

照明色変化に伴う色変化に基づく蛍光成分と反射成分の分離

佐藤いまり[†] CherryZhang^{††}

[†] 国立情報学研究所 〒101-8430 千代田区一ツ橋2-1-2

^{††} University of Waterloo 200 University Ave, West, Waterloo, Ontario, Canada

E-mail: †imarik@nii.ac.jp, ††c23zhang@uwaterloo.ca

あらまし 私たちの身の回りには蛍光成分を含む物体が多数存在する。例えば、白紙、塗料、染料、植物にも蛍光成分が含まれている。これに対し、これまで提案されてきたコンピュータビジョンおよび画像処理技術の多くは、対象物体に蛍光成分が含まれず反射成分のみを含むと想定しており、蛍光成分を含む物体に対応することは難しい。本論文では、蛍光成分は照明色変化の影響を受けないという特徴に注目し、照明色変化にともない観察された色変化に基づき対象物体の蛍光成分と反射成分を分離する手法を提案する。具体的には、照明色変化に伴い観察される色変化に基づく独立成分解析により、対象物体の反射成分、蛍光成分、照明色も未知という条件下での分離を実現する。

キーワード 反射解析 蛍光解析

1. はじめに

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様々なアルゴリズムが提案されてきた [1][7][3]。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様々な技術が提案されてきている [10]。

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)。蛍光成分により出力される波長は一定あり、照明色の影響を受けないという特性を持つ。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、正しく色推定が行うことが難しい。すなわち、通常 of 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。

本研究では、蛍光成分による発光は照明色の影響を受けないという特徴に注目し、照明色変化にともない観察された色変化に基づき対象物体の蛍光成分と反射成分を分離する手法を提案する。具体的には、照明色変化に伴い観察される色変化に基づく独立成分解析により、対象物体の反射成分、蛍光成分、照明色も未知という条件下での分離を実現していく。分離を実現するための糸口として、まず、反射および蛍光成分により構成される物体



図 1 蛍光成分を含む物質例: 鉱石、珊瑚、衣服、バナナの皮、蛍光塗料を含む紙。

の明るさが 2 つの成分の線形モデルで記述できることを示す

$$p_c = a_c R_c + b_c F_c.$$

ここで、 p は画像中の各画素の明るさ、 c はカメラのカラーバンド ($c = \{R, G, B\}$), R と F は画素に対応する物体表面の点の反射成分と蛍光成分を表す。本研究では、対象となる物体が拡散反射成分のみにより構成されることを仮定する。これに従い、 R は対象物体の拡散反射成分を表す。 a_c と b_c はカメラの分光応答と照明の分光分布に基づき求められる係数であり、この照明下における各成分の色や明るさを決定する。

照明色が未知の場合、係数 a と b も未知となるため、観測値 p のみに基づき反射成分 R と蛍光成分 F を推定する、いわゆる暗号信号源分離 (Blind Source Separation) と呼ばれる問題を解かなければならない。本論文では、画像中に観察される反射成分 R と蛍光成分 F が統計的

に互いに独立であるという仮定に基づき、独立成分分析 (Independent Component Analysis: ICA) を用いて、この問題を解いていく。

ICA に基づく分離手法は、各成分の間の独立性に着目し、結合係数に関する事前知識を用いずに混合信号 (本研究では p に対応) から、信号源 (R と F に対応) を分離、復元する手法である。もし画像中の反射成分 R が得られたとしても蛍光成分 F に関して何も情報が得ることはできないことから、 R と F は独立な事象と考えることができ、独立成分分析を用いた信号分離が適当であると考える。本研究の貢献は以下のとおりである。

1. 照明色変化に伴う反射・蛍光成分の見えの違いを解析
2. 反射・蛍光成分を含む物体の任意照明下での見えを表すモデル式の導出
3. 異なる照明色のもと観察された2枚の画像から対象物体の反射・蛍光成分を推定する手法の提案

先に述べたように、これまでのコンピュータビジョンのアルゴリズムは対象物体に蛍光成分が含まれず反射成分のみを含むと想定しているものが多い。本研究は未知の照明のもと観察された画像に基づき対象物体の反射成分と蛍光成分を分離する初めての試みである。本論文の構成は以下の通りである。まず、2.章で物体色の推定および画像生成についての関連研究についてまとめる。次に3.章において、蛍光成分の吸収・発光の特徴や照明色変化との関係について反射成分との比較を交えて説明する。異なる照明色のもと撮像された2枚の画像にもとづき対象シーンの反射成分と蛍光成分を分離する手法を4.章で述べ結果を5.章に示す。

2. 関連研究

物体色の推定は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様々なアルゴリズムが提案されてきた [1][7]。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を比較を行った [3]。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いたが、蛍光成分を扱える手法が存在しなかったため、従来の反射成分のみを考慮した手法が試された。実験を通して、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 [2]。

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 [15]。また、Hullin らは蛍光成分の見えを表す関数として、双方向反射率分布関数

(BRDF) に入射光の波長の考慮を加えた Bispectral Bidirectional Reflectance and Reradiation Distribution Functions (BRRDF) を定義し、様々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 [8]。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てきた [11], [13]。

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の生成手法についての研究が進められてきた。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を計算し画像生成を行う技術を発表した [10]。本論文ではこれらの先行研究を進展させ、照明色変化に伴う反射・蛍光成分の見えの違いに注目し、異なる照明色のもと観察された画像を用いて対象物体の反射成分と蛍光成分の同時に推定する技術を提案する。

コンピュータビジョンの研究分野では、画像中に観察される複数の成分を分離する技術が提案されている [12], [14], [16]。Farid と Adelson は、異なる条件下で撮影された2枚の画像に基づく独立成分分析により、画像中に観察されるガラスからの反射光 (観察者の映り込みなど) と透過光 (ガラスを通して観察される物体) を分離する手法を提案している [6]。この研究では偏光フィルタを用いて異なる条件下で観察された反射光と透過光の変化の違いに注目しており、照明色変化にともなう物体表面の色変化に注目した本研究とは共通するところがある。

3. 照明色変化と蛍光物質

3.1 蛍光物質

本節では、照明色と蛍光により出力される光の関係について考えていく。典型的な蛍光物質は近紫外 (200 nm から 380 nm) の光を吸収し、可視領域 (380 nm to 720 nm) の光を発生させる。また、蛍光物質の中には、可視領域の短波長側の光を吸収し、長波長側の可視光を発生するものもある。一方、私たちの身の回りの光源について考慮してみると、紫外光、近紫外光を含むものも少なくない。例えば、図 2(右) に示すように、太陽光には紫外光が多く含まれていることが知られており、鉱石や珊瑚は蛍光発光により奇麗な色を見せる。

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], [15]: 蛍光物質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持ち、蛍光物質が出力する光の分光分布は蛍光物質により一定である。すなわち、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 (蛍光関数と呼ばれる) を見せる。このように蛍光は通常の反射特性とは大きく異なる特性を持っており、任意照明下での物体の見えを正確に再現するためには、通常の反射成分と蛍光成分とを分けて考慮する必要

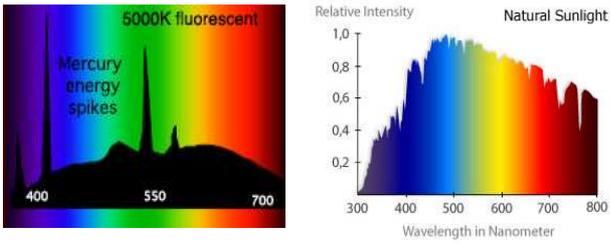
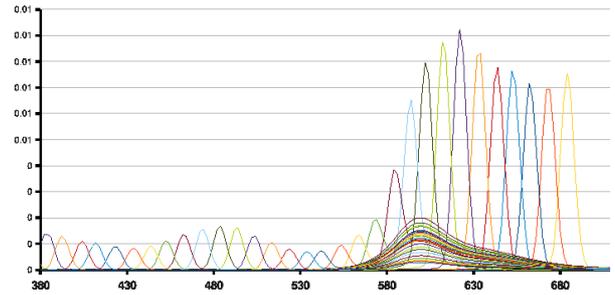
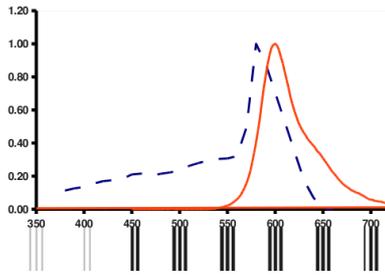


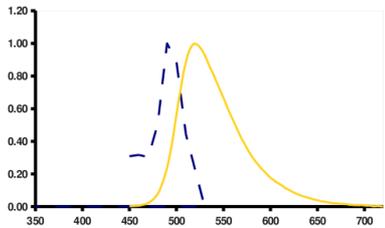
図2 蛍光灯および太陽光には紫外および短波長の成分が多く含まれる。



(a) 波長の異なる光源のもと観察されたオレンジ色の蛍光紙の分光特性。

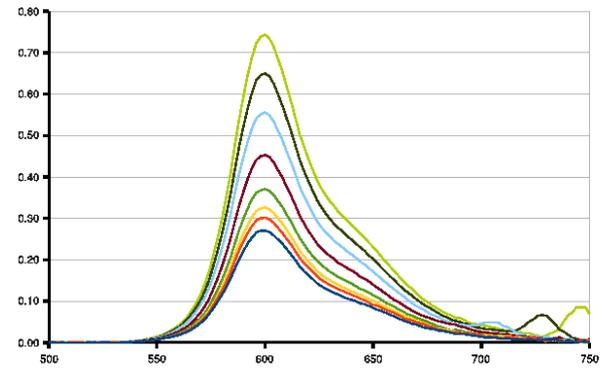


(a) オレンジ色の蛍光紙

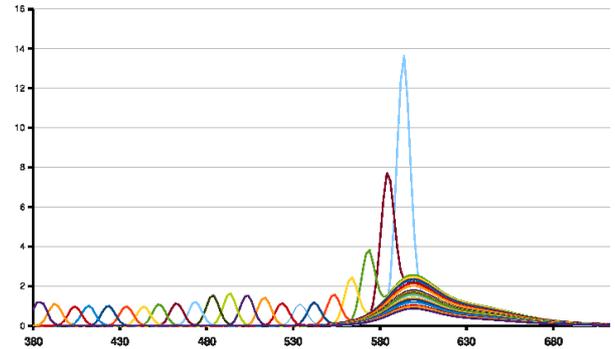


(b) 黄色の蛍光紙

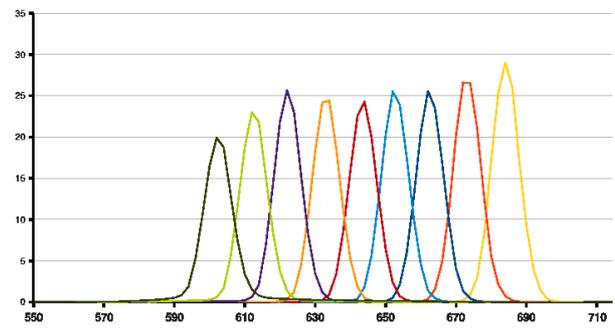
図3 励起関数(点線)と蛍光関数(実線)の例。



(b) 照明が紫外光: 蛍光成分のみが観察される。



(c) 照明が可視光: 反射成分と蛍光成分が観察される。



(d) 照明が可視光でかつ励起関数の領域外: 反射成分のみが観察される。

図4 反射特性と蛍光特性の混合物体: 入射光の波長変化に伴い変化する物体表面の分光特性。

がある。

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）の積として求めることができる。例えば、光源の分光分布を $I(\lambda)$ 、物体の分光反射率を $R(\lambda)$ とすると、観察される反射光の分光分布 $P(\lambda)$ は

$$P(\lambda) = I(\lambda)R(\lambda)$$

のように求まる。さらに、R,G,B の3色で構成される CCD カメラを通して観察される物体表面の明るさ p は、

$$p = \int_{380nm}^{720nm} \hat{c}(\lambda)I(\lambda)R(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

となる。ここで $\hat{c}(\lambda) = \{\hat{r}(\lambda), \hat{g}(\lambda), \hat{b}(\lambda)\}$ は、R, G, B に対するカメラの分光感度を表す。

一方、蛍光物体の場合は、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」、そして照明の分光分布

に基づき観察される明るさが決定される。ここで、励起関数 $Ex(\lambda)$ は波長 λ をどれだけ吸収するかということを示し、蛍光関数 $Em(\lambda)$ は波長 λ の光をどれだけ出力するかを示す。励起関数と蛍光関数の例を図3に示す。この図からも蛍光物質の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がよく分かる。

励起関数 Ex と蛍光関数 Em に基づき、単波長 λ_i の光を受けた際に観察される蛍光発光は、

$$P(\lambda, \lambda_i) = I(\lambda_i)Ex'(\lambda_i)Em(\lambda) \quad (2)$$

となり、 $Ex'(\lambda_i)$ は正規化された励起関数を表す： $Ex'(\lambda_i) \equiv \frac{Ex(\lambda_i)}{\int Ex(\lambda_i)d\lambda_i}$ を表す。ここで注目すべきは、この式における $I(\lambda_i)Ex'(\lambda_i)$ は入射光の各波長 λ_i に対して決定するスカラー係数としてのみ機能しているということである。すなわち、波長 λ_i の入射光を受けて観察される蛍光発光の分光分布 $P(\lambda, \lambda_i)$ は $Em(\lambda)$ のスカラー倍、どの入射波長 λ_i に対しても同じ形 $Em(\lambda)$ を示す。

$I(\lambda_i)$ の分光分布を持つ照明のもと観察される蛍光発光は、式(2)に基づき、照明の全ての波長において $P(\lambda, \lambda_i)$ を求め足し合わせるにより求まる：

$$P(\lambda) = \left(\int I(\lambda_i)Ex'(\lambda_i)d\lambda_i \right) Em(\lambda).$$

入射光の波長を表す λ_i の積分範囲は光源の波長帯により決定される。この蛍光物体をカラー CCD カメラにより観察する場合、画像中で観察される明るさは

$$p = \left(\int I(\lambda_i)Ex'(\lambda_i)d\lambda_i \right) \int_{380nm}^{720nm} \hat{c}(\lambda)Em(\lambda)d\lambda \quad (3)$$

となる。

ここまで、反射成分または蛍光成分のみに注目してカメラを通して観察される明るさについて考えてきた。先に述べたように、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を用いて計測したものを図4(a)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：各線が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している。

図4(a)の中で、紫外領域の照明である場合のみを抜き出し表示したものを図4(b)に示す。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。一方、照明光が可視領域の波長になる、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4(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ようになった(図4(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(どの波長の光を多く含むか)に応じて、物体の見えが大きく変化することが分かる。次節では、蛍光成分と照明色との関係、その反射成分との違いについて考えていく。

3.2 蛍光色の恒常性

本節では、照明色変化が蛍光発光に与える影響について考慮する。まず、式(3)のカメラの分光感度を表す $\hat{c}(\lambda)$ を CIE の等色関数 $\hat{x}(\lambda), \hat{y}(\lambda), \hat{z}(\lambda)$ に置き換え、蛍光発光を XYZ 表色系の色として表現する：

$$X = \int I(\lambda_i)Ex'(\lambda_i)d\lambda_i \int \hat{x}(\lambda)Em(\lambda)d\lambda, \quad (4)$$

$$Y = \int I(\lambda_i)Ex'(\lambda_i)d\lambda_i \int \hat{y}(\lambda)Em(\lambda)d\lambda, \quad (5)$$

$$Z = \int I(\lambda_i)Ex'(\lambda_i)d\lambda_i \int \hat{z}(\lambda)Em(\lambda)d\lambda, \quad (6)$$

さらに、蛍光関数 Em を XYZ 表色系の色として表現すると、

$$X_0 = \int \hat{x}(\lambda)Em(\lambda)d\lambda,$$

$$Y_0 = \int \hat{y}(\lambda)Em(\lambda)d\lambda,$$

$$Z_0 = \int \hat{z}(\lambda)Em(\lambda)d\lambda$$

となる。 X_0, Y_0 and Z_0 を式(4)から(6)に代入し、光源分布と励起関数から求まる値をスカラー係数 $k = \int I(\lambda_i)Ex'(\lambda_i)d\lambda_i$ とすると、 $X = kX_0, Y = kY_0, Z = kZ_0$ のように記述できる。さらに、蛍光関数から求めた X_0, Y_0, Z_0 を次式により色度に変換する：

$$x_0 = \frac{X_0}{X_0 + Y_0 + Z_0}, y_0 = \frac{Y_0}{X_0 + Y_0 + Z_0}.$$

次に、任意証明下で観察される蛍光発光の色度を求めると、

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X + Y + Z} \\ &= \frac{kX_0}{kX_0 + kY_0 + kZ_0} \\ &= \frac{X_0}{X_0 + Y_0 + Z_0} \\ &= x_0. \end{aligned}$$

同様に、 $y = y_0$ を得る。ここで注目すべきは、色度に変換することによりスカラー係数 k が打ち消され、照明の分光分布や励起波長に関わらず色度が一定となることである。次章では、照明色変化の影響を受けないという蛍光発光の色特性に着目し、照明色変化にともない観察された色変化に基づき対象物体の蛍光成分と反射成分を分離する手法を提案する。

4. 反射成分と蛍光成分の分離

反射成分と蛍光成分の両方を含む物体をカメラで観察した場合、画像中の各画素の明るさ p は対象物体からの反射光 p_O と蛍光発光 p_F の和となる [10]:

$$p = p_O + p_F.$$

反射光 p_O と蛍光発光 p_F に式 (1) と式 (3) を代入し次式を得る.

$$p = \int \hat{c}(\lambda) I(\lambda) R(\lambda) d\lambda + \int I(\lambda_i) Ex'(\lambda_i) d\lambda_i \int \hat{c}(\lambda) Em(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

ここで、カメラの分光感度 $\hat{c}(\lambda) = \{\hat{r}(\lambda), \hat{g}(\lambda), \hat{b}(\lambda)\}$ が非常に狭い波長帯域 (narrowband 仮定) により構成され、ある特定の波長に対してのみ応答すると仮定 [4] すると (注1) 式 (7) は、

$$p = \hat{c}(\lambda_n) I(\lambda_n) R(\lambda_n) + \left(\int I(\lambda_i) Ex'(\lambda_i) d\lambda_i \right) \hat{c}(\lambda_n) Em(\lambda_n) \quad (8)$$

となり、各画素の明るさ p は、各画素に対応する表面の点の反射関数 R と蛍光関数 Em の線形和として記述される。ここで、 λ_n ($n = \{R, G, B\}$) は各カラーバンドの応答波長に対応する。式 (8) に基づき、光源分布 I も未知という条件のもと、画素値 p のみに基づき反射関数 R と蛍光関数 Em を推定していく。本研究では、画像中に観察される反射成分と蛍光成分が統計的に互いに独立であるという仮定に基づき、独立成分分析 (Independent Component Analysis: ICA) [9] を用いて、この問題を解いていく。

ICA による解析は推定する信号源数以上の計測を必要とする。本研究では異なる 2 つの照明色下 (l_1 と l_2) で撮像された観測値 p_1 と p_2 に基づき反射成分と蛍光成分を分離していく。式 (8) に全画素の考慮を入れ、各カラーチャンネル $n = \{R, G, B\}$ に対して次式を得る。

$$\begin{bmatrix} p_1^j(\lambda_n) \\ p_2^j(\lambda_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1(\lambda_n) & f_1(\lambda_n) \\ r_2(\lambda_n) & f_2(\lambda_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R^j(\lambda_n) \\ Em^j(\lambda_n) \end{bmatrix}$$

総画素数 N の入力画像に対し、 p_i^j は i 番目の光源下において j 番目の画素で観察される明るさに対応し ($p_i^j : j = 1, 2, \dots, N$), R^j と Em^j は j^{th} 番目の画素に対応する反射関数と蛍光関数を表す。ここで、また、係数 r_i と f_i は、それぞれ $r_i(\lambda_n) = \hat{c}(\lambda_n) I_i(\lambda_n)$, $f_i(\lambda_n) = \hat{c}(\lambda_n) \int I_i(\lambda_i) Ex'(\lambda_i) d\lambda_i$ の値を示している。

(注1) : カメラに対する narrowband 仮定は色恒常性の分野で良く用いられる。

以下では、上記の式を $P_n = M_n S_n$ と簡略化し、 P_n を観測データ行列、 M_n を混合行列、 S_n を独立成分行列と呼ぶ。ICA を用いた解析では、まず最初に観測データ行列から混合行列を推定し、その後、独立成分を求める: $S_n = M_n^{-1} P_n$. ひとたび S_n が得られれば、各カラーバンド $n = R, G, B$ に対して、求めた S_n から反射成分 $R^j(\lambda_n)$ (または、反射関数 $Em^j(\lambda_n)$) に対応する行を抽出し、各画素の R, G, B 値とすることで反射成分 (または蛍光成分) のみで構成される画像が得られる。

4.1 ICA における不定性

ICA では、混合行列と独立成分行列が未知という条件のもと信号間の独立性のみに基づき分離を行うため、原信号の「順序」と「スケール」が一意に決まらないという問題が生じる。

順序: ICA を通して求めた独立成分行列 S のどちらが蛍光成分 (または反射成分) に対応するかは分からない。すなわち、

$$M_n = \begin{bmatrix} r_1 & f_1 \\ r_2 & f_2 \end{bmatrix}, S_n = \begin{bmatrix} R^j \\ Em^j \end{bmatrix},$$

または、

$$M_n = \begin{bmatrix} f_1 & r_1 \\ f_2 & r_2 \end{bmatrix}, S_n = \begin{bmatrix} Em^j \\ R^j \end{bmatrix}$$

のどちらかが解として得られる。

スケール: 推定された混合行列はスケールの不定性を含む。例えば、

$$\begin{bmatrix} r_1 & f_1 \\ r_2 & f_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R^j \\ Em^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1/\alpha & f_1/\beta \\ r_2/\alpha & f_2/\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha R^j \\ \beta Em^j \end{bmatrix}$$

のように、混合行列と独立成分行列の掛け合わせによりスケール α と β を打ち消すことが可能なため、独立成分行列 S_n はスケールの不定性を含んでしまう。以下では、これらの不定性への対応を説明する。

4.1.1 順序の不定性

3.2 節で導いた「蛍光成分の色度は照明色変化の影響を受けず一定である」という蛍光成分の特性に基づき順序の不定性の問題を解くことができる。まず、照明色変化に伴う各画素の色度変化を求める。 x_i^j と y_i^j が i 番目の照明における j 番目の画素に対応する点の色度とすると、画素 j の色度差は、

$$d^j = \sqrt{(x_1^j - x_2^j)^2 + (y_1^j - y_2^j)^2}$$

のように求まる。

次に、各画素に対し、推定された独立成分を含む割合を計算する。ICA により j 画素に対して推定された独立成分それぞれ強度を s_1^j と s_2^j として (注2), まず、その強度

(注2) : 推定された S_n の各行に対応する。

を正規化する:

$$s_1^{ij} = \frac{(s_1^j)^2}{\sum_i (s_1^i)^2}, s_2^{ij} = \frac{(s_2^j)^2}{\sum_i (s_2^i)^2}.$$

この割合と色度差 d^j との積を全画素で足し合わせることで、各独立成分に対し、全画素としてどれだけの色度差を示すかについて計算する.

$$t_1 = \sum_j s_1^{ij} d^j, t_2 = \sum_j s_2^{ij} d^j.$$

3.2 節で示したように蛍光成分の色度は照明色変化の影響を受けず一定となる. このことから、画素 j において蛍光成分が主な成分となる場合、対応する s^{ij} の値は大きく、色度差 d^j は小さくなることが予想される. これに従い、 t_1 の値が t_2 より小さい場合は s_1 が蛍光成分に対応すると考えられ、逆に t_2 の値が t_1 より小さい場合には、 s_2 が蛍光成分に対応すると判断することができる.

4.1.2 スケールの不定性

提案手法では、入力画像の R, G, B それぞれに対して ICA を適用し、反射成分と蛍光成分を推定する. そのため、ICA により各成分が推定された後、各成分の R, G, B 間においてスケール不定性を解く必要がある. この手順を踏まえることで、各成分内のスケール調整は行えるものの、反射成分と蛍光成分の強度差は求めることができない.

蛍光成分に対応する混合係数 $f_1(\lambda_n) = \hat{c}(\lambda_n) \int I_i(\lambda_i) E x'(\lambda_i) d\lambda_i$ を、カメラの応答特性 $\hat{c}(\lambda_n)$ で割った値 $\frac{f_1(\lambda_n)}{\hat{c}(\lambda_n)} = \int I_i(\lambda_i) E x'(\lambda_i) d\lambda_i$ は、照明の分光分布、蛍光成分の励起関数のみにより決定される値となる. すなわち、カラーバンドに因らず一定の値を示す: $\frac{f_1(\lambda_R)}{\hat{c}(\lambda_R)} = \frac{f_1(\lambda_G)}{\hat{c}(\lambda_G)} = \frac{f_1(\lambda_B)}{\hat{c}(\lambda_B)}$. この関係をもとに、R, G, B 間のスケール調整を行う:

$$E m^{ij}(\lambda_n) = s_n * \hat{c}(\lambda_n) / f_1.$$

反射成分に対しては、画像内の白色物体を指定し、対応する画素の反射成分が白色となるようなスケールを求め、同じスケールを用いて画像全体のカラー調整を行った. 蛍光成分に関しても、画像内に既知の蛍光成分がある場合にはその明るさを参照としてスケール調整を行うこともできる.

5. 実験結果

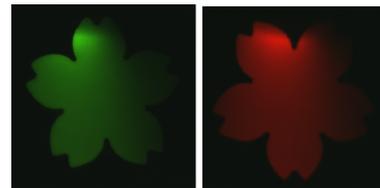
様々な色で構成される版画に黄色とオレンジ色の蛍光紙で装飾を施した物体を対象として実験を行った. 図 5 上段に白色光のもとで撮影された参照画像(左)と緑とピンクの異なる照明色のもと撮影された入力画像(中央, 右)を示す: 参照画像中、中央の鳥の左右にある鮮やかな黄色とオレンジ色の花が蛍光紙に対応する. 図 5(b)に提案手法による推定結果を示す(左: 蛍光成分, 右: 反射成分). 図において蛍光成分を示す画像を見ると、オレ



(a) 参照画像(白色光のもとで観察)と入力画像



(b) 推定された蛍光成分(左)と反射成分(右)



(c) 紫外光のもとで観察された蛍光成分

図 5 版画を用いた実験結果.

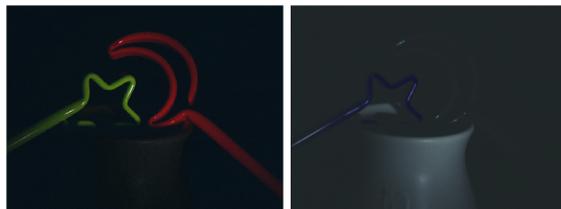
ンジ色の蛍光紙からは参照画像と同じようなオレンジ色の蛍光成分が、黄色の蛍光紙から緑色の蛍光成分が推定されいる様子が分かる. 実際に紫外光のもと対象物体を観察してみたところ、蛍光成分の正解値としてオレンジと緑の蛍光成分が抽出された(図 5(c))^(注3). また、蛍光成分を示す結果画像では、版画で構成されている背景が全く含まれていないことから、提案手法による成分分離がうまく働いていることが分かる. 一方、版画の部分において推定された反射成分の色も図 5(a)の参考画像と一致しており、正しく推定されている. ここで興味深いことは、オレンジの蛍光紙からはほとんど反射成分が抽出されなかったのに対し、黄色の蛍光紙からはオレンジ色の反射成分が抽出されたことである. 本研究で提案する技術により、オレンジ色の反射成分と緑色の蛍光成分の組み合わせにより鮮やかな蛍光黄色が出力されていることが分かった.

次に、図 6 に蛍光塗料が塗られたペンと白色の陶器により構成される対象シーンに対しての分離結果を示す. 図 6(a)に参照画像と入力画像を示し、結果画像を図 6(b)に示す(左: 蛍光成分, 右: 反射成分). 推定された蛍光成分は紫外光で撮像された正解の蛍光色(図 6(c))と一致しており、正しく推定できていることが分かる. また、反射成分を示す結果画像では陶器のみ、蛍光成分を含む画像ではペンのみを含んでおり、対象物体の蛍光成分の特徴により分離がうまく働いている様子が良くわかる.

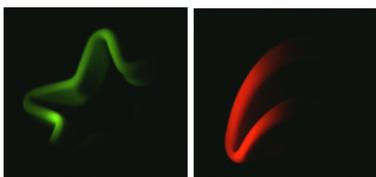
(注3): 照明が紫外のみ分光特性を持つ場合、蛍光成分のみの明るさが観察される.



(a) 参照画像 (白色光のもとで観察) と入力画像



(b) 推定された蛍光成分 (左) と反射成分 (右)



(c) 紫外光のもとで観察された蛍光成分

図 6 蛍光塗料を含む物体と陶器.

6. ま と め

塗料, 染料, 鉱石, 植物など, 私たちに身の回りには蛍光成分を含む物体が多数存在する. これに対し, これまで提案されてきたコンピュータビジョンおよび画像処理技術の多くは, 対象物体に蛍光成分が含まれず反射成分のみを含むと想定しており, 蛍光成分に対応することは難しい. 本論文では, 蛍光成分と反射成分の両方を含む物体の見えに関する解析を行い, 照明色変化に伴い観察される物体の見えの変化を記述する線形モデル式を示した. さらに, 蛍光成分は照明色変化の影響を受けないという特徴に注目し, 照明色変化にともない観察された色変化に基づき対象物体の蛍光成分と反射成分を分離する手法を提案する. 具体的には, 照明色変化に伴い観察される色変化に基づく独立成分解析により, 対象物体の反射成分, 蛍光成分, 照明色も未知という条件下での分離する技術を提案した.

文 献

- [1] V. Agarwal and B. R. Abidi. An overview of color constancy algorithms. *Journal of Pattern Recognition Research*, 1:42–54, 2006.
- [2] K. Barnard. Color constancy with fluorescent surfaces. pages 257–261, 1999.
- [3] K. Barnard, V. Cardei, and B. Funt. A comparison of computational color constancy algorithms. *IEEE Transactions on Image Processing*, 11(9):972–996, 2002.
- [4] M. Ebner. *Color Constancy*. Wiley Publishing, 2007.
- [5] P. Emmel and R. D. Hersch. Spectral colour prediction

- model for a transparent fluorescent ink on paper. *Proceedings of the Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications*. Society for Imaging Science and Technology, 1998.
- [6] H. Farid and E. Adelson. Separating reflections and lighting using independent components analysis. In *Computer Vision and Pattern Recognition.*, volume 1, pages 267–275, 1999.
- [7] D. A. Forsyth. A novel algorithm for color constancy. *Int. J. Computer Vision*.
- [8] 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.
- [9] A. Hyvarinen and E. Oja. Independent component analysis: algorithms and applications. *The Official Journal of the International Neural Network Society*, 13(4-5):411–430, 2000.
- [10] G. M. Johnson and M. D. Fairchild. Full-spectral color calculations in realistic image synthesis. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 19:47–53, 1999.
- [11] H. Kaneishi and R. Kamimura. Modeling and estimation spectral reflectance of fluorescent object. *Orc. ICIS*, pages 427–428, 2002.
- [12] S. Lin and H.-Y. Shum. Separation of diffuse and specular reflection in color images. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1:341–349, 2001.
- [13] T. Nakajima and S. Tominaga. Spectral reflectance estimation of fluorescent materials by using camera images. In *Proceedings of Color Science Association of Japan*, pages 74–75, 2010.
- [14] S. Nayar, X.-S. Fang, and T. Boult. Removal of specularities using color and polarization. In *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 583–590, 1993.
- [15] A. Springsteen. Introduction to measurement of color of fluorescent materials. *Analytica Chimica Acta*, 380(2-3):183–192, 1999.
- [16] N. Tsumura, N. Ojima, K. Sato, M. Shiraishi, H. Shimizu, H. Nabeshima, S. Akazaki, K. Hori, and Y. Miyake. Image-based skin color and texture analysis/synthesis by extracting hemoglobin and melanin information in the skin. *SIGGRAPH '03*, pages 770–779, New York, NY, USA, 2003. ACM.