

画像情報を用いた物体表面の特性計測

— 蛍光成分と物体反射成分の分離 —

佐藤 いまり

Spectral Modeling of Reflective-Fluorescent Scenes

Imari SATO

Hyperspectral reflectance data allows for highly accurate spectral relighting under arbitrary illumination. Most of past methods for capturing the spectral reflectance of scenes have been proven successfully in relighting but they all share a common assumption. All the methods do not consider fluorescent effects which are present in daily commodities ranging from paper, to clothing, to even our food. Furthermore, everyday fluorescent items exhibit a mix of reflectance and fluorescence. So, proper separation of these components is necessary for analyzing them. In this paper, I introduce some methods based on well established theories of reflectance and fluorescence for imaging each of these components.

Key words: spectral imaging, reflectance analysis, reflective-fluorescent components

物体表面の色や明るさは照明条件により大きく変化することが知られている。これに対し、色恒常性の研究分野では、照明の影響を除去し、物体色を推定するためのさまざまなアルゴリズムが提案されてきた。しかしながら、物体の見えや色の推定に関わるコンピュータビジョン技術の多くは、対象となる物体表面が反射成分のみにより構成されることを仮定している。すなわち、物体表面の色は、照明光の分光分布（どの波長の光を多く含むかを示す）と物体表面の分光反射率（入射光の各波長に対する反射の割合を示す）の積として考慮される。一方、私たちの身の回りに目を向けてみると、例えば鉱物や植物など、反射成分のみならず蛍光成分を含む物体が多数存在する（図1）。従来研究は、無作為に選んだ物体の20%に蛍光成分が含まれていたということを報告した¹⁾。蛍光は吸収光の波長よりも長波長側の光を出力するという複雑なメカニズムをもち、蛍光物質が出力する波長は一定で、照明色の影響を受けないという特性をもつ（例えば、青い光源の下でもオレンジの蛍光発光をみせる）。これにより、対象物体が蛍光成分を含む場合、従来の分光反射率を用いた色再現では、正しく色推定を行うことが難しくなる。本稿では、実物体の反射・蛍光成分の双方を考慮した分光解析技術を紹介する。

1. 照明色変化と蛍光物質

蛍光発光の特徴については、量子論を通して明らかにされてきている²⁾。蛍光物体の分子が光エネルギーを吸収すると、励起状態とよばれる不安定な状態になり、再び基底状態に戻る際に光を放出する。蛍光物質ごとに吸収する波長や放出する光の分光分布は異なり、蛍光物質の特性は、どの波長の光をどれだけ吸収するかを示す「励起関数」と蛍光物体固有の蛍光発光の分光特性を表す「蛍光関数」により表現される。先に述べたように、蛍光物質は吸収光の波長よりも長波長側の光を放出し、光源の分光分布にかかわらず、出力される蛍光発光の分光分布は一定のパターンを示すことが知られている。対象物体が通常の反射成分のみより構成される場合、物体表面で観察される色は、照明光の分光分布と物体表面の分光反射率（入射光の各波長に対する反射の割合を示す）の積として求められるのに対し、蛍光発光は照明の分光分布と励起関数により吸収光の量が決まり、観察される発光強度が決定される。

次に、反射と蛍光発光のメカニズムの違いを活用した画像解析技術を紹介する。

2. 反射と蛍光発光のメカニズムの違いに基づく画像解析

反射は入射光と同じ波長の光を反射するのに対し、蛍光

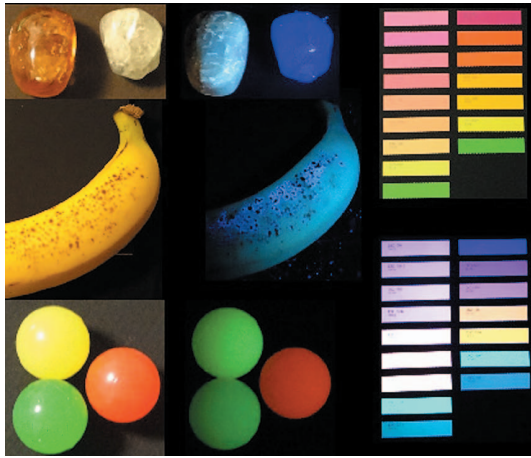


図1 蛍光成分を含む物質例. 左側または上側の画像は自然光の下で観察される物体の見えるを, 右側または下側の画像は, 紫外光を含むブラックライトの下で観察された蛍光発光を示す.

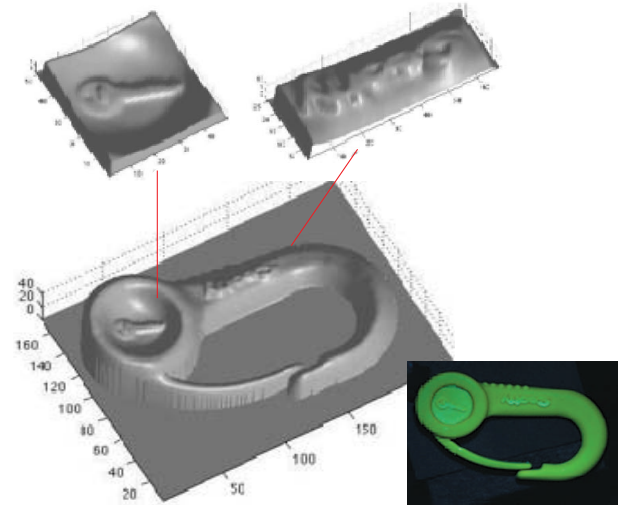


図3 蛍光画像から推定された物体形状. 右下に対象物であるキーホルダーの画像を示す.

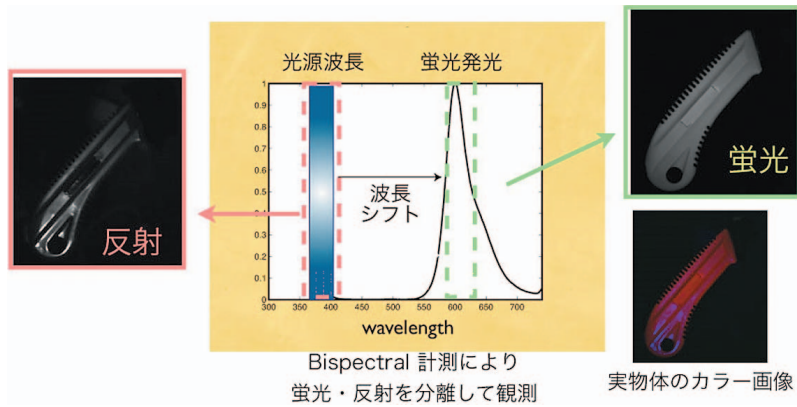
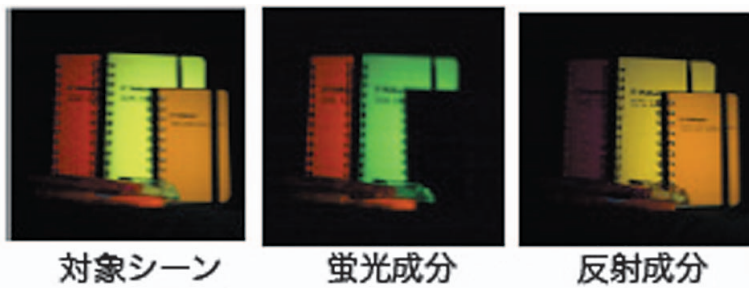


図2 バイスpekトル計測により観察された反射と蛍光成分.



画像合成への応用



図4 実物体の蛍光反射特性のモデル化. 上段: 計測された蛍光成分と反射成分. 下段: 蛍光を考慮することにより正しい色再現が可能となる.

は吸収光の波長よりも長波長側の光を出力する。入射光に対する蛍光発光と反射のメカニズムの違いを積極的に活用することによって、対象物体の蛍光成分と反射成分を分離して観察し、画像解析に用いることができる。具体的には、入射光の波長と観察する光の波長の双方を変化させながら物体を観察するバイスペクトル計測 (bispectral measurements) により、観察波長の違いを用いて反射特性と蛍光成分を分離して観察することができる。バイスペクトル計測は、蛍光試料の発光スペクトル計測の目的で用いられる手段である。図2に青色の光源下で観察されたカッターナイフのRGB画像を示す。単波長により構成される照明下で観察する場合、反射成分は照明と同じ波長にのみ観察される (例えば光源色が青であれば、青色の反射のみが観察される)。これに対し、蛍光は吸収光の波長よりも長波長側の光を出力する (光源色が青の場合、緑色や赤色の蛍光が観察される)。図2の左 (Bチャンネルの画像) では、物体表面の艶すなわち鏡面反射のみが観察され、右 (Rチャンネルの画像) では蛍光発光のみをとらえている様子がわかる。

3. 蛍光発光に基づく形状推定

蛍光成分は照射光より長波長側の光を返し、照射方向による発光強度の違いは拡散反射と同じであることが知られている。すなわち、法線の方向から照射したときの発光強度が最も強くなり、法線となす角度が90度に近づくほど発光強度も弱くなる。これに従い、蛍光に基づく照度差ステレオ法 (photometric stereo) により対象物体の形状を推定することができる。照度差ステレオ法は、3つ以上の照明方向の異なる光源下、単一視点から撮影された画像の陰影情報をもとに物体表面の各点の法線方向を推定する手法である。一般に物体表面が拡散反射のみにより構成されることを仮定した手法であり、物体表面に強い鏡面反射 (つやなど) が観察される場合、その影響を受けてしまう。

われわれは、バイスペクトル計測で反射と蛍光を分離して観察することにより、物体表面のつやなどの影響を受けずに蛍光発光に基づき安定して形状推定を行うことができることを示した³⁾。図3に、提案手法により推定された形状 (対象物はキーホルダー) を示す。キーホルダーの物体表面では、鍵の模様や文字などの詳細が推定できている様

子がわかる。

4. 反射・蛍光特性のモデル化

対象物体が反射ならびに蛍光成分により構成される場合、この物体の分光反射率と蛍光特性 (吸光度を示す励起関数と発光の分光分布を示す蛍光関数) を獲得する必要がある。最も確実な方法は、単波長により構成される照明を準備して、照明の波長を変化させながら照射し、対象物の明るさをさまざまな波長で記録する方法である。しかしながら、このアプローチはすべての照射波長と観察波長の組み合わせを試す必要があり、膨大な計測を要するという問題が存在する (照射波長と観察波長により構成される行列は、Donaldson 行列とよばれる)。

われわれは、実世界の反射特性や蛍光特性の統計量に基づき照射波長と蛍光波長の組み合わせを決定し、少ない計測に基づき実物体の反射・蛍光特性をモデル化する手法を提案した⁴⁾。さらに、波長領域で高周波に変化する分光分布をもつ光源が、反射・蛍光特性を分離して計測するのに有効に働くことを明らかにして、2種類の照明下で撮像された2枚の分光画像に基づき対象シーンの反射・蛍光特性のモデル化を実現した⁵⁾。図4上段に分離して観測された反射・蛍光特性の例、下段に反射成分のみ、あるいは反射・蛍光成分の双方を考慮して画像合成を行った例を示す。蛍光特性を考慮することにより、任意照明下でのシーンの見えが正確に再現されている様子がわかる。

文 献

- 1) K. Barnard: "Color constancy with fluorescent surfaces," *Proc. IS&T/SID 7th Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications* (1999) pp. 257-261.
- 2) A. Springsteen: "Introduction to measurement of color of fluorescent materials," *Anal. Chim. Acta*, **380** (1999) 183-192.
- 3) I. Sato, T. Okabe and Y. Sato: "Bispectral photometric stereo based on fluorescence," *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2012) pp. 270-277.
- 4) A. Lam and I. Sato: "Spectral modeling and relighting of reflective-fluorescent scenes," *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2013) pp. 1452-1459.
- 5) Y. Fu, A. Lam, I. Sato, T. Okabe and Y. Sato: "Separating reflective and fluorescent components using high frequency illumination in the spectral domain," *Proc. Int. Conf. Computer Vision (ICCV)* (2013) pp. 457-464.

(2014年5月13日受理)