

自然シーンにおける光源分布の 全方位分光計測と解析

渡邊大輝[†] 平井経太^{††} 堀内隆彦^{††} 富永昌治^{††}

本稿では、全方位光源を計測するためのマルチバンドイメージングシステムを構築し、実シーンの解析を行う。構築するシステムは、魚眼レンズ、RGB デジタル一眼レフカメラ及び 2 種類のカラーフィルタから構成され、6 チャンネルのマルチバンド画像を獲得できる。著者らは、先行研究では扱われてこなかった、様々な実際の屋外シーンにおける可視域の全方位光源分布の季節変動や 1 日の時系列変動に注目し、構築したシステムを用いてその計測及び解析を行った。計測によって得られたマルチバンド画像から Wiener 法により、高精度な 61 次元分光画像（全方位光源分光分布）を推定した。推定した分光画像を対象とした主成分分析を行い、シーンの光源を解析した。その結果、屋外シーンの全方位光源分布の主成分は、季節変動・時系列変動を問わず類似することがわかった。また、全分光分布の主成分の平均値を用いることによって、全分光画像の圧縮・復元を高精度に行えることを確認した。

Measurement and Analysis of Omni-directional Spectral Distributions of Light-Sources in a Natural Scene

Daiki WATANABE[†], Keita HIRAI^{††},
Takahiko HORIUCHI^{††}, and Shoji TOMINAGA^{††}

This report shows a multi-band imaging system for capturing omni-directional spectral distributions in the visible range and analyzes the omni-directional illuminant spectra in real outdoor scenes. First, a multi-band imaging system with six spectral channels is constructed by combining a fisheye lens, an RGB digital SLR camera, and additional two color filters. The omni-directional illuminants are estimated from the captured omni-directional multi-band images. Second, we analyze the 61-dimensional spectral features of a scene from the spectral distribution of omni-directional light sources. We show that the omni-directional illuminant distributions in different seasons and different time in a day can be described in a linear combination of three principal components. As the result, the characteristics of omni-directional illuminant spectra were similar, regardless of seasonal modulation and temporal change in a day. In addition, all spectral images can be compressed and decompressed by using the average basis of all spectral distributions.

1. はじめに

色彩科学、コンピュータビジョンおよびコンピュータグラフィックスなどの分野では、光源の持つ情報が重要とされる。自然環境下では光源は空間的に連続して全方位に存在しており、単一光源である環境は稀である。そのため、様々な自然環境下の光源を全方位で計測し、それらの分光分布を推定する研究に近年興味が集まっている。全方位の光源情報を計測するシステムとして、鏡面球を用いた手法および魚眼レンズを用いた手法が開発されてきた[1]-[4]。分光分布計測の観点から、鏡面球を用いた手法[2]はマルチバンド化が比較的容易であるが、シーンを間接的に獲得するため、雑音に影響されやすい。一方魚眼レンズを用いた手法[4]は、分光分布の推定精度はやや低いが、解像度が高く、計測系が比較的簡便である。

本稿では、高解像度で雑音に影響されにくい魚眼レンズと、RGB デジタル一眼レフカメラを組み合わせた全方位分光計測系を用いて連続的に存在する光源の分光分布を獲得し、実際の屋外シーンで可視域[400-700nm]の全方位光源分光分布を解析する。マルチバンドイメージング系として、2 種類のカラーフィルタと RGB カメラを組み合わせることにより、6 チャンネルのマルチバンド画像を獲得する。これにより可視域における高次元の全方位光源分光分布を高精度で推定する。次に、得られた光源分光分布からシーンの特徴を解析する。これまでシーンの分光解析の研究は、昼光の分光分布の解析などの基本研究にとどまっていた[5]。実際の自然シーンで観測される光源分光分布は、昼光や太陽光などの直接的な光源のみならず、物体からの反射による間接的な光源もある。このように全方位には多様な光源分布が存在し、そのスペクトル解析の研究はこれまで行われていない。本研究では、自然シーンを対象として、全方位から獲得される分光分布を主成分分析によって解析する。

一般に自然環境下では、光源分布は時々刻々と変化している。本研究ではこの変化を考慮している。この方面の研究の第一段として、著者らは観測時間を固定して、全方位光源分布の季節変動について調べた[6]。全方位光源分布の季節変動について、色信号の成分を調べたところ、大きな変化は生じていないことがわかった。そこで本論文では、単一時刻において獲得された全方位画像の分光分布を解析することに限定せず、全方位光源分光分布の季節変動、及び 1 日の時系列変動などの時間変動に注目して解析を行う。光源分光分布の特徴である主成分を解析し、時間変動による自然シーンの分光分布の変化の特徴を考察する。

^{†††} 千葉大学大学院融合科学研究科 〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33
Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba University, 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522,
Japan
E-mail: [†]d-watanabe@chiba-u.jp ^{††}{hirai, horiuchi, shoji}@fuculty.chiba-u.jp

2. 全方位計測系

2.1 計測原理

魚眼レンズとは通常の光学レンズとは異なり、球面状に約 180 度の視野をもつレンズである。マルチバンドイメージング系に用いる魚眼レンズは全周魚眼レンズ (SIGMA 社製 8mmF3.5 EX CIRCULAR FISHEYE) であり、射影方式に等立体角射影方式を採用している。 f を焦点距離、 θ をレンズ中心からの画角とすると、像高 y は次式で表すことができる (図 1 参照)。

$$y = 2f \sin(\theta/2) \quad (1)$$

等立体角射影方式は、各画角における射影情報量が均質化されることにより、画像の歪みを最小限に抑える方式である。またこの射影方式は、被写体の立体角と画面上の面積が比例関係となるため、撮影された画面上の面積を測定することにより、視界に対する被写体の割合を求めることができる。

魚眼レンズの視野角は前述の通り約 180 度あるため、原理としてはレンズ正面と後方の 2 回の撮影により全方位を獲得できるが、魚眼レンズを使用して得られる画像の円周部分は、中心部に比べ解像度が低い。そのため、120 度ずつ 3 方向を撮影し、それらを繋ぎ合わせることで全方位の画像とする。また全周魚眼レンズにより得られる画像は、中心から円周へ向かうほど輝度値が減少していく特性を持つため、その補正処理を行う。

2.2 計測システム

本研究で用いるカメラシステムは、一般的な RGB デジタルカメラ、魚眼レンズ、カラーフィルタ及び回転雲台の組み合わせにより構成される (図 2)。デジタルカメラは、解像度 4992×3328、12bit のダイナミックレンジを有する Canon 社製 EOS1DsMark II を用いる。回転雲台は Manfrotto 社製 303SPH を用いる。この雲台は水平方向に回転させる際、垂直方向にズレを生じさせずに回転させることが可能である。

良好な分光分布推定精度を獲得するために、カラーフィルタを用いてカメラシステムのマルチバンド化を行う。カラーフィルタは、FUJIFILM 社製 SP-6 と SP-7 の 2 種類を用いる。魚眼レンズの構造上、前面からフィルタをあてがうことができないため、レンズのマウント部分にフィルタを装着し、撮影の度にフィルタを交換することとする。図 3(a)にカメラ感度、図 3(b)に 2 種類のカラーフィルタの分光透過率、図 3(c)にカラーフィルタを用いてマルチバンド化したカメラの総合分光感度を示す。2 種類のカラーフィルタを用いて得られる 6 種類の色チャンネルの分光感度が、長波長側から順に並ぶように、新たにマルチバンド画像として合成する。

3. 全方位画像の作成

3.1 HDR 計測

自然環境下のシーンには太陽光や昼光が存在し、これらの光源は光強度が非常に高い。このような光源分光分布獲得の際、カメラのダイナミックレンジではレンジ幅を超え、撮像素子が飽和するため、極めて広いダイナミックレンジが必要である。

本研究では、低輝度画素及び高輝度画素共に良好な精度を得るために、擬似的にビット数の高いハイダイナミックレンジ画像を獲得する。同一のシーンにおいて、カメラのシャッタースピードを 2 秒から 1/8000 まで 1/2 ずつ 15 段階に変化させて計測を行い、それらの画素の飽和した画素を置換して、輝度レベルを拡張した画像を作成する。

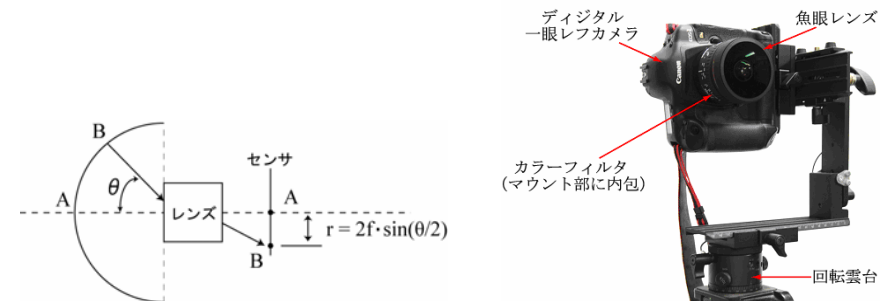
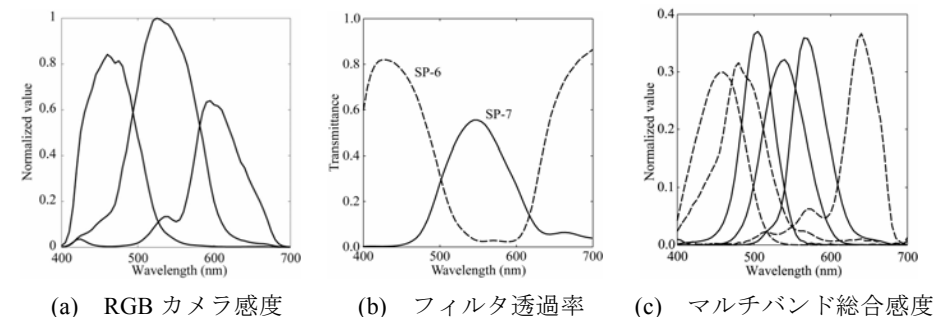


図 1 等立体角射影方式模式図



図 2 カメラシステム



(a) RGB カメラ感度 (b) フィルタ透過率 (c) マルチバンド総合感度
 図 3 カメラシステムの分光特性

3.2 全方位画像の生成

本研究では、光源は全て無限遠を仮定しているため、光源は全て平行ビームと仮定する。魚眼レンズを用いた場合、光源からの平行ビームは直接カメラシステムに入射する。光源の空間分布を2次元的に表示するために、3次元ワールド空間座標系 (x, y, z) を極座標系 (θ, ϕ) への変換が必要である。このとき θ と ϕ は次式で表すことができる。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right), \quad \phi = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right). \quad (2)$$

極座標系 (θ, ϕ) に変換した3方向分の計測画像を、基準となる座標系に一致するように結合する。ここで、計測画像は180度の方位を持つため、それぞれの重複部分を除去した後、結合することで全方位画像を生成する。このとき、光源方向ベクトルの集合は中心から全方位を指すため、カメラを中心に置き、これを視点とした全方位画像を求めることとなる。

4. 画像解析

4.1 カメラ出力

自然環境下におけるあらゆる場面において、光源から照射された直接光と、その光が物体に反射した反射光がカメラに入射する。光源から照射された光と反射光からなる入射光分光分布を $Y(\lambda)$ 、カメラの総合分光感度を $R_k(\lambda)$ とすると、カメラ出力 ρ_k は入射光分光分布とカメラの総合分光感度の積を、人間の可視域[400-700nm]で積分した次式で表すことができる。

$$\rho_k = \int_{400}^{700} Y(\lambda) R_k(\lambda) d\lambda \quad k = 1, 2, \dots, 6. \quad (3)$$

ここで、 k はセンサ番号を表している。本稿では、分光関数を可視域で5nmおきに標準化した61次元のベクトルで表すこととする。このときカメラ出力を6×1行列 ρ 、カメラの総合分光感度を61×6行列 \mathbf{R} 、入射光分光分布を61×1行列 \mathbf{y} でそれぞれ表すと、式(3)は次式の行列表記で表すことができる。

$$\rho = \mathbf{R}^T \mathbf{y} \quad (4)$$

4.2 分光分布の推定

低次元情報であるカメラ出力から高次元情報である分光分布を推定する際には、カメラ出力に含まれる雑音を考慮する必要がある。このため、本研究では入射光分光分布の推定にWiener法を採用する。61×61の単位行列を \mathbf{I} 、光源を含む反射光分光分布

の61×61の相関行列を \mathbf{C}_{SS} 、ノイズ分散を σ^2 とすると、入射光分光分布の推定値 $\hat{\mathbf{y}}$ は次式で表すことができる。

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}_{SS} \mathbf{R}^T \left(\mathbf{R} \mathbf{C}_{SS} \mathbf{R}^T + \sigma^2 \mathbf{I} \right)^{-1} \rho \quad (5)$$

本研究では、相関行列 \mathbf{C}_{SS} は、自然環境下での代表的な光源分光分布と分光反射率のデータベースを使用して作成した。分光反射率には、507個の物体に対する反射率データを使用した。光源データには、CIEが定めた標準光源と、著者らが計測した分光分布を含む9種類の光源データベースを使用した。これらの分光反射率と光源を掛け合わせた4563個の分光分布と、光源データベース自身を加えた4572個の分光分布から作成した。

4.3 主成分分析

本研究では、推定された光源分光分布に対して特異値分解を行い、その主成分を用いてシーンの特徴を解析する。また、主成分を利用することによって、マルチバンド撮影による分光情報の圧縮・復元も可能になる。

一般に、物体の分光反射率や光源の分光分布などの分光情報は、少数の基底ベクトルの線形結合で表現できることが知られている。このとき、式(5)で推定された入射光分光分布 $\hat{\mathbf{y}}$ は、61次元の基底ベクトル ϕ_i の線形結合によって、次式で記述できる。

$$\hat{\mathbf{y}} = \sum_{i=1}^n w_i \phi_i \quad (6)$$

少数の基底ベクトル数で高い近似精度を得るためには、各画素固有の基底ベクトルをここで w_i は基底関数の重み係数である。まず求める。獲得した画像の全画素数を m とし、全 m 画素における61次元入射光分光分布を $m \times 61$ の行列 \mathbf{M} として、この行列 \mathbf{M} に対して特異値分解で得られた主成分を基底ベクトル ϕ_i とする。

主成分ベクトルは、シーン全体の分光分布の特徴を反映していることから、主成分ベクトルの形状の違いにより、分光分布を解析することが可能となる。シーン内の分光情報を記述するのに必要な主成分の数は、累積寄与率と分光分布の推定誤差に基づいて決定する。

5. 実験

実験は、時間変動による光源分光分布の変化を解析することにより、シーンの特徴を考察することを目的とする。実験では、千葉大学構内「かたらいの森」をシーンとした。シーンは、構築したマルチバンドカメラシステムを用いて、6チャンネルのマルチバンド画像として獲得した。

5.1 季節変動に注目した計測及び解析

計測は、2010年4月8日、同8月8日、同10月16日及び12月10日の計4回行い、いずれも日の出より30分程度後に、1時間程度の時間を要した。全日とも天候は晴れであった。8月8日に獲得した全方位画像を図4に示す。図4に示される番号の付いた水色の枠は、分光分布の推定を行った領域(area)である。提案法による推定結果と分光放射輝度計PR-650による計測値を正解値とした比較を、area1, 2及び3について図5に示す。また定量評価として、area1-5について、計測値と推定値の平方平均二乗誤差(RMSE)を算出したものを推定誤差として、表1に示す。area3が最も大きい誤差を持つ結果になったが、計測値では700nm直前で大きな変動があり、これが推定できていないことが原因である。しかし色再現の観点からすれば、550nm付近のピークを正確に推定できており、誤差が可視域の端で発生しているため、問題にはならないと考えられる。その他のareaは、概ね良好な推定結果を示していると言える。

各季節における3つの主成分ベクトルを図6に示す。それぞれ第3主成分までの累積寄与率が99%を超えたため、分光分布の近似表現は第3主成分までを基底として行った。その結果、平方平均二乗誤差は平均で 10^{-3} 程度であり、推定誤差よりも十分小さい値であることから、近似表現の有効性が示された。

主成分について考察する。第1-第3主成分の寄与率はそれぞれ、季節平均で94.1%、4.1%、1.2%となり、第1主成分の寄与が非常に大きい結果となった。各季節の主成分波形を比較すると、第1主成分にはほぼ変化が見られないことがわかる。第2主成分については、12月以外の波形は類似しており、12月の第3主成分波形が、他の第2主成分波形に類似していることから、寄与率による入れ替わりが起きていることがわかる。この理由として、図6に示されるように、12月は木の葉がほぼ残っていないことが挙げられる。しかしながら、第2, 第3主成分の寄与率自体が小さいこと、またその差が小さいことから、各季節の主成分波形は概ね類似していると言える。以上より、本シーンにおける主成分曲線は、季節変動にあまり依存しないことがわかった。

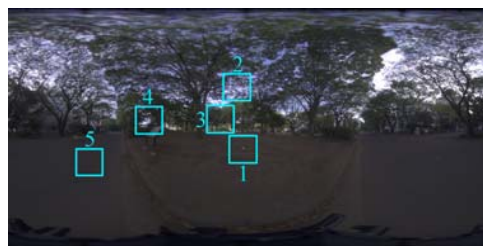


図4 8月8日獲得画像

表1 推定誤差(RMSE)

area	RMSE
1	1.22E-02
2	2.13E-02
3	2.72E-02
4	2.28E-02
5	1.86E-02

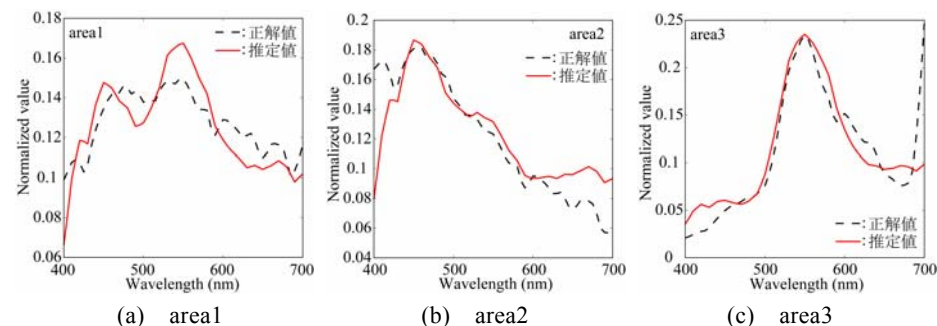


図5 area1,2,3に対する分光分布推定結果

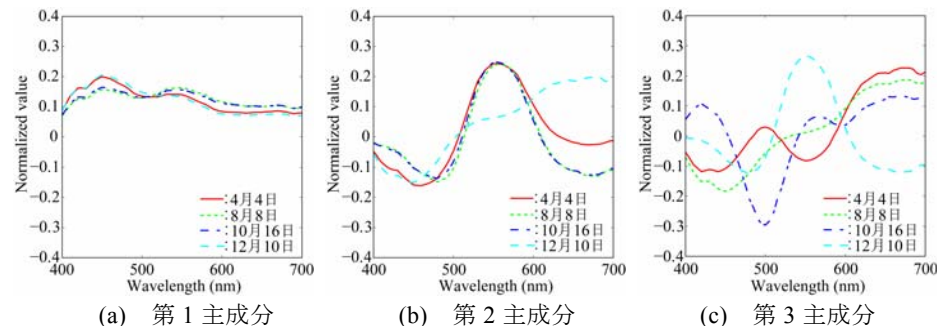


図6 各季節の主成分波形の比較

5.2 時系列変動に注目した計測及び解析

計測は2010年9月11日午前7時、同午前11時、同午後2時及び同午後5時の計4回、30分程度の時間をかけて計測を行った。天候は晴れであった。午前11時に獲得した全方位画像を図7に示す。5.1節と同様に、分光分布の推定を行った結果を図9に示す。また定量評価として、計測値と推定値の平方平均二乗誤差(RMSE)を算出したものを推定誤差として、表2に示す。図8および表2より、5.1節の分光分布推定結果とほぼ同様の結果が得られていることがわかる。このことから、概ね良好な推定結果を示していると言える。

本実験では、午前11時に太陽が直接写りこむ。太陽部分は、3.1節に示したHDR計測を行っても、その輝度はレンジ幅を大きく超え得る。そのため、太陽部分の画素値を0にし、主成分解析対象から除外した。各時刻における3つの主成分ベクトルを図9に示す。それぞれ第3主成分までの累積寄与率が99%を超えたため、分光分布の

近似表現は第3主成分までを基底として行った。その結果、平方平均二乗誤差は平均で 10^{-3} 程度であり、推定誤差よりも十分小さい値であることから、近似表現の有効性が示された。

主成分について考察する。第1から第3主成分の寄与率はそれぞれ、時系列平均で91.0%、6.5%、1.9%となり、第1主成分の寄与が非常に大きい結果となった。各時刻の主成分波形を比較すると、第1から第3主成分の全てに、ほぼ変化が見られないことがわかる。5.1.1節で見られた、寄与率による第2、第3主成分の入れ替わりも見られず、第3主成分についても、短波長から長波長に向けて、緩やかに増加していく点で類似している。このことから、本シーンにおける主成分曲線は、時系列変動にほぼ依存しないと結論付けられる。

ここで、図6と図9について、寄与率による入れ替わりも考慮して比較すると、その主成分波形は第1から第3まで全て、概ね類似していることがわかる。以上より、本シーンにおける主成分曲線は、季節変動及び時系列変動のような時間変動にあまり依存しない、シーン固有のものであることがわかった。

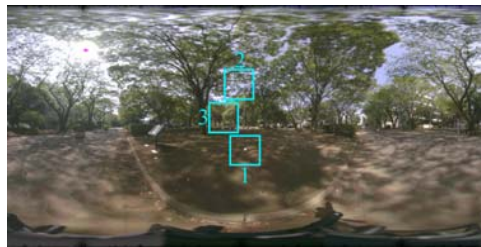


図7 午前11時獲得画像

表2 推定誤差(RMSE)

area	RMSE
1	1.46E-02
2	1.71E-02
3	4.32E-02

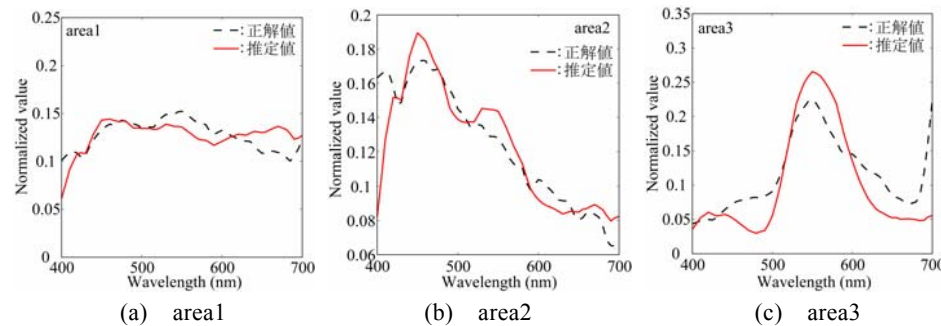


図8 area1,2,3に対する分光分布推定結果

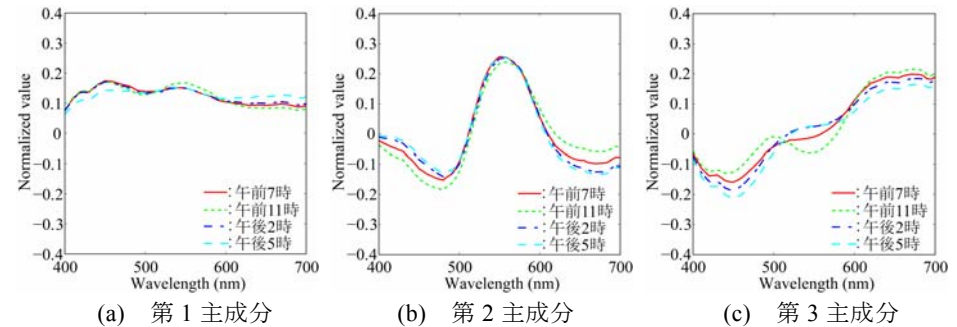


図9 各時刻の主成分波形の比較

6. 共通主成分による表現

5章の実験により、実験で対象としたシーンにおける主成分曲線は、時間変動に依存しないことがわかった。そこで、実験1及び2で獲得した計8枚の画像を対象として主成分分析を行い、主成分を獲得した。これを共通主成分として、図6及び9に示した各主成分ベクトルの平均値となっている。3つの共通主成分ベクトルを図10に示す。表3に、共通主成分の累積寄与率を示す。これらは、第3主成分までの累積寄与率は約99%であり、分光分布の近似表現には、実験の際と同様に第3主成分までを基底とすればよいことを示している。また、第1から第3主成分の寄与率はそれぞれ、90.4%、6.2%、2.9%となり、第1主成分の寄与が非常に大きい結果であることも、5章の実験結果と同様であった。そこで、共通主成分を用いて、各計測画像の分光情報の近似表現を行った。その結果が、分光推定結果の推定誤差より十分小さい値であれば、近似表現は有効であると言えることから、共通主成分は時間変動に不変なシーンの全方位光源分光分布の特徴であり、それは3本の主成分曲線のみで表現できるということになる。

図7中のarea1-3について、分光推定の結果と近似表現の結果の比較を、図11に示す。図11より近似表現の結果は、分光推定の結果とほぼ同様の曲線を描いていることから、良好であることがわかる。また、定量評価として、図4及び7中の各area1-3について、推定値と近似値の平方平均二乗誤差(RMSE)を算出したものを近似誤差として、表4に示す。表4より、平方平均二乗誤差は平均で 10^{-3} の値になり、表1及び2に示した推定誤差の値と比較すると、十分に小さい値であることがわかる。

以上より、共通主成分は、実験で対象としたシーンについて、時間変動に不変な全方位光源分光分布の特徴であることが示された。このことから、他の自然シーンについても、その全方位光源分光分布の特徴は、時間変動を問わず、3本の主成分曲線の

みで表現できる可能性が示唆された。

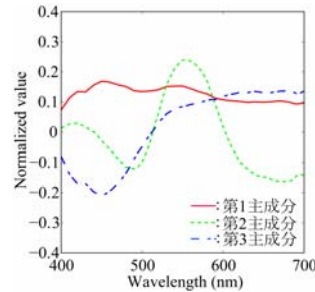
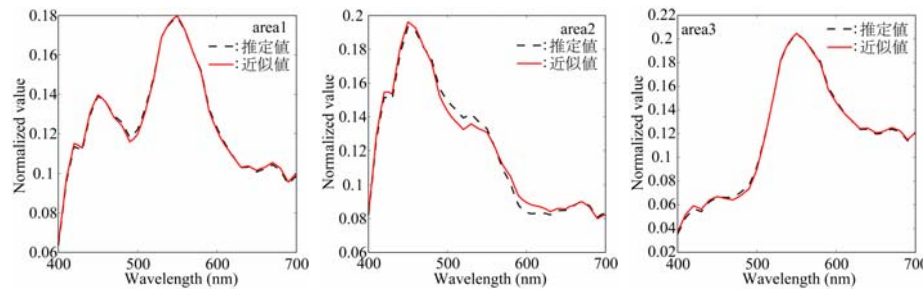


図 10 共通主成分

表 3 累積寄与率

主成分本数	累積寄与率
1	0.904
2	0.966
3	0.995



(a) area1 (b) area2 (c) area3

図 11 area1,2,3 に対する分光分布近似結果

表 4 近似誤差(RMSE)

(a) 図 4 の area

area	RMSE
1	1.13E-03
2	3.60E-03
3	1.49E-03

(b) 図 7 の area

area	RMSE
1	8.67E-04
2	1.86E-03
3	3.71E-03

7. おわりに

本稿では、全方位光源を計測するためのマルチバンドイメージングシステムを構築し、実際の屋外シーンにおいて、時間変動に注目した計測を行った。

時間変動による全方位分光分布の特徴の変化の解析を目的として、2種類の実験を行った。実験 5.1 では、季節変動に注目した計測及び解析を行い、どの季節においても、類似した波形の主成分を得た。このことから、本シーンにおける主成分曲線は、季節変動に依存しないことがわかった。実験 5.2 では、時系列変動に注目した計測及び解析を行い、どの時刻においても、類似した波形の主成分を得た。このことから、本シーンにおける主成分曲線は、時系列変動に依存しないことがわかった。また、2つの実験結果から、本シーンにおける主成分曲線は、時間変動に依存しないことがわかった。

実験 5.1 及び 5.2 で得た全ての主成分波形は類似していることから、実験 5.1 及び 5.2 で得られた全ての獲得画像に対して主成分分析を行い、共通主成分を得た。これを用いて、実験 5.1 及び 5.2 で得られた分光分布の近似表現を試みた結果、特徴記述が可能であることがわかった。従って、共通主成分は、本シーンにおける時間変動に不変な主成分であることが示された。このことから、本シーンの全方位光源分光分布の特徴は、3本の主成分曲線のみで表現できることがわかった。

今後は、自然シーンには存在し難い色を含むような、特徴的なシーンの解析を進め、そのようなシーンの主成分を獲得していく必要がある。

参考文献

- 1) P. E. Debevec, "Rendering synthetic objects into real scenes," Proc. SIGGRAPH 98, pp.189-198. Orlando, FL, USA, Jul.1998
- 2) S. Tominaga and N. Tanaka, "Measurement of omnidirectional light distribution by a mirrored ball," Proc. The Ninth Color Imaging Conf., pp.22-26, Scottsdale, Az, USA, Nov.2001.
- 3) K. Miyamoto, "Fish eye lens," J. Opt. Soc. Am., vol.54, no.8, pp.1060-1061, 1964.
- 4) S. Tominaga, T. Fukuda and Akira Kimachi, "A High-Resolution Imaging System for Omnidirectional Illuminant Estimation," Journal of Imaging Science and Technology, vol.52, no.4, pp.040907-9, 2008.
- 5) J. Hernández-Andrés, J.L. Nieves, C.M. Valero, and J. Romero, "Spectral-daylight recovery by use of only a few sensors," J. Opt. Soc. Am. A, vol.21, No.1, pp.13-23, 2004.
- 6) S. Tominaga, A. Matsuura and T. Horiuchi, "Spectral Analysis of Omnidirectional Illumination in a Natural Scene", Journal of Imaging Science and Technology, Vol.54, No.4, pp. 040502-1 -9, 2010.