

## 水面の光反射特性を利用した昼光の分光分布推定 Daylight Spectrum Estimation by Using Property of Light Reflection on Water Surface

金子 瑛士<sup>†</sup>      青木 啓史<sup>†</sup>      塚田 正人<sup>†</sup>  
Eiji Kaneko      Hirofumi Aoki      Masato Tsukada

### 1. はじめに

照明からの光が物体表面で反射するときの振る舞いは、物体の種類や状態によって波長ごとに異なる。この特性を利用して、多数の波長の光を記録したハイパースペクトル（以下、HS）画像から、シーン中の物体の種類、材質、状態などを把握する技術が期待されている。しかし、HS 画像に記録される観測スペクトルは、照明から入射し物体で反射した光を捉えたものである。つまり、観測スペクトルは、物体の表面反射率と照明の分光分布の積であるため、物体の表面反射率を得るためには、照明の分光分布を推定し、除去しなければならない。

筆者らは、この課題を解析的に解く手法[1]を提案している。しかしこの手法は、推定精度が物体の表面反射率を表すモデルの精度に依存するという問題がある。一方、物体の材質が鏡面反射を有するものに限定できる場合に、この問題を回避できる方法として、二色性反射モデルを用いる方法[2][3]が提案されている。二色性反射モデルでは、物体からの反射光は、拡散反射光と鏡面反射光から構成される。この方法では、鏡面反射成分が照明と一致するとして、照明の色情報を推定する。しかし、この方法を屋外で撮影した HS 画像に適用する場合、二つの課題がある。一つは、屋外の実環境において鏡面反射を有する適切な物体を観測対象として設定することである。もう一つは、三波長からなる RGB 画像での推定を対象とする従来手法を、多波長からなる HS 画像に対応できるように拡張することである。

本稿では、実環境下での観測を想定し、海、湖などの水面における光反射に着目するとともに、二色性反射モデルを用いた照明推定法を波長の次元数に依らない形に一般化することで、HS 画像から昼光の分光分布を推定する方法について述べる。実測画像を用いた実験によって本手法の有効性を示す。

### 2. 二色性反射モデル

二色性反射モデルは、物体表面での光の反射を、鏡面反射と拡散反射の二種類の反射の和として表現するモデルである。鏡面反射は、物体と光を伝達する媒質との境界面で起こる反射であり、光の入射角と反射角が等しくなる方向に強い光を放出する現象である。鏡面反射光は通常、入射光と同じ分光特性を持つ。拡散反射は、物体に入射した光が、物体と光を伝達する媒質との境界付近の物体内部で複雑な反射を経た後に、物体外部に放出される現象である。物体内部の反射の過程で、物体ごとに異なる波長成分の吸収および散乱が発生するため、拡散反射光は入射光とは異なる分光特性を持つ。

式(1)に、二色性反射モデルを表す数式を示す。波長を $\lambda$ 、入射角と反射角を成分とする角度ベクトルを $\theta$ とすると、観測値 $L(\lambda, \theta)$ は、鏡面反射成分 $m_s(\theta)I(\lambda)$ と拡散反射成分

$m_d(\theta)L_d(\lambda)$ の和として表される。なお、 $m_s(\theta)$ は鏡面反射係数、 $m_d(\theta)$ は拡散反射係数、 $I(\lambda)$ は鏡面反射光および入射光の分光特性、 $L_d(\lambda)$ は拡散反射光の分光特性を表す。

$$L(\lambda, \theta) = m_s(\theta)I(\lambda) + m_d(\theta)L_d(\lambda) \quad (1)$$

式(1)のベクトル表記を式(2)に示す。 $L(\theta)$ 、 $I$ 、 $L_d$ はそれぞれ、センサの測定対象となる $N$ 個の波長を $\lambda_1, \dots, \lambda_N$ とすると、式(1)の $L(\lambda, \theta)$ 、 $I(\lambda)$ 、 $L_d(\lambda)$ が各波長 $\lambda_1, \dots, \lambda_N$ において示す値 $L(\lambda_i, \theta)$ 、 $I(\lambda_i)$ 、 $L_d(\lambda_i)$  ( $i = 1, \dots, N$ )を成分とする $N$ 次元のベクトルである。以下の本稿に示される全てのベクトルは、特に説明がない限り、波長 $\lambda_1, \dots, \lambda_N$ における値を成分とする $N$ 次元のベクトルを示す。

$$L(\theta) = m_s(\theta)I + m_d(\theta)L_d \quad (2)$$

### 3. 従来手法

二色性反射モデルを用いた照明色推定手法は、式(2)における $m_s(\theta)$ 、 $m_d(\theta)$ の変化を利用する。物体を観測し得られた画像において、画素毎に $\theta$ の値が変化するとき、 $I$ と $L_d$ が異なる比で混合された多数の観測値が得られる。この観測値の分布から鏡面反射成分による変動方向を抽出することで、 $I$ を推定できる。これが照明推定の原理である。よって、二色性反射モデルを用いて照明を推定するには、観測対象が鏡面反射を有する物体であり、かつその観測画像が多数の異なる $\theta$ のもとで観測された画素を含むことが条件となる。以下、この条件を観測値分布条件と呼ぶ。

この原理を用いて照明色を推定する方法として、物体の観測色の変化を色度図上の直線に近似し、色度図上の照明モデルとの交点を求めることで照明色を推定する方法[4]がある。この方法は、物体表面が複雑な形状を持つなど、 $m_s(\theta)$ 、 $m_d(\theta)$ が独立に変化するような実環境下の自然物体にも適用できる。しかし、この方法は、色度図を用いる性質上、波長の次元数 $N$ が 4 以上となる場合に対応できないという問題がある。

### 4. 提案手法

#### 4.1 観測対象の設定

本稿では、前節で述べた観測値分布条件を満たし、かつ実環境における観測画像に多く含まれる観測対象として、水面に着目する。水面は鏡面反射を含む光反射特性を有す。また、海、湖などの水面はしばしば波打っており、画素毎の $\theta$ も変化する。そのため、二色性反射モデルを用いた昼光の推定に適していると言える。本手法では、水面を観測対象として設定し、昼光推定に利用する。

#### 4.2 幾何問題への帰着

本稿では、前節で述べた二色性反射モデルを用いた照明推定法[4]を、波長の次元数 $N$ に依らない形に一般化する。そのために、式(2)に基づいて観測値から得られる昼光の条

<sup>†</sup> 日本電気株式会社, NEC Corporation

件と、昼光をモデル化することで得られる条件の双方を満たす昼光の値を幾何的に導出することを考える。

式(2)によれば、観測値 $L(\theta)$ は、 $N$ 次元ベクトル空間において 2 つのベクトル $I$ ,  $L_d$ が張る 2 次元平面上に分布する。この平面を観測値平面と呼ぶ。式(2)において $m_d(\theta) = 0$ とすると、観測値は $m_s(\theta)I$ となることから、昼光の分光分布 $I$ も観測値平面上の点として表すことができる。観測モデルの誤差も考慮すると、シーンの昼光は観測値が分布する平面の近傍に存在するという条件が得られる。

一方、昼光の分光分布は一般に有限次元線形モデルとしてモデル化できる[4]ので、その取りうる値は $N$ 次元ベクトル空間内の部分空間（昼光モデル空間と呼ぶ）に限定される。前述の条件を満たす昼光の推定値 $\bar{I}$ は、昼光モデル空間上で、観測値平面との距離が最小となる点として表せる。

すなわち、昼光の推定問題は、観測値平面と昼光モデル空間の距離を最小化する幾何問題に帰着できる。図 1 にその概念図を示す。

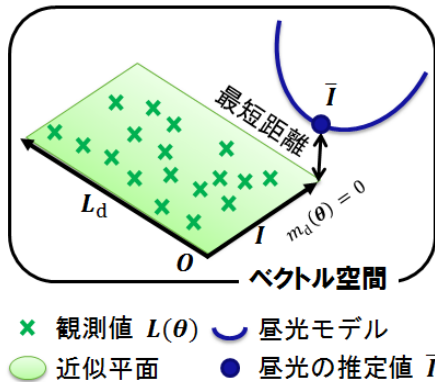


図 1 提案手法の概念図

#### 4.3 幾何問題の解法

3.2 に示した幾何問題を、観測値平面を推定し、昼光モデル空間上で観測値平面との距離が最小となる点を算出することによって解く。以下に具体的な手順を示す。

まず、観測値平面を張る2つの基底ベクトル $e_1$ ,  $e_2$ を求める。これらのベクトルは、観測画像における $i$ 番目の画素の値を $I_i$ とし、観測スペクトルの集合を $X = [I_1 \dots I_M]$ と定義するとき、行列 $XX^T$ の固有ベクトルから、対応する固有値が小さい順に 2 つを選択することで得られる。このとき、観測値平面は基底ベクトルの線形和 $Ea$ として表される。なお $E = [e_1 \ e_2]$ , 重み係数 $a = [a_1 \ a_2]^T$ とする。

昼光モデルとしては、Judd ら[5]による CIE 昼光モデルを用いる。つまり、昼光の分光分布を、相関色温度 $T_c$ を変数とする関数 $I_{CIE}(T_c)$ でモデル化する。このとき、昼光の分光分布の推定値 $\bar{I}$ は、相関色温度 $T_c$ を変数とし、昼光モデル空間と近似平面との距離を目的関数とする最小化問題を解くことで得られる。これを定式化したものを式(3)に示す。

$$\bar{I} = \min_{I_{CIE}(T_c)} \|I_{CIE}(T_c) - E\bar{a}(T_c)\|^2 \quad (3)$$

式(3)の $\bar{a}(T_c)$ は、ある相関色温度 $T_c$ が与えられたとき、昼光モデルとの距離を最短とする基底ベクトルの重み係数を表す。この値は、式(4)に示す正規方程式を用いて、一意に求めることができる。

$$\bar{a}(T_c) = (E^T E)^{-1} E^T I_{CIE}(T_c) \quad (4)$$

#### 5. 実験結果

3 章に示した方法を用いて、実際に水面を撮影した図 2 の HS 画像から、昼光の分光分布を推定した。なお、HS 画像の計測波長は 10nm 毎に計測された 400-730nm の値であり、撮影環境は曇天であった。提案手法による昼光の分光分布の推定結果を図 3 に示す。昼光の実測値としては、同環境下で白色板から得た観測値を白色板の分光反射率で除した値を用いた。

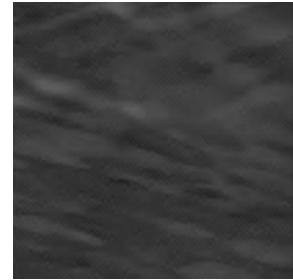


図 2 実験に用いた画像

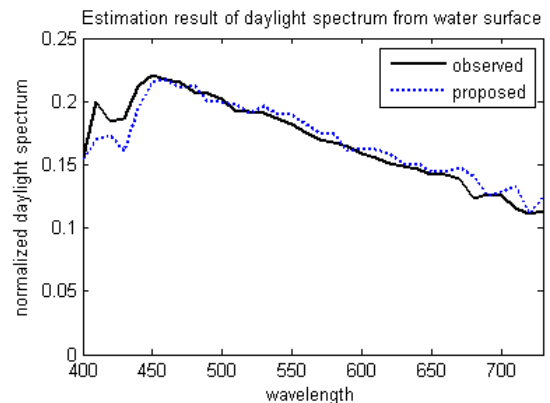


図 3 昼光の推定結果

#### 6. おわりに

本稿では、屋外環境で撮影された HS 画像をもとに昼光の分光分布を推定する方法を提案し、実測画像を用いた実験によってその有効性を示した。今後の課題としては、昼光を直達光や天空光の成分を分けてモデル化すること、多彩な環境で検証を行うことが挙げられる。

#### 参考文献

- [1] Eiji Kaaneko, Masato Tsukada, "Recovery of Spectral Characteristics of Illumination and Objects in Real Environments", IEICE. Gen. Conf. D-11, 15(2012)
- [2] G. J. Klinker, S. A. Shafer, Takeo Kanade, "A Physical Approach to Color Image Understanding", Int. J. Comput. Vis., 4, 7-38 (1990).
- [3] J. Weijer, S. Beigpour, "The Dichromatic Reflection Model: Future Research Direction And Applications", VISAPP(2011)
- [4] G. D. Finlayson, G. Schaefer, "Solving for Colour Constancy using a Constrained Dichromatic Reflection Model", Int. J. Comp. Vis., 42(3), 127-144 (2001).
- [5] D. B. Judd, D. L. Macadam, G. Wyszecki, "Spectral Distribution of Typical Daylight as a Function of Correlated Color Temperature", J. Opt. Soc. Am. A, 54, 8 (1964).