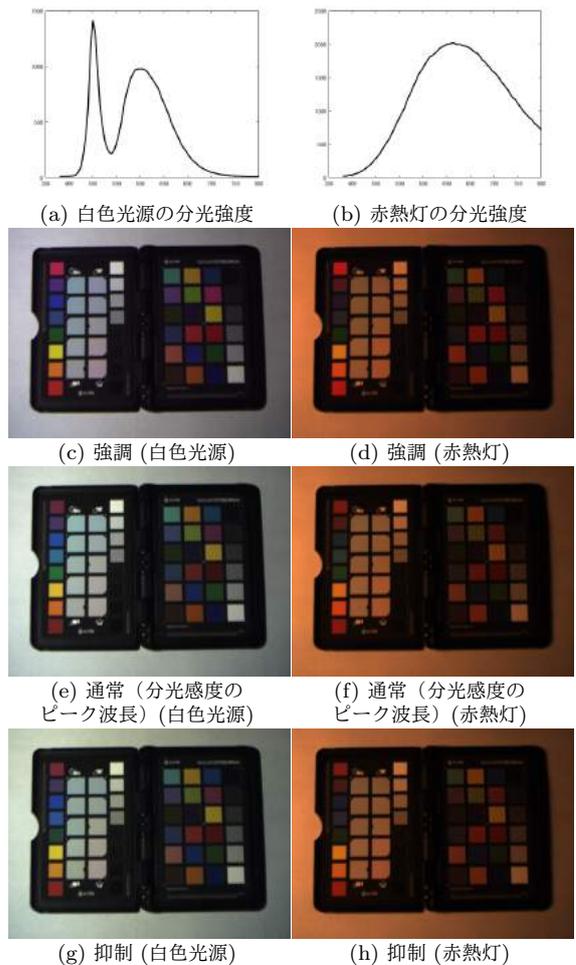


図3 各光源の分光強度と光源下のカラーチェッカーの様子

彩度が一様に変化している訳ではないことも分かる.

4 むすび

本稿では, 分光感度に基づいて光源波長を選択することで, 実物体の彩度を操作する手法を提案した. CG 実験および実物体実験では光源の波長を適切に選択し, ホワイトバランスを保つように強度の制御を行うことで, 彩度の操作を実現した. 定量的評価や単波長光源を用いた実験は今後の課題である.

謝辞 本研究の一部は, JSPS 科研費 JP18H05011 および JP17H01766 の助成を受けた.

参考文献

- [1] B. Sun, K. Sunkavalli, R. Ramamoorthi, P. Belhumeur, S. Nayar, "Time-Varying BRDFs," IEEE TVCG, Vol.13, No.3, pp.595-609, 2007.
- [2] M. Tsuchida, K. Hiramatsu, and K. Kashino, "Color Enhancement by Optimizing the Illumination Spectrum," NTT Technical Review, Vol.16, No.1, pp.1-4, 2018.