

晴天から曇天までの天候に対応可能な昼光の分光分布モデル

金子瑛士[†] 戸田真人[†] 青木啓史[†] 塚田正人[†]

本稿では、晴天から曇天までの天候に対応可能な昼光の分光分布モデルを提案する。カメラから得られる色情報からシーン中の照明と物体の分光特性を推定する方法として、カラーコンスタンシ計算理論を用いた様々な方法が提案されている。これらの方法では、分光特性のモデル化に有限次元線形モデルを用いている。従来、このモデルに良く使用される CIE 昼光の基底関数は波長帯域が 300nm-830nm と狭く、ハイパースペクトルカメラで得られる広い波長帯域 (300nm-1000nm) に対応できない。Bird モデルは 300nm-4000nm の波長帯域における昼光の分光分布モデルであるが、晴天時のみに有効であるため実用的ではない。本研究では、雲を通過する際の昼光のふるまいを考慮することで、この天候の制約を緩和する。提案モデルでは、昼光が雲を通過する際、分光的には変化せず、強度のみが変化する特性に着目し、昼光の分光分布を、曇り具合を表すパラメータを重み係数に用い、晴天時の昼光の直達成分と拡散成分の線形和として表す。実験によって本モデルの妥当性を示す。

Daylight Spectrum Model under Weather Conditions from Clear Sky to Cloudy

EIJI KANEKO[†] MASATO TODA[†] HIROFUMI AOKI[†] MASATO TSUKADA[†]

This paper proposes a daylight spectrum model under weather conditions from clear sky to cloudy. Various color constancy theories have been proposed to estimate the spectral properties of the illumination and objects in a scene from color information obtained by a camera. A finite dimensional linear model is used to model the spectral properties. When the range of wavelength obtained by a hyperspectral camera is wide, e.g. 300nm-1000nm, the wavelength range of the conventional basis vectors of daylight (300nm-830nm) is insufficient. Bird model is a daylight spectrum model with a wide range of wavelength from 300nm to 4000nm. However, it is not practical since it can be applied only under clear sky. In this study, this restriction in weather is solved by taking the behavior of daylight passing through clouds into consideration. When daylight passes through clouds, spectral property of the daylight does not change and only intensity of the daylight change. Based on the characteristic, a daylight spectrum is simply represented as a linear combination of daylight components simulated in Bird model with only one parameter describing the degree of cloudiness in the proposed model. Experimental results show that the proposed model is promising.

1. はじめに

航空機や衛星などの高所から撮影される地表の画像を用いた物体同定技術は、海難救助、資源探査などの様々な用途での応用が考えられる。従来、物体同定に用いられる物体の形状情報に加え、新たにハイパースペクトル(HS)カメラで計測された分光スペクトルを利用することで、物体同定の精度向上が期待される。

HS カメラは、300nm-1000nm といった広い波長帯域においてシーン中の分光スペクトルを画素毎に記録し、HS 画像として出力する。物体は、波長毎に固有の表面反射率を有するため、HS 画像に記録された分光スペクトルを手掛かりにすることで物体を同定できる。しかし、HS カメラによって観測される分光スペクトルには、物体の表面反射率だけでなく、シーン中における照明の分光分布が含まれる。本稿では屋外における太陽光に由来する照明環境である昼光について議論する。昼光は時刻や天候によって変化するため、観測される分光スペクトルも、昼光の変動の影響を受けて変化する。物体を高精度に同定するためには、観測される分光スペクトルにおける照明変化の影響を取り除く必要がある。

カメラから得られる RGB 値や分光スペクトルなどの色情報から照明および物体の分光特性を分離するアプローチとして、カラーコンスタンシ計算理論が知られている。カラーコンスタンシ計算理論では、有限次元線形モデルを採用し、照明の分光分布と物体の表面反射率を、それぞれ少数の基底関数に重み係数をかけた加重和で表現する。分光スペクトルの観測値と、有限次元線形モデルで表現される照明と物体の分光特性の積との誤差を最小化する重み係数を求めることで、照明の分光分布と物体の表面反射率を分離する。カラーコンスタンシ計算理論に基づく照明の分光分布と物体の表面反射率の復元手法は、誤差最小化問題の解法などに応じて、これまでに様々な手法が提案されている[1][2][3][4][5]。

カラーコンスタンシ計算理論に基づく復元手法の精度の一要因として、照明の分光分布のモデル化精度が挙げられる。精度のよい照明モデルとして Judd によって提案された CIE 昼光[6]はよく用いられる。CIE 昼光では平均、第一主成分、第二主成分の各ベクトルを基底関数とし、未知変数である基底関数の重み係数を変化させることで昼光の変化を表す。しかし、CIE 昼光が適用可能な波長帯域は 300nm-830nm であり、広い波長帯域の分光スペクトルを観測できる HS カメラを用いた場合、その広い波長帯域のスペ

[†] 日本電気株式会社
NEC Corporation

クトル情報を十分に活用できない。

Birdらはより広い波長帯域における昼光の分光分布モデルを提案している[7]。Birdモデルでは、時間と地球座標の情報から300nm-4000nmにおける分光分布を計算することが可能である。しかし、このモデルは晴天時のみに有効であるため実用的でない。

本稿では、曇天から晴天までの天候条件に対応できる新しい太陽光のスペクトルモデルを提案する。本モデルでは、Birdモデルに基づいて、雲を通過する太陽光のふるまいを考慮し、曇り具合を表す1つのパラメータを導入し、太陽光の直達成分と大気による拡散成分を、このパラメータで制御された線形和として表現する。晴天下および曇天下において、HSカメラを用いた実験により、本提案モデルの有効性を示す。

2. 従来の昼光モデル

2.1 CIE 昼光

Juddらによって提案された、実測値に基づく昼光の分光分布モデルは、CIE 昼光として広く知られている。このCIE 昼光では、相関色温度を表す一つのパラメータを用いて昼光の分光分布を表現することができる。CIE 昼光は、ロチェスター（米）、エンフィールド（英、ロンドン郊外）、オタワ（カナダ）において計測された昼光の分光分布から、平均ベクトル $I_0(\lambda)$ と第1、第2主成分ベクトル $I_1(\lambda)$ 、 $I_2(\lambda)$ を求め、それらを基底関数として昼光の分光分布をモデル化する。波長 λ における昼光の分光分布 $I_{\text{CIE}}(\lambda)$ は、 $I_0(\lambda)$ 、 $I_1(\lambda)$ 、 $I_2(\lambda)$ と重み係数 M_1 、 M_2 を用いて、以下の式のように表される。

$$I_{\text{CIE}}(\lambda) = I_0(\lambda) + M_1 I_1(\lambda) + M_2 I_2(\lambda) \quad (1)$$

ここで、 M_1 、 M_2 は未知の変数であり、これらの係数に適切な値を与えることで、任意の昼光の分光分布を表すことができる。Juddらは、昼光の変化を更に限定するため、相関色温度に対応する昼光の色度を計算する方法と、色度を用いて係数 M_1 、 M_2 を計算する方法を提案している。これらの方法を用いることで、 M_1 、 M_2 は相関色温度 T_c の関数として表せる。結果として、昼光の分光分布 I_{CIE} は相関色温度 T_c を用いて以下の式のように表される。

$$I_{\text{CIE}}(T_c, \lambda) = I_0(\lambda) + m_1(T_c) I_1(\lambda) + m_2(T_c) I_2(\lambda) \quad (2)$$

ここで、 m_1 、 m_2 は、係数 M_1 、 M_2 を相関色温度 T_c から算出する関数である。

しかし、CIE 昼光が適用可能な波長帯域は300nm-830nm

であるため、HSカメラで観測される広い波長帯域の分光スペクトルを取り扱う場合には、その情報を十分に活用できないといった課題がある。

2.2 Bird モデル

Birdらは、雲が存在しない環境（晴天）における大気による太陽光の拡散と減衰をモデル化することで、300nm-4000nmの波長帯域の昼光の分光分布モデルを提案している[7]。Birdモデルにおいて、波長 λ における昼光の分光分布 $I_{\text{BM}}(\lambda)$ は、式(3)に示すように、太陽光の直達成分の分光分布 $I_d(\lambda)$ と、拡散成分、すなわち環境光の分光分布 $I_s(\lambda)$ の和として表される。

$$I_{\text{BM}}(\lambda) = I_d(\lambda) + I_s(\lambda) \quad (3)$$

この直達成分 $I_d(\lambda)$ と拡散成分 $I_s(\lambda)$ を計算するためには、太陽天頂角、大気条件が必要となる。太陽天頂角は、容易に取得可能な時間と地球座標の2つのパラメータで決定される。大気条件は、大気の状態を表すパラメータ（可降水量、気圧、混濁度、エアロゾルなど）によって定まるが、一般にこれらのパラメータは容易には得られない。しかし大気条件は、太陽天頂角に比べ昼光の分光分布に及ぼす影響が小さいため、定数とみなすことができる。以上により、Birdモデルでは、太陽天頂角と予め定めた大気条件パラメータを用いることで昼光の分光分布を推定できる。結果として、昼光の分光分布は、太陽天頂角を算出するために必要な時間 t と地球座標 p を用いて以下のように表せる。

$$I_{\text{BM}}(t, p, \lambda) = I_d(t, p, \lambda) + I_s(t, p, \lambda) \quad (4)$$

しかし、Birdモデルは、曇天時における太陽光の拡散と減衰が考慮されていないため、曇天下の昼光の分光分布を推定することはできない。

3. 提案モデル

提案モデルでは、Birdモデルにおける天候の制約を緩和するために、大気だけでなく雲による太陽光の拡散と減衰を考慮する。まず、大気と雲による太陽光の拡散と減衰をモデル化するため、太陽から地表の物体までの経路における光の散乱を考える。一般に光の散乱量は、光経路上の媒質における散乱係数の積として表され、媒質の順序には依存しない。そのため、提案モデルでは、大気による光散乱と雲による光散乱とを個別に計算することが可能である。

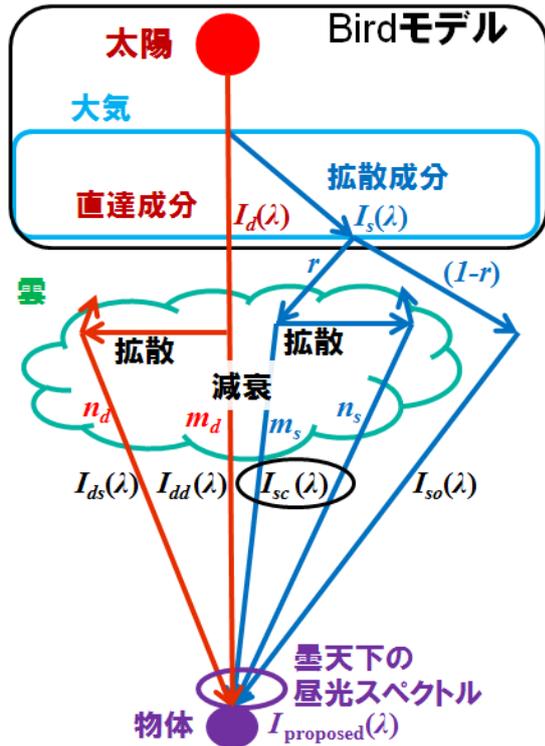


図 1 太陽から地表物体までの昼光の経路

図 1 に、太陽から発した光が大気と雲を通過し地表の物体まで到達する経路の模式図を示す。このうち大気による拡散と減衰は、Bird モデルで算出される直達成分 $I_d(\lambda)$ および拡散成分 $I_s(\lambda)$ を用いて表すことができるため、曇天下の昼光をモデル化するには、雲によるこれらの成分の拡散と減衰を考えればよい。

雲によって拡散、減衰される昼光は以下の 4 つの成分に分解することができ、これらの成分の和として式(5)のように表せる。

- $I_{dd}(\lambda)$: 雲によって減衰された直達成分
- $I_{ds}(\lambda)$: 雲によって拡散された直達成分
- $I_{sc}(\lambda)$: 雲によって減衰、拡散された拡散成分
- $I_{so}(\lambda)$: 雲を通過しなかった拡散成分

$$I_{\text{proposed}}(\lambda) = I_{dd}(\lambda) + I_{ds}(\lambda) + I_{sc}(\lambda) + I_{so}(\lambda) \quad (5)$$

これら 4 つの成分を計算するため、雲による光の散乱を考える。光の散乱には、光の分光的特徴が変化するものと、分光的特徴は変化せず強度のみが変化するものがある。この光の散乱のふるまいは一般に、光の波長と、光の経路上に存在する媒質を構成する粒子の周径との比によって決定される。粒子周径が波長に対して十分に小さいとき、光の散乱はレイリー散乱として表現できる。レイリー散乱で

は、散乱量が波長の値に依存するため、散乱する光の分光的特徴が変化する。一方で、粒子周径が波長に対して同等以上である場合には、光の散乱はミー散乱または幾何光学的散乱のいずれかとして表現できる。これらの散乱においては、光の分光的特徴は変化せず、強度のみが変化する。Bird モデルおよび提案モデルが対象とする光の波長帯域は 300nm-4000nm であり、典型的な雲粒の大きさは約 10 μm である。この場合、粒子の周径に対する波長の比は十分大きいいため、雲による光の散乱において分光的特徴の変化は生じないとみなしてよい。したがって、提案モデルでは、光の強度の変化のみを考える。

曇天下の昼光を構成する 4 つの成分 $I_{dd}(\lambda)$, $I_{ds}(\lambda)$, $I_{sc}(\lambda)$, $I_{so}(\lambda)$ は、光の強度変化を表すパラメタを用いて以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} I_{dd}(\lambda) &= m_d \cdot I_d(\lambda), \\ I_{ds}(\lambda) &= n_d \cdot I_d(\lambda), \\ I_{sc}(\lambda) &= r(n_s + m_s) \cdot I_s(\lambda), \\ I_{so}(\lambda) &= (1-r) \cdot I_s(\lambda) \end{aligned} \quad (6)$$

なお、 m_d, m_s, n_d, n_s, r は以下に示す値である。

- m_d : 雲通過時の直達成分の減衰量を表す係数
- m_s : 雲通過時の拡散成分の減衰量を表す係数
- n_d : 雲で拡散され環境光として物体に照射する直達成分の量を表す係数
- n_s : 雲で拡散され環境光として物体に照射する拡散成分の量を表す係数
- r : 雲を通過する拡散成分が全拡散成分に占める割合

これらのパラメタは直達成分 $I_d(\lambda)$ と拡散成分 $I_s(\lambda)$ の混比を表す一つのパラメタ α に統合することができる。結果として、曇天下の昼光の分光分布は、直達成分と拡散成分の線型和として下記のように表せる。

$$\begin{aligned} I_{\text{proposed}}(\lambda) &= I_{dd}(\lambda) + I_{ds}(\lambda) + I_{sc}(\lambda) + I_{so}(\lambda) \\ &= \{n_d(1-m_d) + m_d\} \cdot I_d(\lambda) \\ &\quad + [(1-r) + r\{n_s(1-m_s) + m_s\}] \cdot I_s(\lambda) \\ &\propto \alpha \cdot I_d(\lambda) + (1-\alpha) \cdot I_s(\lambda). \end{aligned} \quad (7)$$

このとき、重み係数 α は曇り具合を表すパラメタとなる。本モデルでは、 α が 0.5 のとき、晴天条件を表す Bird モデルと同一となり、 α が 0.0 のとき、太陽が不透明の物体に隠される日陰条件に相当する。また、 α がこの間の値のとき、提案モデルは曇天を表す。

2.2 節に記したように、ある波長における直達成分と拡散成分は、大気条件のパラメタを予め定めておけば、時間と地球座標の関数として表せる。したがって、昼光の分光分布は、既定の大気条件パラメタの下で、重み係数 α 、時間 t 、地球座標 p を用いて下記のように表せる。

$$I_{\text{proposed}}(\alpha, t, p, \lambda) \propto \alpha \cdot I_d(t, p, \lambda) + (1 - \alpha) \cdot I_s(t, p, \lambda). \quad (8)$$

4. 実験

実際に計測された HS 画像を用いて、提案モデルの妥当性を検証する実験を行った。HS カメラは Lextel 社製 VNIR100E を使用した。本 HS カメラの測定波長帯域は 400nm-1000nm である。2月の夕方に晴天および曇天、日陰（晴天時）の3つの条件下で白色板の分光スペクトルを計測した。以下これらの実験環境をテスト環境と呼ぶ。またこれに加え、標準環境として、晴天時の正午において白色板の分光スペクトルを計測した。表1に、テスト環境および標準環境における時間と地球座標のパラメタ $t_{\text{test}}, p_{\text{test}}, t_{\text{std}}, p_{\text{std}}$ を、表2に本実験で既定値として用いる大気条件のパラメタをそれぞれ示す。図2は実験が行われた環境を示した画像である。

評価は、図3に示すように、テスト環境で計測された各天候条件の分光スペクトル $L_{\text{cloudless}}(\lambda), L_{\text{cloudy}}(\lambda), L_{\text{shady}}(\lambda)$ を、提案モデルおよび Bird モデルを用いて標準環境の分光スペクトル $\bar{L}_{\text{std}}(\lambda)$ に補正した際の補正誤差を用いて行う。また、補正を適用しない場合の分光スペクトルの差異も参考として評価する。

提案モデルおよび Bird モデルを用いた分光スペクトルの補正の一例として、曇天下で観測された分光スペクトルを補正する場合の補正式をそれぞれ式(9)、式(10)に示す。

$$\bar{L}_{\text{std}}(\lambda) \propto \frac{I_{\text{proposed}}(\alpha_{\text{std}} = 0.5, t_{\text{std}}, p_{\text{std}}, \lambda)}{I_{\text{proposed}}(\alpha, t_{\text{test}}, p_{\text{test}}, \lambda)} \cdot L_{\text{cloudy}}(\lambda), \quad (9)$$

$$\bar{L}_{\text{std}}(\lambda) \propto \frac{I_{\text{BM}}(t_{\text{std}}, p_{\text{std}}, \lambda)}{I_{\text{BM}}(t_{\text{test}}, p_{\text{test}}, \lambda)} \cdot L_{\text{cloudy}}(\lambda). \quad (10)$$

晴天下と日陰条件下で観測された分光スペクトルを補正する場合も同様に行う。ここで、標準環境における重み係数 α_{std} は、標準環境が晴天であることに基づき 0.5 としている。また、テスト環境における重み係数 α については、それぞれの条件において、補正誤差を最小とする値を求め、それらを補正に利用する。

補正誤差を評価する指標としては、二つのベクトル間の角度を表す Spectral Angle Mapper (SAM) [8] を用いる。

表 1 観測条件の地球座標および時間、太陽天頂角

| | | テスト環境(夕方) | | | 標準環境 (正午) |
|------------------------|-----|-----------|-----------|----------|--------------|
| | | 晴天 | 曇天 | 日陰 | |
| 地球座標 p (ISO 6709) | 緯度 | +35.57° | | | |
| | 経度 | +139.67° | | | |
| 時間 t (JST) | 年月日 | 2011/2/3 | 2011/2/24 | 2011/2/3 | 2011/2/3 |
| | 時刻 | 16:23 | 16:46 | 16:23 | 12:01 |
| 太陽天頂角 | | 81.92° | 81.84° | 81.92° | 52.22° |

表 2 既定値として用いた大気条件のパラメタ

| | |
|-----------------|------|
| 可能降水量(cm) | 1.36 |
| 気圧(mbar) | 1000 |
| 気温(°C) | 10 |
| オングストロームの混濁係数 | 1.14 |
| エアロゾル非対称因子 | 0.65 |
| 波長500nmにおける消散係数 | 0.2 |

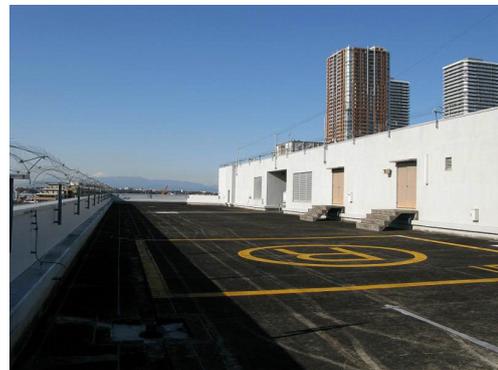


図 2 実験を実施した環境

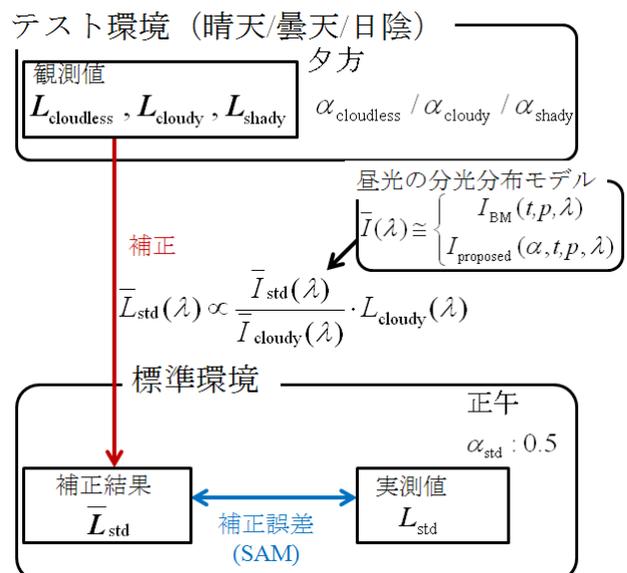


図 3 提案モデルおよび Bird モデルの評価方法

SAM は分光スペクトルを利用した物体同定の精度評価に用いられる一指標であり、分光スペクトルの形状的な違い

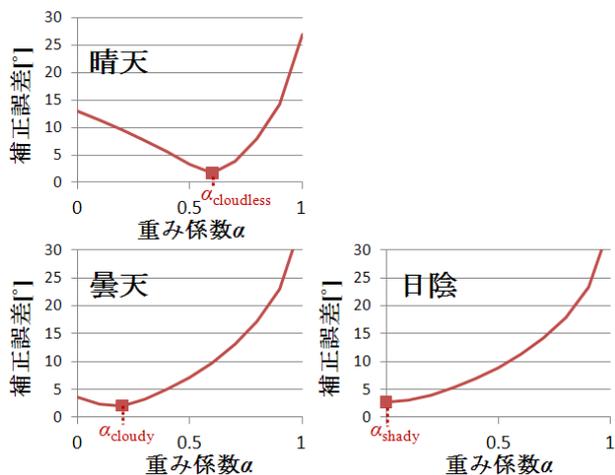


図 4 各条件における重み係数 α と補正誤差の関係

を評価することができる。いま、補正された分光スペクトルを $\bar{L}(\lambda)$ 、実測の分光スペクトルを $L(\lambda)$ とするとき、 $\bar{L}(\lambda)$ と $L(\lambda)$ の $SAM(\bar{L}, L)$ は以下の式で定式化される。

$$SAM(\bar{L}, L) = \cos^{-1} \frac{\sum_{\lambda} L(\lambda)\bar{L}(\lambda)}{(\sum_{\lambda} L(\lambda)^2)^{1/2} (\sum_{\lambda} \bar{L}(\lambda)^2)^{1/2}} \quad (11)$$

図 4 に、提案モデルにおける曇り具合を表す重み係数 α と補正誤差の関係を示す。それぞれの補正誤差は比較的滑らかな下に凸の曲線となり、晴天、曇天、日陰の各条件下において補正誤差を最小化する重み係数の値 $\alpha_{cloudless}$ 、 α_{cloudy} 、 α_{shady} は、それぞれ 0.60、0.17、0.00 であった。なお、晴天下の補正誤差を最小化する重み係数 $\alpha_{cloudless}$ は、Bird モデルと同等となる係数 0.5 よりも大きな値となっている。これは、実験環境が建物に囲まれていたために、建物が散乱光を遮蔽し、直達成分の割合が増加したのが原因であると考えられる。

補正誤差の評価結果を表 3 に示す。提案モデルの補正誤差は、図 4 から求められた重み係数 $\alpha_{cloudless}$ 、 α_{cloudy} 、 α_{shady} を用いた場合の値である。Bird モデルでは、対応可能な天候条件である晴天下では補正により誤差が低減しており、昼光の分光分布が精度よく推定されていることが確認できるが、曇天下では誤差の低減量は晴天条件に比べ少なく、日陰の場合には誤差がかえって増加した。一方、提案モデルでは、全ての条件下で補正により誤差が低減しており、全ての条件下で昼光の分光分布が精度よく推定されていることが確認できる。また、晴天下の誤差が、Bird モデルよりも小さいことが確認された。これらの結果から、提案モデルは全ての条件下で、Bird モデルに比べて昼光の分光分布を精度よくモデル化できることが確認された。

表 3 提案モデルおよび Bird モデルの補正誤差

| | 提案モデル | Birdモデル | 未補正 |
|----|-------------------------|---------|-------|
| 晴天 | 1.69° ($\alpha=0.60$) | 3.32° | 5.46° |
| 曇天 | 2.02° ($\alpha=0.17$) | 7.20° | 7.33° |
| 日陰 | 2.77° ($\alpha=0.00$) | 8.94° | 8.45° |

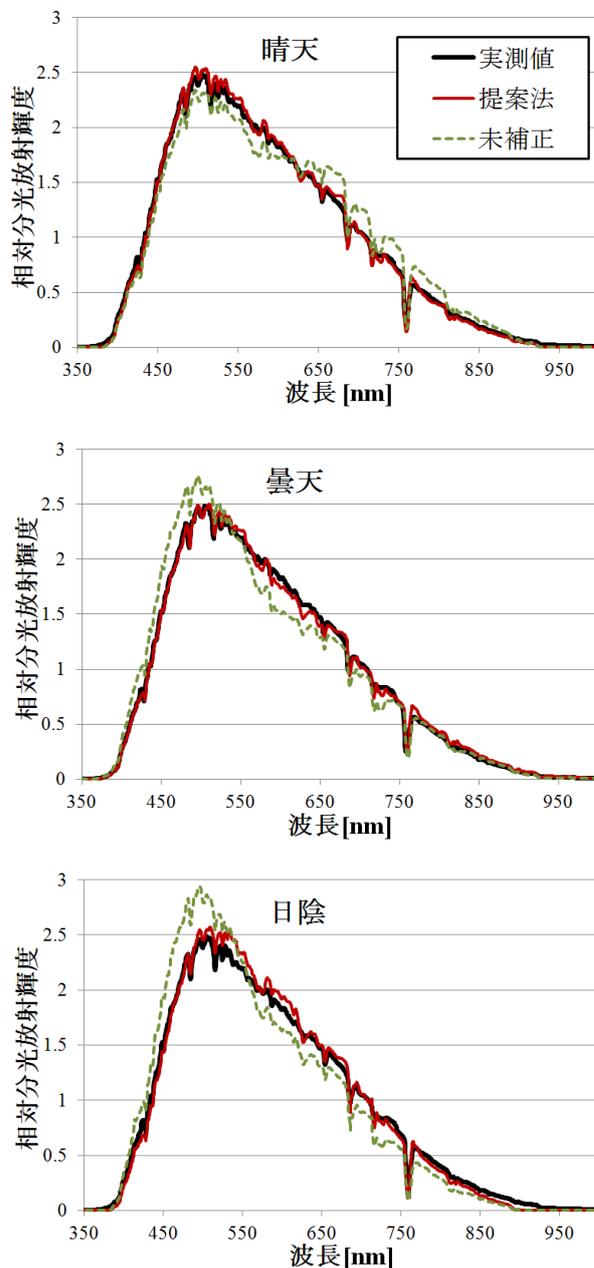


図 5 提案モデルによる分光スペクトルの補正結果

晴天、曇天、日陰の各条件において、提案モデルに補正誤差を最小化する重み係数 α を与えて補正を行った観測した分光スペクトル（昼光の分光分布と白色板の表面反射率をから構成されるスペクトル）を図 5 に示す。図 5 では、分光スペクトルの分光的特徴を表すため、補正および測定結果の分光スペクトルを相対分光放射輝度で表す。ここで、

表 4 CIE 昼光の評価条件および結果

| | | 晴天 | 曇天 |
|------------------------|-----|----------|------------|
| 地球座標 p (ISO 6709) | 緯度 | +35.57° | |
| | 経度 | +139.67° | |
| 時間 t (JST) | 年月日 | 2011/7/4 | 2011/10/18 |
| | 時刻 | 11:34 | 10:34 |
| 相関色温度 | | 5915 K | 6232 K |
| 推定誤差(SAM) | | 2.37° | 1.82° |

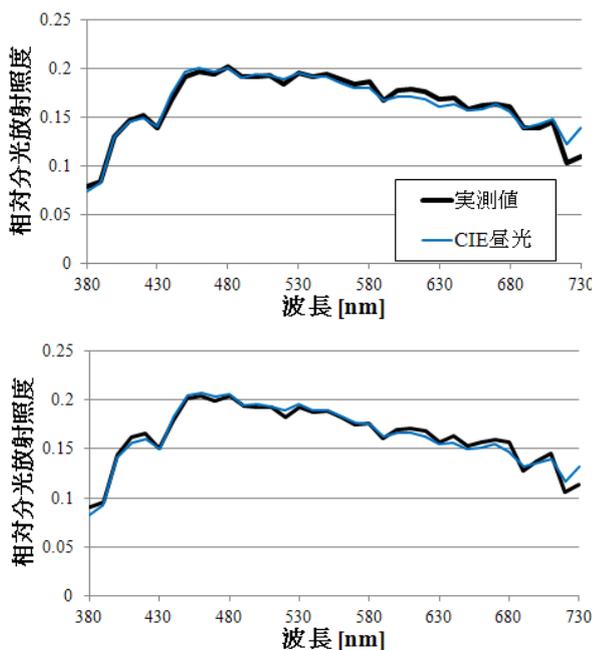


図 6 CIE 昼光による昼光推定結果

相対分光放射輝度は、分光スペクトルの各波長におけるパワーを、その分光スペクトルの波長帯域における平均値で割った値である。提案モデルを用いることで、夕方に様々な天候条件の下で観測された白色板の分光スペクトルが、晴天下の正午に観測される同じ白色板の分光スペクトルに適切に補正されていることがわかる。

CIE 昼光の精度についても評価した。ここでは、計測値から算出された昼光の分光分布と Bird モデルにより推定された昼光の分光分布との誤差を求めることにより評価した。昼光の分光分布は、白色板からの反射光の分光スペクトルと、白色板の表面反射率を計測し、分光スペクトルを表面反射率で割ることで算出した。分光スペクトルは、分光放射輝度計 Minolta CS-1000 を用いて計測し、白色板の表面反射率は Gretag Macbeth 社 Spectrolino を用いて計測した。また、CIE 昼光による分光スペクトルの推定は、実測値とモデルの誤差を最小とする相関色温度を用いて行った。誤差の評価指標には SAM を用いた。観測条件と評価結果を表 4 に、推定結果を図 6 に示す。図 6 では、昼光の分光分布の分光的な特徴を表すため、昼光の分光分布を相対分光放射輝度で表す。相対分光放射輝度は、分光放射輝度の各

波長におけるパワーを、その分光放射照度の波長帯域における平均値で割った値である。表 4 と表 3 を比較すると、CIE 昼光による誤差は、提案モデルによる誤差と同等である。しかし、前述のように、提案モデルは CIE 昼光よりも広い波長帯域で適用可能である。以上により、提案モデルは CIE 昼光より優位であると言える。

5. おわりに

本稿では、晴天から曇天までの天候に対応可能な昼光の分光分布モデルを示した。本モデルでは、昼光の分光分布は、曇り具合を表すパラメータを用いた直達成分と拡散成分の線型和として表す。実験結果から、提案モデルは、400nm-3000nm といった広い波長帯域に対応しつつ、曇天から晴天までの天候下における昼光の分光分布を高精度に表現できることが確認された。提案モデルをカラーコンスタンス計算理論における照明モデルとして利用することで、400nm-1000nm といった広い波長帯域の分光スペクトルを記録した HS 画像から、照明の分光分布と物体の表面反射率を精度よく復元できると考える。実際の HS 画像を利用した物体同定の精度評価については、今後の課題である。

参考文献

- 1) Maloney, L. T. and Wandell, B. A.: Color Constancy: a method for recovering surface spectral reflectance, Journal of the Optical Society of America, Vol.A3, No.1, pp.29-33, (1986).
- 2) Ho, J., Funt, Brian V. and Drew, M. S.: Separating a color signal into illumination and surface reflectance components: Theory and applications, IEEE Trans-actions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.12, No.10, pp.966-977, (1990).
- 3) Ohta, Y. and Hayashi, Y.: Recovery of illumination and surface colors from images based on the CIE daylight, Third European Conference on Computer Vision, Vol.2, pp.234, (1994).
- 4) Chang, P. R. and Hsieh, T. H.: Constrained nonlinear optimization approaches to color-signal separation, Transactions on Image Processing, Vol.4, No.1, pp.105-110, (1995).
- 5) 小林由枝, 川上玲, 池内克史: 複数の入力スペクトルを用いた対数空間における光源と反射率推定のロバスト化の検証, 画像の認識・理解シンポジウム, (2010).
- 6) Judd, D. B., Macadam, D. and Wyszecki, G.: Spectral distribution of typical daylight as a function of correlated color temperature, Journal of the Optical Society of America, Vol.54, No.8, pp.1031-1040, (1964).
- 7) Bird, R. E. and Riordan, C.: Simple Solar Spectral Model for Direct and Diffuse Irradiance on Horizontal and Tilted Planes at the Earth's Surface for Cloudless Atmospheres, J. Climate Appl. Meteor, Vol.25, No.1, pp.87-97, (1986).
- 8) Shafri, H.Z.M., Suhaili, A. and Mansor, S.: The Performance of Maximum Likelihood, Spectral Angle Mapper, Neural Network and Decision Tree Classifiers in Hyperspectral Image Analysis, Journal of Computer Science, Vol.3, No.6, pp.419-423, (2007).