2章 マルチスペクトル技術の進展

2-3 蛍光を考慮した分光解析技術

[正会員] 佐藤 洋一[†], 佐藤いまり^{††}

キーワード：分光解析, 反射解析, 蛍光解析, 実世界モデリング

1. まえがき

物体表面の色, 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. このことはコンピュータビジョン技術による物体の認識を難しくする大きな要因ともなっている. 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¹⁾. また, 画像合成の研究分野では, 複雑な光源環境下で物体の見えを正確に生成するためのさまざまな技術が提案されてきている²⁾.

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, 例えば白紙, 塗料, 染料, 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³⁾. これに対し, 画像の認識と理解を扱うコンピュータビジョンの研究分野では, 光の反射成分のみを対象とした画像解析手法が提案され, 実物体の持つ蛍光成分の考慮は充分なされてこなかった.

蛍光は反射特性とは異なる特性を持つ. 例えば, 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持ち, 蛍光物質が出力する波長は一定であり, 照明色の影響を受けないという特性を持つ (例えば, 青い光源の下でもオレンジの蛍光発光を見せる). 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. すなわち, 通常の反射成分と蛍光成分とを分けて色再現することが重要となる.

このような背景のもと, 近年, 実シーンの反射・蛍光特

図1 蛍光成分を含む物質例 (口絵カラー参照)

鉱石, バナナの皮, スーパーボール, 蛍光塗料を含む紙. 左側または上側の画像は自然光のもとで観察される物体の見えを, 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もとで観察された蛍光発光を示す.

性をモデル化する技術の開発が進められている. さらに, 蛍光固有の特性 (発光色は照明色の影響を受けないなど) に着目することにより, 従来の反射のみを考慮した画像解析では困難な問題への解法が示されてきた. 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.

2. 背景・関連研究

物体色の推定は, 画像に基づく実世界理解を目的とするコンピュータビジョンの中心的な研究課題の一つであり, 照明の影響などを除去して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¹⁾. Barnardらは多数のテスト画像を準備し, 色恒常性に関する従来手法の性能比較を行った⁴⁾. Barnardらのテスト画像の中には, 蛍光成分を含む物体も含まれており, その場合, 対象物体が反射成分のみにより構成されるという仮定は, 限定的で物体色推定の精度に大きな影響を与えることが示唆された. その後, Barnardは蛍光成分を考慮した物体色推定手法を発

[†] 東京大学 生産技術研究所^{††} 国立情報学研究所

"Fluorescent-based Computer Vision" by Yoichi Sato (Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Tokyo) and Imari Sato (Institute of Informatics, Tokyo)

表したものの、蛍光発光の特徴を記述する具体的な物理モデルの導出がなく、実験データに基づく経験的な手法を発表するにとどまった³⁾。

自然科学の研究分野では、蛍光成分の発光により出力される波長を特殊な光学デバイスを用いて計測するための必要な手順が紹介されている⁵⁾。また、CGの研究分野において、Hullinらは蛍光成分の見える度を表す関数として、双方向反射率分布関数(BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function)に入射光の波長の考慮を加えた。具体的には、Bispectral Bidirectional Reflectance and Reradiation Distribution Functions(BRRDF)を定義し、さまざまな照明下で計測された分光データに基づき、BRRDFを効率良く獲得し画像生成に用いる手法を提案した⁶⁾。その他にも、分光分布が既知の複数照明下で観察された分光データに基づく蛍光成分の特性をモデル化する手法も提案された^{7)~9)}。また、画像合成の研究分野においては、蛍光成分を考慮した見える度の生成手法についての研究が進められ、JohnsonとFairchildは、蛍光発光の分光領域における生成モデル式を示し、与えられた照明環境のもとで蛍光成分と反射成分の見える度を計算し画像生成を行う技術を発表した²⁾。

3. 照明色変化と蛍光物質

なぜ蛍光発光が起こるのか、その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⁵⁾：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呼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、光源の分光分布に関わらず、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。

私たちの身の回りの物体は、反射成分と蛍光成分の両方により構成されるものが多々存在する。参考までに、そのような混合物体(オレンジ色の蛍光紙)の分光特性を分光放射輝度計により計測したものを図2に示す。この実験では、単波長により構成される照明を準備し、照明の波長変化に伴い、物体表面で観察される分光分布がどのように変化するかを調べている。図2の各線が各照明下で観察された分光分布を表し、線色の違いは入射光の波長の違いを表す。

図2 反射・蛍光特性の混合物体(口絵カラー参照)

入射光の波長変化に伴い変化する物体表面の分光特性。線色の違いは入射光の波長の違いを表す。グラフの横軸は波長を示し、縦軸は観察光の各波長の強度を示す。

図2の中で、紫外領域の照明の場合のみを抜き出すと(図2(b)), この場合、反射成分はほとんど観察されず、蛍光発光の分光分布のみが観察されていることがわかる。一方、

図3 バイスpekトル計測により観察された反射と蛍光成分
(口絵カラー参照)

照明光が可視領域の波長になると、反射成分と蛍光成分の混合分布が観察されるようになり(図2(c))、照明波長がさらに長波長側になると蛍光発光がなくなり、反射成分に起因した明るさのみが観察される(図2(d))。この実験からも、物体が反射成分と蛍光成分の双方を含む場合、光源の分光分布に応じて、物体の見えが大きく変化することがわかる。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。

4. 反射と蛍光発光のメカニズムの違いに基づく画像解析

先に述べたように、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特性を示す。この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していく。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のため用いられる手段である。

図3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(例えば、光源色が青)、反射成分は照明と同じ波長にのみ観察される(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)。このカッターナイフは、反射・蛍光成分により構成されるため、画像のBチャネルのみを取出すと反射成分のみが、GとRのチャネルのみを取出すと蛍光成分のみを観察することができた。図3(左：Bチャネ

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、図3(右：Rチャネルの画像)では蛍光発光のみをとらえている様子がわかる。

4.1 蛍光発光に基づく形状推定

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、法線方向から照射した時の発光強度が最も強くなり、法線となす角度が 90° に近づく程、発光強度も弱くなる。これに従い、照明方向の変化にともない観察された蛍光発光の強度変化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、三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(艶など)が観察される場合、その影響を受けてしまう。筆者らは、バイスペクトル計測により、反射と蛍光を分離して観察することにより、物体表面の艶などの影響を受けずに蛍光発光に基づき、安定した形状推定できることを示した¹⁰⁾。図4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。

4.2 反射・蛍光特性に基づくカメラの分光感度ならびに照明色の推定

カメラを用いて撮像する場合、対象シーンの見えは、照明色とシーンを観測するカメラの分光感度の双方の影響を受ける。例えば、和紙を異なるカメラ(Nikon DIX, Canon 5D)や異なる照明下(Sun：太陽光とBlue Sky：青空)で撮像すると観察される物体色は大きく異なる(図5(右上))。ここで、蛍光物質が出力する波長は一定で照明色の影響を

図5 蛍光塗料を含むキャリブレーションボードを提案，光源の分光分布とカメラの分光感度の同時推定を実現（口絵カラー参照）

図4 蛍光画像から推定された物体形状（口絵カラー参照）
右下に対象物であるキーホルダの画像を示す。

受けないという特性に着目し，通常の反射成分のみならず蛍光成分を含む新しいキャリブレーションボードを提案した¹¹⁾。このキャリブレーションボードと一緒に撮像することにより，照明色やカメラの分光感度の影響を除去して物体色の推定が可能となり，さらに任意の照明下，異なるカメラで撮像された時に観察される見えを予測することができる。

4.3 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，この物体の見えをモデル化して任意照明下で画像合成を行うためには，対象シーンの分光反射率と蛍光物質の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合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 行列と呼ばれる）。

2013年，筆者らは，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合せを決定し，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¹²⁾。さらに，波長領域で高周波に変化する分光分布を持つ光源が，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，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¹³⁾。図6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が見えが正確に再現している様子がわかる。

5. むすび

本稿では，従来の反射のみを考慮した画像解析では困難な問題に対する蛍光の特性を活用したアプローチを紹介した。対象シーンが蛍光特性を含む場合，その見えのモデル化には反射と蛍光成分の考慮が必要なこと，そのモデル化について紹介した。

（2014年2月17日受付）

図6 実物体の蛍光反射特性のモデル化 (口絵カラー参照)
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.

〔文 献〕

- 1) V. Agarwal, B.R. Abidi, A. Koschan and M. Abidi: "An overview of color constancy algorithms", J. Pattern Recognition Research (2006)
- 2) G.M. Johnson and M.D. Fairchild: "Full-spectral color calculations in realistic image synthesis", IEEE Computer Graphics and Applications (1999)
- 3) K. Barnard: "Color constancy with fluorescent surfaces", Proc. The IS&T/SID seventh Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications (1999)
- 4) K. Barnard, V. Cardei and B. Funt: "A comparison of computational color constancy algorithms", IEEE Trans. Image Processing, 11, 9 (2002)
- 5) A. Springsteen. Introduction to measurement of color of fluorescent materials. Analytica Chimica Acta, **380**, 2-3 (1999)
- 6) M. Hullin, J. Hanika, B. Ajdin, H. Seidel, J. Kautz and H. Lensch: "Acquisition and analysis of bispectral bidirectional reflectance and reradiation distribution functions", in ACM Trans. Graphics (2010)
- 7) H. Haneishi and R. Kamimura: "Modeling and estimation spectral reflectance characteristics of fluorescent object", Proc. ICIS (2002)

- 8) T. Nakajima and S. Tominaga. Spectral reflectance estimation of fluorescent materials by Using camera images. In Proceedings of Color Science Association of Japan (2010)
- 9) S. Tominaga, K. Hirai and T. Horiuchi: "Estimation of Bispectral Matrix for Fluorescent Objects", Proc. The Colour and Visual Computing Symposium, CVCS 2013 (2013)
- 10) I. Sato, T. Okabe and Y. Sato: "Bispectral Photometric Stereo based on Fluorescence", in Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2012 (2012)
- 11) S. Han, Y. Matsushita, I. Sato, T. Okabe and Y. Sato: "Camera Spectral Sensitivity Estimation from a Single Image under Unknown Illumination by Using Fluorescence", Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2012 (2012)
- 12) A. Lam and I. Sato: "Spectral Modeling and Relighting of Reflective-Fluorescent Scenes", Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2013 (2013)
- 13) Y. Fu, A. Lam, I. Sato, T. Okabe, Y. Sato: "Separating Reflective and Fluorescent Components Using High Frequency Illumination in the Spectral Domain", Proc. International Conf. Computer Vision, ICCV 2013 (2013)

佐藤 洋一 (さとう よういち) 1990年, 東京大学工学部機械工学科卒業. 1997年, カーネギーメロン大計算機科学部ロボティクス学科博士課程修了. 同年, 東京大学生産技術研究所研究機関研究員. 講師, 助教授, 同大学大学院情報学環准教授を経て, 2010年より, 同大学生産技術研究所教授. 専門分野はコンピュータビジョン. 特に, 反射解析, 人の動作のセンシングと行動の理解, 視線計測と解析等の研究に従事. ICPR2008 Best Industry Related Awardなどを受賞. Ph.D in Robotics. 正会員.

佐藤いまり (さとう いまり) 1994年, 慶應義塾大学総合政策学部卒業. 2005年, 東京大学大学院学際情報学府博士課程修了. 2005年, 国立情報学研究所助手. 2007年, 同研究所准教授. コンピュータビジョン, イメージベースドモデリング&レンダリングに関する研究に従事. 1994年~1996年, 米国カーネギーメロン大学ロボット工学研究所訪問奨学生. 2002年~2004年, 日本学術振興会特別研究員. 2005年~2009年, 科学技術振興機構さきがけ研究員. 2012年より, 東京工業大学物理情報システム連携准教授(兼務). 2009年, 文部科学大臣表彰若手科学者賞, 2011年, Microsoft Research Japan New Faculty Awardなどを受賞. 学際情報学博士.