

ハイライト検出による複数光源分光分布の推定

今井 良枝[†] 加藤 優[†] 門井 英貴[†] 堀内 隆彦[‡] 富永 昌治[‡]

[†] [‡] 千葉大学大学院融合科学研究科 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

E-mail: [†] {yoshie.imai, yu_kato, kadoi}@graduate.chiba-u.jp, [‡] {horiuchi, shoji}@faculty.chiba-u.jp

あらまし 本稿では、自然光に加えて、蛍光灯やLEDなどの人工光源を含んだ複数光源の環境下におけるシーン照明の分光分布を、分光画像から推定する手法を提案する。我々は、不均質誘電体の物体表面のハイライトには、シーンの照明に関する多くの情報が含まれていることに着目した。複数光源のシーンにおいて、曲面を持つ物体の表面にはそれぞれの光源がハイライトとして個別に観測される。そこで、分光イメージングシステムによって計測されたシーンから、ハイライト領域を抽出する方法を述べる。さらに、各ハイライト領域から照明光ベクトルを推定し、光源の分光分布を推定する。提案手法の有効性を実験によって示す。

キーワード 二色性反射モデル、鏡面反射、複数光源、ハイライト検出

1. はじめに

画像データからシーンの照明を推定する技術は視覚情報に関わる重要な要素技術であり、色再現や色恒常性、画像データベースの認識自動化等に用いられている。シーンの照明推定には長い歴史があり、画像データからシーンの照明スペクトルを推定する手法も多く提案されている。しかしながら、それらアルゴリズムの多くでは単一の光源から照射される均一な照明を仮定しているものが大半である[1-10]。また、鏡面球を利用してシーンの照明を獲得した手法もあるが、反射率が既知である物体を使用しなければならないという制約がある[11]。

近年、蛍光灯やLEDのような人工的な光源が我々の生活で身近になってきた。そのため、我々の生活において、これらの人工的な光源や太陽からの自然光が入り混じった複雑な照明環境が構築されている。本稿では、人工光源と自然光源からなる複雑な照明環境下における、シーン照明の分光分布を推定する手法を提案する。

イメージング系として、液晶チューナブルフィルタと、冷却モノクロ CCD カメラと制御用 PC から構成される高次元の分光画像システムを実現する。本稿では、分光画像システムによって獲得される照明シーンに映っている物体は、プラスチックや塗料などの誘電体から構成されていると仮定する。二色性反射モデルによれば、誘電体から反射される光は鏡面反射成分と拡散反射成分の2つの成分から構成され、ハイライトに多く含まれる鏡面反射成分は照明を推定するために使用できる[2]。そのため、照明推定問題は、鏡面反射成分を推定する問題に帰着する。いま、曲面状の誘電体物体表面が、異なる方向から様々な光源によって照らされているとする。このとき、各ハイライト領域から推定された照明スペクトルは、それぞれの光源に対応していることに注目する。すると、複数の照明光は、曲面物体において異なる鏡面反射のハイライト領域から推定できることがわかる。

照明推定の最初のステップは、観察された物体の画像からハイライト領域を検出することである。物体のハイライトを検出するために、これまで数多くのアルゴリズムが提案されてきた

[12-19]。本稿では、(1)輝度の可変閾値を試用する手法、(2)輝度成分に加え色相成分も使用する手法、(3)偏光フィルタを使用する手法の3つの検出手法について検討する。

照明推定の第2のステップは、抽出されたハイライト領域から照明のスペクトルを推定することである。物体表面のハイライト領域の高次元の画像データを、この高次元空間内の2つの主成分によって張られる2次元部分空間に射影する。このとき、この空間における画素分布(ヒストグラム)を、鏡面反射成分と拡散反射成分に対応する2つの直線状のクラスタに分割する。上述したように、鏡面反射成分の方向ベクトルは、光源のベクトルと一致することから、照明のスペクトルは鏡面反射成分のクラスタの主成分ベクトルを抽出することによって推定する。

提案手法の実現可能性は、誘電体の物体を撮影した実際のシーンで実験的に評価する。まず、提案したハイライト検出の性能の詳細を比較する。次に、LEDと蛍光灯、自然光を使用した複雑な照明環境において、推定した照明の分光分布の精度を検証する。

2. 分光イメージングシステム

図1に、本研究で用いたカメラシステムを示す。本稿の計測系として、モノクロ CCD カメラ (Retiga1300-Peltier 冷却)、液晶チューナブルフィルタおよび PC から構成される高次元の分光画像システムを用いる。システムでは、可視波長の範囲(400-700nm)の5nm間隔の波長に加え、一般的な蛍光灯のピーク波長に対応する8つの波長(404, 436, 488, 544, 584, 588, 612, 656nm)を測定し、69次元の画像データで照明の分光スペクトルを表現する。

分光カメラシステムの総合分光感度特性 $R_k(\lambda)$ は、 k チャンネルの液晶チューナブルフィルタの透過率 $t_k(\lambda)$ 、モノクロ CCD カメラの感度 $r(\lambda)$ 、および露光時間 e_k を乗算することにより計算され、次式のように求められる。

$$R_k(\lambda) = e_k \cdot t_k(\lambda) r(\lambda), \quad (k=1, 2, \dots, 69). \quad (1)$$

図2に、総合分光感度特性を示す。CCDカメラのシャッタースピードは、外部のPCから簡単に制御できる。本稿では、各チャンネルで感度がほぼ一定になるように、露光時間を制御している。

物体表面からの反射光（カラー信号）の放射輝度 $Y(\lambda)$ は、次式のように計算される。

$$Y(\lambda) = E(\lambda)S(\lambda), \quad (2)$$

ここで、 $E(\lambda)$ は物体への入射光の分光分布であり、 $S(\lambda)$ は物体表面の分光反射率である。 k 番目のチャンネルのセンサの出力 ρ_k は、次式のように記述される。

$$\rho_k = \int_{400}^{700} Y(\lambda)R_k(\lambda)d\lambda. \quad (3)$$

総合分光感度 $R_k(\lambda)$ の帯域が十分に狭いと仮定することによって、カラー信号は次式のように近似的できる。

$$Y(\lambda_k) = \rho_k / \int_{400}^{700} R_k(\lambda)d\lambda, \quad (4)$$

ここで λ_k は k 番目のチャンネルの波長である。我々は $Y(\lambda_k)$ ($k=1, 2, \dots, 69$)を補間することによって、可視波長の領域の任意の波長におけるカラー信号 $Y(\lambda)$ を得ることが可能である。このように物体表面のそれぞれの画素点から観測されるカラー信号は、総合分光感度 $R_k(\lambda)$ を知ることによって画像システムの出力から推定できる。



図1 分光画像システム

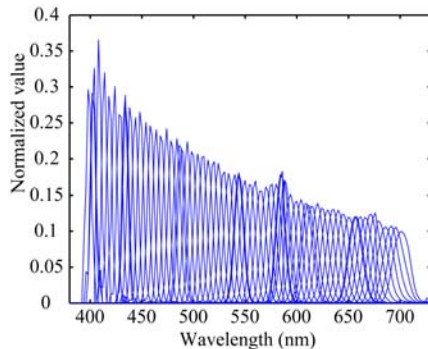


図2 システムの総合分光感度特性

3. ハイライト領域の検出

物体表面のハイライト部分の画像データから、シーン照明に関する重要な情報を得ることができる。二色性反射モデルによれば、プラスチックや塗料のような誘電体から反射される光は、鏡面反射成分と拡散反射成分の2つの成分から構成される。そこで、ハイライトに多く含まれる鏡面反射成分は、照明光の推定に使用できる。本章では、3種類のハイライト検出手法を提案する。

3.1. 輝度の可変閾値による手法

物体表面から観察される各画素のカラー信号（反射光強度）に対して、輝度値 Y を次式のように算出する。

$$Y = \int_{400}^{700} Y(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda, \quad (5)$$

ここで、 $\bar{y}(\lambda)$ はCIEの標準観察者の等色関数である。ハイライト領域を単純に検出する方法として、画像の輝度値のヒストグラムに対して、固定閾値を用いるアプローチが考えられる。しかしながら、黄色の物体の輝度は明るく、青色の物体の輝度は暗いなど、一般に輝度値は色相に依存して変化するため、様々な色の物体が同時に含まれるシーンに対して、固定閾値では適切にハイライトを検出できない。

そこで、一つめの方法として、閾値を変化させながら反復的にハイライトを検出する手法を提案する。図3に、提案手法の手順を示す。まず、画素それぞれの輝度値を計算し、画像全体の輝度のヒストグラムを算出する。次に、輝度ヒストグラムの分布形状において、明確に谷となる値を閾値として、ハイライト候補を抽出する。次に、検出された領域を画素の連結を判断することによってラベル付ける。このとき、連結画素数のカウントがごく小さいならば、その領域はノイズとして除外する。ハイライト候補として抽出された領域の連結画素数が一定数以上のとき、その連結領域において同様に閾値を求め、ハイライト候補を絞り込む。この処理をそれぞれのターゲット領域に対して繰り返すことによって、様々な色の物体が含まれていても、適切にハイライト領域を検出することが可能になる。

例えば、図8において、左下の青いカップのハイライト領域は低い輝度の閾値を用いて最初に検出される。緑と黄色の物体のハイライト領域は、4回処理を繰り返した後に、高い輝度の閾値によって検出される。

3.2. 輝度・色相成分を利用した手法

二つめの手法として、色相成分を利用して、ハイライト領域を検出する手法を提案する。図4に、本手法の手順を示す。まず、等色関数によってカラー信号の三刺激値 XYZ を計算し、各画素の xy 色度座標を三刺激値から次式によって求める。

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}. \quad (6)$$

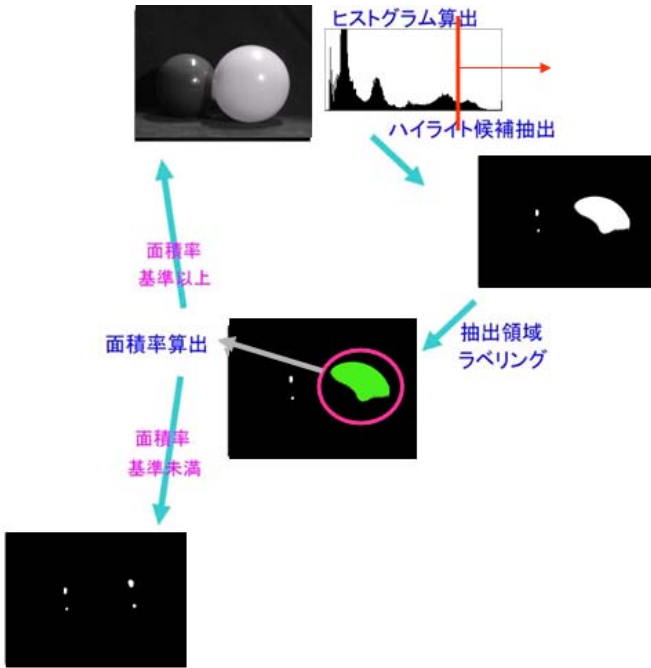


図3 輝度の可変閾値を利用したハイライト検出方法

そして、色相角 H を以下のように定義する。

$$H = \arctan\left(\frac{y - y_0}{x - x_0}\right), \quad (7)$$

ここで、 (x_0, y_0) は基準白色の色度である。基準白色は未知であるが、一般にシーン照明の色度は黒体放射の色度に近いことが知られており、基準白色も xy 色度座標上の黒体放射軌跡の近辺に位置すると考える。そこで、本来は一樣なものを仮定している仮説もあるが、白色基準として、 $(1/3, 1/3)$ のような単純な色度や、Gray-World 仮説(画像の全画素の平均が光源色)、White-Patch 仮説(最も明るい画素が光源色)を適用する。

通常、物体に鏡面反射が起こると、光源色が物体色と同じ色相でない限り、鏡面反射部分は周囲と違う色相になると考えられる。そこで、異なる色相に囲まれた領域において、ある一定以上の輝度であれば、その部分をハイライト領域として検出する。輝度を参照するのは、低輝度のノイズの影響を排除するためである。

3.3. 偏光を利用した手法

三つめの方法として、偏光情報を利用する方法を提案する。物体表面から反射された光の偏光特性は、ハイライト検出に有効であると考えられる。カメラシステムの前に取り付けた偏光フィルタを回転させることによって任意方向の直線偏光を観測することができる。反射光における直線偏光成分の割合を偏光度 ρ として定義すると、偏光度 ρ は次式のように計算される。

$$\rho = (I_{\max} - I_{\min}) / \left\{ I_{\max} + \left(\frac{T_p(\lambda)}{T_N(\lambda)} - 1 \right) I_{\min} \right\}, \quad (8)$$

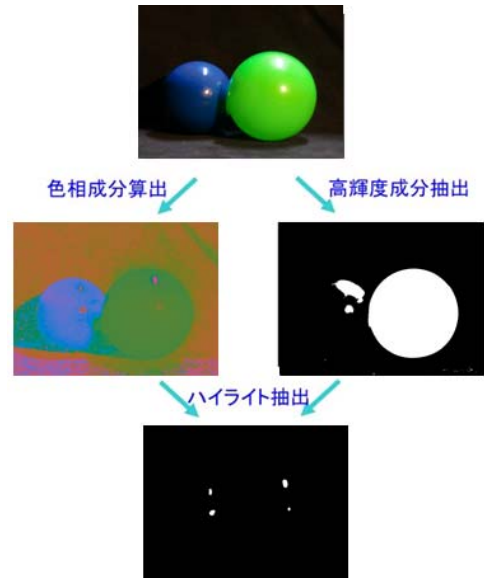


図4 輝度・色相成分を使用したハイライト検出方法

ここで、 $T_p(\lambda)$ は直線偏光の透過率であり、 $T_N(\lambda)$ は非偏光の光の透過率である。また、 I_{\max} と I_{\min} はそれぞれ反射した光の最大強度と最小強度である[19]。前述したように、誘電体から反射された光は、拡散反射成分と鏡面反射成分の2つの成分に分割される。鏡面反射成分が偏光方向で強く変化するのに対して、拡散反射成分は偏光しておらず、偏光方向に対して不変である。偏光度は、0 から 1 の間で変化する。 $\rho = 1$ は、拡散成分のみで構成された反射光のように全く偏光していない状態を意味している。 $\rho = 0$ は完全に拡散している状態を示し、鏡面反射成分がまったく含まれていない純粋な拡散反射となる。

図5に、偏光方向の関数として誘電体から反射された光の透過率を描画する。偏光フィルタの回転方向に対して、最大 I_{\max} と最小 I_{\min} の間で正弦関数状に変化する。誘電体に対して、この振幅の大きさは鏡面反射領域ではかなり大きくなるが、鏡面反射領域以外では小さくなる。そのため、偏光度 ρ は鏡面反射領域に対しては大きくなるので、すべての画素に対して計算された偏光度 ρ に閾値を設定することによって、ハイライト領域の抽出が可能となる。

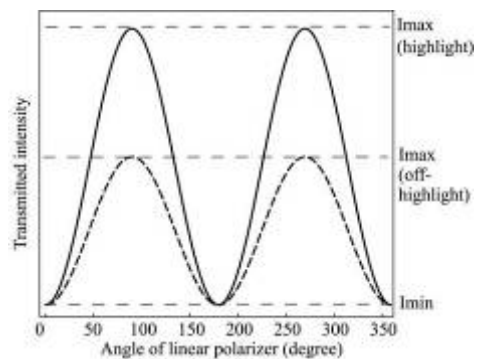


図5 ハイライト領域と非ハイライト領域の偏光度

4. 照明光分布の推定アルゴリズム

二色性反射モデルによれば、プラスチックや塗料のような不均質誘電体から反射される光は、鏡面反射成分と拡散反射成分の2つの成分から構成され[20]、次式のように表される。

$$Y(\lambda) = Y_S(\lambda) + Y_D(\lambda), \quad (9)$$

ここで、添字の S と D はそれぞれ鏡面反射成分と拡散反射成分に対応する。 $S_S(\lambda)$ と $S_D(\lambda)$ を2つの成分に対する表面のスペクトル反射とし、 $E(\lambda)$ は入射光のスペクトルパワー分布とすると、反射光は次式のように記述される。

$$Y(\lambda) = S_S(\lambda)E(\lambda) + CE(\lambda), \quad (10)$$

ここで、 C は可視領域の波長において定数である。そのため、鏡面反射成分は照明の推定に使用できる。

Y をカメラ出力の n 次元ベクトルとする。前述したように、鏡面反射の表面は2次元である。画像データのそれぞれのハイライト領域は、高次元のデータの2つの主成分 (C_1, C_2) によって張られる2次元の空間に射影される。これらの成分 \mathbf{p}_1 と \mathbf{p}_2 は n 次元の画像データのセットから算出される。このとき、次式のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1' \\ \mathbf{p}_2' \end{bmatrix} \mathbf{Y}, \quad (11)$$

図6に、ハイライト領域の画像データから射影された2次元空間 (C_1, C_2) における画素分布 (ヒストグラム) の一例を示す。この空間における画素分布は、2つの直線状のクラスタに分割される。一方のクラスタは鏡面反射によるハイライトの画素に対応し、もう一方のクラスタは拡散反射によるマットな画素に対応する。図に示されるように、ハイライトのクラスタの方向ベクトルが照明のベクトルと一致することに着目した。すなわち、照明ベクトルの推定は、画素クラスタにおける直線の傾きを求めることに帰着する。このような直線成分は、画素分布に対する主成分分析やハフ変換を適用することによって抽出できる[22]。主成分分析による直線検出の方がハフ変換よりも計算コストの面で優れているため、主成分分析を使用して照明ベクトルを推定する。その結果、照明ベクトルはハイライトのクラスタの方向ベクトル (C_1', C_2') を抽出することによって推定することができ、式(12)に示されるように、2次元の方向ベクトルを高次元のスペクトル空間に逆変換することによって、そのハイライトに対応する照明の分光分布 \mathbf{E} を得ることができる。

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1' \\ \mathbf{p}_2' \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} C_1' \\ C_2' \end{bmatrix}, \quad (12)$$

ここで、 $+$ は一般化逆行列を示す。

また、本稿では、凸状の表面を持つ物体が異なる方向から複数の光源によって照らされるとき、それぞれのハイライト領域

から推定された照明スペクトルは、それぞれの光源に対応することに着目する。すなわち、それぞれのハイライト領域が一つの光源のみによって照らされ、複数光源の分光分布の結合はないと仮定する。さらに、ハイライト領域によって生成された反射は他の物体に干渉せず、2次光源とならないと仮定した。

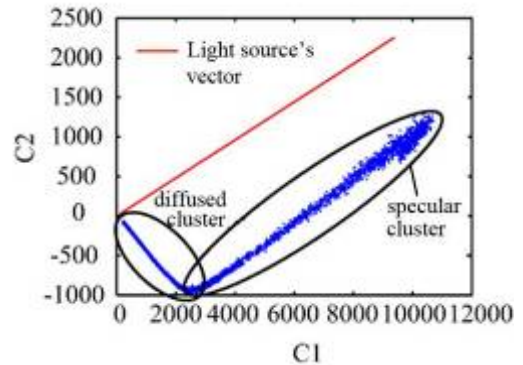


図6 ハイライト領域の2次元空間への射影

5. 実験

分光イメージングシステムの画像データに対して、複数光源下の照明の分光分布を推定する提案手法を調査した。本章では提案手法の実現可能性を示すために、ハイライト検出と照明光推定の2段階で実験的に評価を行った。

5.1. 実験条件

図7に、実験環境を示す。テーブルの上に置かれたプラスチックの物体が3つの異なる光に照らされている。3つの光源は、(1) 窓からの環境光 (外光)、(2) 色比較検査用(D65型)三波長型の蛍光灯、(3) LED光源 (シャープ社製、DL-D001N LED) である。分光イメージングシステムのカメラシステムはテーブルに置かれた物体に向かって設置されている。また、分光放射輝度計 (Photo Research Inc., PR655) によって完全拡散白色板を計測し、それらの計測値を正解値として使用した。

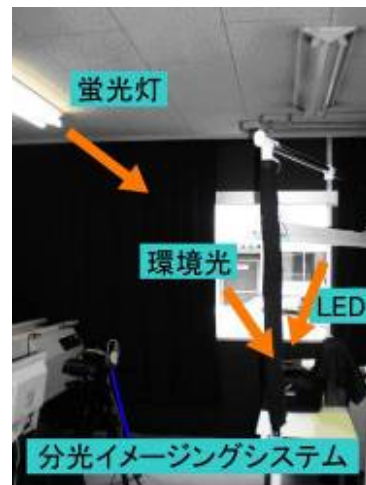


図7 ハイライト領域の2次元空間への射影

5.2. ハイライト検出結果

図 8 に、実験に使用した様々な色の物体を含むシーンを示す。このシーンに対して、輝度値に対する固定閾値によってハイライト領域を検出した結果を図 9 に示す。このような単純な方法では、ハイライト領域を適切に検出できないことがわかる。

図 10 に、3.1 で述べた輝度の可変閾値を利用した手法の実験結果を示す。図 10(a)は、反復処理の判断となる連結画素数（面積率）を全画素数の 5%とした場合の結果である。図に示されるように、黄色の物体の上部のハイライトが適切に検出できていない。しかしながら、閾値を 0.3%とした場合、図 10(b)に示されるように、検出精度が向上することがわかった。

図 11 は、3.2 で述べた輝度と色相の両成分を用いた手法の実験結果を示す。図 11(a)には、黒体放射軌跡と基準白色に用いた色度の xy 色度図を示す。いずれの基準白色も黒体放射軌跡の近辺に位置するが、色度に差がある。図 11(b)に、基準白色として、単純に(1/3, 1/3)を、図 11(c)には Gray-World 仮説によって求められた色度を、図 11(d)に White-Patch 仮説によって求められた色度を用いたハイライト検出結果をそれぞれ示す。実験の結果、基準白色の色度の差が検出結果に影響することが確認できる。最もハイライトが適切に検出されているのは(c)に示される Gray-World 仮説であるが、左下の青色のカップにおいては不十分である。逆に(b)では、青色のカップにおいてはハイライトが適切に検出されているが、その他の物体ではうまく検出できていない。また、いずれの結果も右下の黄色のカップの白色の底がハイライトとして間違っ検出されてしまうことがわかった。

図 12 は、3.3 で述べた偏光フィルタを使用した手法の実験結果である。図 12(a)には、偏光度の画像が示されている。鏡面反射によるハイライト、あるいは光沢領域は画像中の明るい領域に対応する。図 12(b)にハイライトの検出結果を示す。ここで偏光度は物体表面への入射角に大きく影響されることに気づく。物体の曲面形状によって光の入射角が異なるため、ブリュスター角 (Brewster angle) から遠い角度では偏光度が減少してしまう。黄色のカップと緑色の物体では、ハイライト領域がほとんど検出されなかった。これらの結果から、(1)の手法は色によって反復回数が異なり、また、(2)の手法は物体の色により結果が異なることがわかった。そこで、図 13 に、表面がテクスチャ模様をもつ物体のハイライト検出の実験結果について示す。図 13(a)に、蛍光灯と LED からなる照明で照らされた、白地にテクスチャのある物体を示す。図 13(b)に、(1)可変閾値の手法で検出を行った結果を示す。白地の上のハイライトは概ね検出できているが、テクスチャ上のハイライトは検出できていない。図 13(c)に、(2)輝度・色相成分（基準白色：Gray-World 仮説）を用いてハイライト検出を行った結果を示す。鏡面反射以外の部分も検出してしまい、テクスチャ上のハイライトは、(1)の手法よりさらに検出できないことがわかった。

表 1 に、(1)から(3)の 3 つの手法の検出特性をまとめる。(1)の手法によってほとんどのハイライトを検出できた。しかしながら白い物体の表面のハイライトが検出できない場合がある。

加えて、表面にテクスチャがある物体についても検出できないことが多い。これに対して、(3)の偏光方式は表面のテクスチャや色に影響されずに検出できる。しかしながら、偏光度は物体への光源の入射角に依存してしまう。すなわち、この手法は不安定であり、照明の幾何に依存してしまう。さらに、フィルタを回転させて数回撮影しなくてはならず、計測時間とメモリ量が多くなるという問題点がある。以上の結果から、通常の分光イメージングシステムによるハイライト領域の検出に対しては、テクスチャが多い物体を除けば、(1)の手法がもっとも適していると考えられる。



図 8 様々な色の物体を含んだ実験に使用したシーン



図 9 輝度の固定閾値で抽出した結果

5.3. 照明光分布の推定結果

図 14(a)は、図 8 のシーンの一部分を示している。図 14(b)-(d)は提案したアルゴリズムにより得られた照明推定結果である。それぞれの図の青い曲線が推定された分光分布であり、赤い曲線が分光放射輝度計で直接測定された分光分布である。赤い物体の表面を異なる方向から 3 つの光源が照らしている。この場合、3 つのハイライト領域がそれぞれ 3 つの光源に対応する。領域 A は、強いスパイクを持つ蛍光灯の光である。提案法により、スパイクのピーク波長から蛍光灯と同定することができる。領域 B は LED 光源である。さらに領域 C は外光であり、ハイライト領域から自然光源のスペクトルを推定することができる。

表 2 に、推定値と測定した正解値の分光分布の平均二乗誤差 RMSE とベクトル誤差を示す。ベクトル誤差は 4 章で述べた高次元のデータの 2 つの主成分 (C_1, C_2) によって張られる 2 次元空間における角度誤差を算出した。領域 A のベクトル誤差が多少あるが、図 14(b)-(d)にも示されるように、推定値と正解値はかなり近い結果が得られた。これらの結果は提案した照明推定手法の実現可能性が高いことを示している。

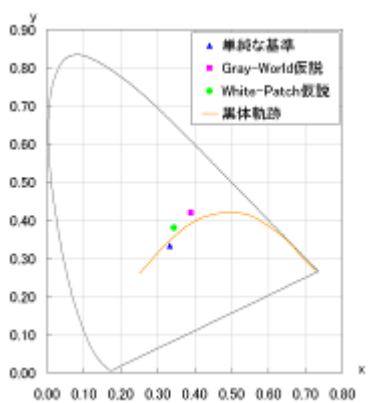


(a) 反復処理の閾値 5%

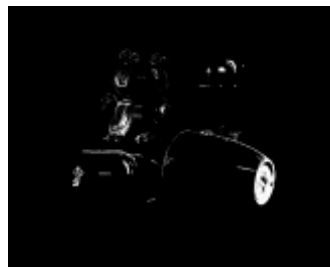


(b) 反復処理の閾値 0.3%

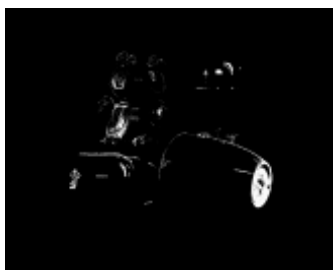
図 10 輝度の可変閾値によるハイライト検出結果



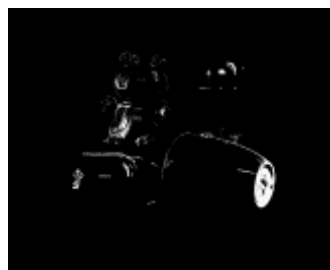
(a) 基準白色の xy 色度図



(b) 単純な基準白色(1/3, 1/3)



(c) Gray-World 仮説の基準白色

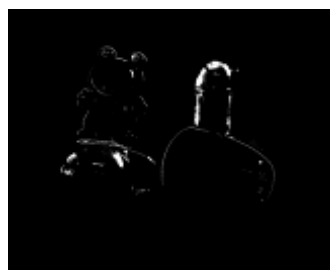


(d) White-Patch 仮説の基準白色

図 11 輝度・色相成分によるハイライト検出結果



(a) 偏光度画像



(b) ハイライト検出結果

図 12 偏光フィルタによるハイライト検出結果

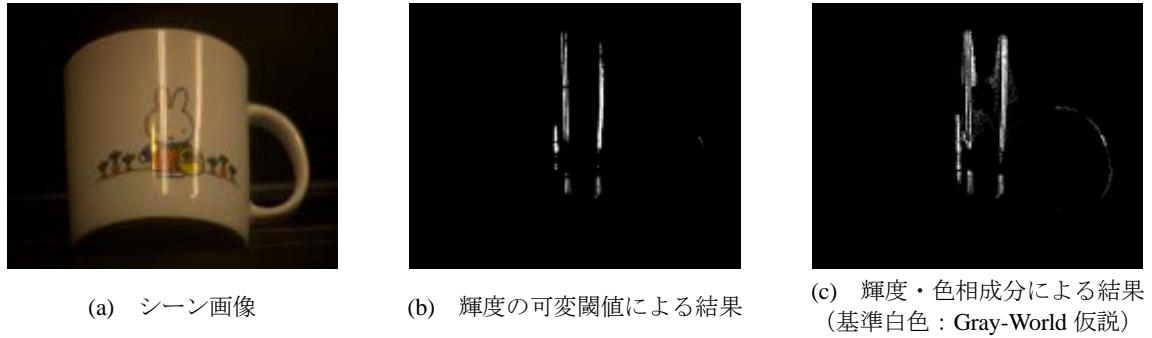


図 13 テクスチャ物体のハイライト検出結果

表 1 3手法のハイライト検出特性の比較

検出手法	白い物体	テクスチャ物体	計測時間	メモリ量	算出時間	照明の幾何
(1) 輝度の可変閾値	△	×	○	○	△	○
(2) 輝度と色相成分	×	×	○	○	○	○
(3) 偏光フィルタ	○	○	×	×	×	×

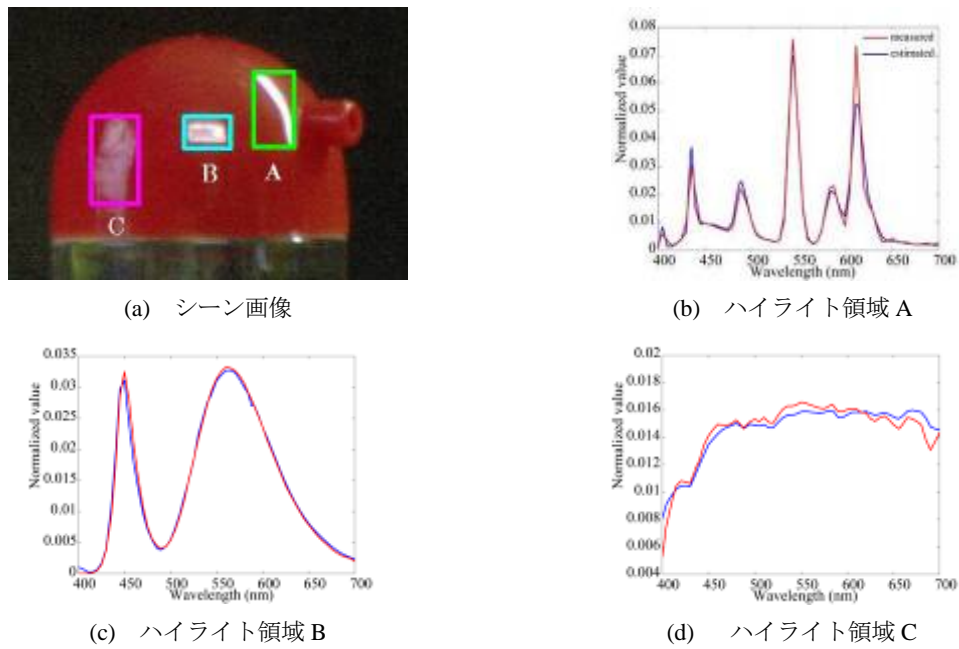


図 14 照明光推定結果

表 2 推定値と正解値の RMSE とベクトル誤差

	領域A	領域B	領域C
RMSE	0.0038	0.0008	0.0007
ベクトル誤差 [°]	4.21	0.72	0.96

6. まとめ

本稿では、複雑な光源下の複数の光源のシーンの分光分布を推定する手法を提案した。分光分布は、高次元の分光イメージングシステムで取得された画像データを利用して推定された。二色性反射モデルによれば、不均質誘電体の物体表面のハイライトはシーンの照明の多くの情報を含む。そこで、ハイライトを検出する(1)輝度の可変閾値を使用する手法と(2)輝度成分と色相成分の両方を使用する手法、(3)偏光フィルタを使用する手法の3つの手法を提案した。次に、曲面上の物体表面が異なる方向から複数光源により照らされているという仮定の下に、ハイライト領域の画像データからそれぞれの光源の照明スペクトルを推定した。提案手法の有効性は、実際のシーンにおいてプラスチックの物体を使用して実験的に示された。実験の結果、輝度の可変閾値を使用するハイライト検出手法が、通常のイメージングシステムによってハイライト領域を検出する手法として最も適していることが示された。また、検出されたハイライト領域から照明光の分光分布を推定した結果、良好な結果が得られた。

今後は、ぼやけて広がりを持つようなハイライトが表れるざらついた表面の物体に対しても、提案手法が有効であるか検証を行うことが課題である。

文 献

- [1] S. Tominaga, Multichannel vision system for estimating surface and illumination functions. *Journal of the Optical Society of America A*, vol.13, no.11, pp.2163–2173 (1996)
- [2] L. T. Maloney, Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters. *J Journal of the Optical Society of America A*, vol.3, no.10, pp.1673-1683 (1986)
- [3] J. P. S. Parkkine, J. Hallikaine, T. Jaaskelainen, Characteristic spectra of Munsell colors. *Journal of the Optical Society of America A*, vol.6, no.2, pp. 318-322 (1989)
- [4] S. Tominaga, Multichannel vision system for estimating surface and illumination functions. *Journal of the Optical Society of America A*, vol.13 no.11, pp. 2163–2173 (1996)
- [5] S. Tominaga, B. A. Wandell, Standard surface-reflectance model and illuminant estimation. *Journal of the Optical Society of America A*, vol.6 no.4, pp.576-584 (1986)
- [6] L. T. Maloney, Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters. *Journal of the Optical Society of America A*, 10, pp.1673-1683(1986)
- [7] L. T. Maloney, B. A. Wandell, Color constancy: a method for recovering surface spectral reflectance. *Journal of the Optical Society of America A*, vol.3, no.11, pp.29-33 (1986)
- [8] S. Tominaga, H. Haraguchi, Estimation of fluorescent scene illuminant by a spectral camera system, In: *Color Imaging X: Processing, Hardcopy, and Applications*, vol. 5667 of *Proceedings of SPIE*, pp. 128–135, San Jose, Calif, USA (2005)
- [9] S. Tominaga, N. Tanaka, Feature article: omnidirectional scene illuminant estimation using a mirrored ball, *Journal of Imaging Science and Technology*, vol.50, no.3, pp.217–227 (2006)
- [10] S. Schultz, K. Doerschner, L. T. Maloney, Color constancy and hue scaling, *Journal of Vision*, vol.6, no.10, pp.1102–1116 (2006)
- [11] Paul E. Debevec, *Rendering Synthetic Objects into Real Scenes: Bridging Traditional and Image-Based Graphics with Global Illumination and High Dynamic Range Photography*. In *SIGGRAPH 98* (1998)
- [12] S. Tominaga, Estimation of composite daylight-fluorescent light components based on multi-spectral scene images, In: *Proceedings of the 14th IS&T/SID Color Imaging Conference*, pp.125–130, Scottsdale, Ariz, USA (2006)
- [13] J. van deWeijer, T. Gevers, A. Gijsenij, Edge-based color constancy, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 16, no.9, pp. 2207–2214 (2007)
- [14] W. Zhou, C. Kambhamettu, A unified framework for scene illuminant estimation, *Image and Vision Computing*, vol. 26, no. 3, pp. 415–429 (2008)
- [15] G. J. Klinker, S. A. Shafer, T. Kanade, The Measurement of Highlights in Color Images. *International Journal of Computer Vision*, vol.2, no.1, pp.7–26 (1992)
- [16] R. T. Tan, K. Nishino, K. Ikeuchi, Separating Reflection Components Based on Chromaticity and Noise Analysis, *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.26, no.10, pp.1373–1379 (2004)
- [17] S. C. Xu, X. Ye, Y. Wu, S. Zhang, Highlight Detection and Removal Based on Chromaticity. *Image Analysis and Recognition, Lecture Notes in Computer Science*, Volume 3656/2005, pp.199-206 (2005)
- [18] E. Angelopoulou, Specular Highlight Detection Based on the Fresnel Reflection Coefficient. In: *IEEE 11th International Conference on Computer Vision*, pp.1-8 (2007)
- [19] G. Buchsbaum, A spatial processor model for object colour perception, *J. Franklin Institute*, vol.310, no.1, pp.1-26 (1980)
- [20] S. Tominaga, A. Kimachi, Polarization imaging for material classification, *Optical Engineering*, vol.47, no.12, pp.123201 (2008)
- [21] 富永昌治, 大橋慎一郎: 物体のカラー反射モデル, *情報処理学会論文誌*, Vol.33, No.1, pp.37-45 (1992)
- [22] 富永昌治, 西辻順一, カラーヒストグラムからの直線検出に基づいた色ベクトル推定法, *テレビジョン学会誌*, vol.50, no.11, pp.1790-1797 (1996)