

# RGB カラーカメラを用いた分光ベース全方位画像計測法

合津正史 高橋明誉 田中法博 禹 在勇

長野大学 企業情報学部企業情報学科

## 要旨

本稿では、市販の RGB カラーカメラを用いて全方位光源の分光分布を計測する手法を提案する。我々はカラーチャートを用いてシーン内の光源の分光分布の統計的性質を調べる。この結果に基づいて、全方位光源の分光分布をカメラ感度未知の RGB カメラセンサ出力から推定する。まずこの方法では、光源の種類を分光分布特性によって分類する。そして、それぞれの光源下でカラーチャートを RGB カメラと分光放射輝度計で計測し、分光分布データベースを構築する。次にこのデータベースから分光分布の基底関数を求め、カメラ出力の RGB 値から基底関数の重みベクトルを推定することにより間接的に高次元の分光分布を推定する。最後に本手法の有効性は、カメラ出力から推定した分光分布と分光放射輝度計で直接計測した分光分布を比較することにより行う。

## A Method for Measuring of Multi Spectral Based Omni-directional Image

Masashi Gouzu, Akinori Takahashi, Norihiro Tanaka and Jae Yong Woo

Faculty of Business and Informatics  
Nagano University

## Abstract

In this paper, we propose a method for spectral measuring of omni-directional light sources by using an RGB digital camera. We statistically analyze the spectral distribution of light sources in the scene with the Macbeth color chart. Based on the results, the spectral distribution of omni-directional light sources is estimated from the RGB camera sensor output without the camera sensitivity function. First, light sources are classified into some group on the bases of spectral distribution properties. In order to make a database of spectral distribution of light sources, the color chart is measured by the RGB camera and a spectral radio photometer at each light source groups. Next, to estimate spectral distribution, bases functions are calculated from the database. Finally, the feasibility of the proposed method is confirmed by some experiment, such as comparison with direct measurements using the spectral radio photometer.

## 1. はじめに

実シーンの光源情報下における画像生成では、仮想シーン内の物体は全方位に分布する無数の光源の影響を受ける。このようなシーンでの画像生成には Image Based Lighting (IBL)[1]がよく用いられるが、従来の RGB カラー情報に基づいた画像生成では十分な色再現精度が得られない。さらに RGB カラー情報はデジタルカメラやディスプレイのデバイス特性に依存するため、デバイス毎に用いられている RGB 値は物理的な根拠を持たないという問題も同時に発生する[2][3]。

このような問題を解決するためには、物体固有の物理情報である分光情報に基づいた手法が有効であることが知られている。コンピュータグラフィックス分野では分光ベースのレンダリング手法は干渉光などの色のスペクトル表現によく用いられてきたが、ここでは物体の精密な色再現においても重要な役割を果たす。

ここでさらに2つの大きな問題が生じる。まず一つ目の問題はシーン照明環境を分光的に獲得するためには全方位に無数に存在する光源の空間分布と分光分布を同時に計測しなければならないということである。一般的に照明光源の空間分布は画像計測が有効であるが、一般のカメラ系では分光情報の獲得が難しい。通常、カメラは色情報に関しては、たとえば RGB カラー情報では3つの色情報といった低次元情報しか得られないため、分光情報などの高次元情報の獲得には不向きであるからである。これまで画像計測に基づいた全方位光源の空間分布と分光分布を計測する手法がいくつか提案されているが、これまでの方法は、事前にカメラの分光感度を計測する必要があるなど事前の計測環境の構築が難しいという問題がある[4]。

もう一つの大きな問題は、実シーンに存在する光源の分光分布のスペクトル波形の問題である。たとえば物体表面の分光反射率は一般的に

波長変動が緩やかであるため、分光情報の計測や推定にはこの性質を利用することが多い。しかし、実シーン内で得られる色信号（視覚系に到達する分光分布）は、一般的にみても滑らかであるとはいえないことが多い。

そういった問題に対して我々が現在取り組んでいる研究では、市販の RGB カラーカメラと魚眼レンズを用いた簡便な計測系で全方位の光源の分光分布を推定する手法を開発することを目的としている。通常低次元情報から、高次元情報を推定する場合、何らかの数学的拘束条件が必要となるが、本研究では、Schmitt らの研究 [5] に基づいて、分光反射率とカメラ出力の間のシステム変換マトリックスを求める。ここで様々な光源環境下の光源分光分布データベースを構築し、そこから統計的性質に基づいてカメラ出力から高次元の分光情報を推定する。

本稿では、シーン中の存在する主たる光源の種類に応じた分光分布データベースを構築し、そのデータベースの統計的特徴から、シーン内の全方位の分光分布を推定する手法を提案する。具体的に本稿で述べる内容は以下のとおりである。(1) 複数の光源環境下でカラーチャートを分光放射輝度計とカメラで計測し、画像と画像に対応する色信号（分光分布）から計測に用いる分光分布データベースを構築、(2) 構築した分光分布データベースを統計的に調べ、カメラ出力から分光分布に変換するシステム変換マトリックスを構築、(3) カメラで計測した全方位画像とデータベースから、全方位に存在する光源の空間分布と分光分布を推定、(4) 推定した全方位光源情報を GPU 上に実装し、対象となる物体を分光的にリアルタイムレンダリングする、(5) 推定した分光情報の妥当性は、分光放射輝度計で計測した分光分布とカメラから出力した推定した分光分布を比較して検証、(6) 推定した環境光の条件下で仮想物体を映像再現し、視覚的に妥当性を検証する。

## 2. 計測系

本研究では、画像計測系として魚眼レンズと市販 RGB カラーカメラを用いる。RGB カラーカメラは Canon EOS 5D、魚眼レンズは SIGMA FISHEYE EX DG CIRCULAR 8mm F3.5 を用いた。このカメラは各画素 12bit のダイナミックレンジを持ち 1280 万画素の解像度を持つ。また、撮像素子は 35mm フルサイズの C-MOS を持つ。ただし、本研究で使用した魚眼レンズの画角は、

EOS 5D との組み合わせでは約 137 度となった。分光分布データベース構築のための分光分布の計測には分光放射輝度計(トプコンテクノハウス SR-3A-L1)を用いた。

## 3. 実シーンを分光計測するときの問題点と解決に向けた方針

本研究では、カメラ系に入る色信号（分光分布）は、直接光、間接光を区別せずに扱う。

一般の物体表面の分光反射率は図 1 で示すように比較的滑らかな特性を持っていることが知られている。通常、少ないバンド数のカメラ出力から分光情報を推定する場合は、分光反射率のこの性質を利用することが多い。しかし、蛍光灯などの波長変動が激しい光源が存在するシーン中では、図 1 と同じ物体からの反射光であってもカメラ系に入射する色信号は、図 2 に示すようにスパイクな分光特性を持ってしまう。本稿では、シーン中に存在する影響力の大きい主たる光源の種類がある程度既知であることを前提に RGB カメラ出力から分光関数へのシステム変換マトリックスを構築することにより分光分布を推定する。

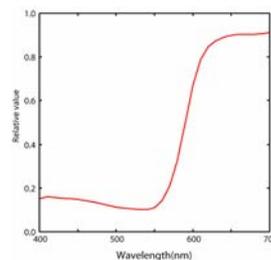


図 1. 分光反射率の例

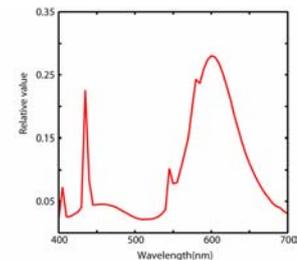


図 2. 左図の物体の  
蛍光灯下での色信号

## 4. カメラモデル

### 4.1. 魚眼レンズの幾何モデル

全方位に存在する光源の空間分布は、画像計測により獲得することが最も有効である。本研究では魚眼レンズを用いて全方位を画像計測する。魚眼レンズは一般に広い視野角を持つ特殊なレンズであり、一般的なカメラレンズとは射影方式が異なり、等距離射影方式や等立体角射影方式となっている。魚眼レンズの幾何モデルを図 3 に示す。この図は 3 次元空間 XYZ 上に存在する座標 P が画像上の 2 次元空間 xy 上の座標 p への射影の様子を示している。等距離射影の魚眼レンズの射影は  $r = f\theta$  で示される。ここで  $r$  は画像中の長さ、 $f$  は焦点距離、 $\theta$  は方位角、

$\theta$  は仰角である。射影された画像は円形の画像として得られる。画像中の距離がカメラから見た角度と対応しているため画像からは容易に、照明方向角度  $\theta$  と  $\varphi$  を推定することができる。

#### 4.2. 撮影した画像から全方位画像へ変換

図3の幾何モデルから魚眼レンズで計測した円形画像から全方位画像に変換する。この全方位画像は照明方向と分光的な光源強度の関係をマップ化して光源の空間分布を表現する。

このとき魚眼レンズで計測した画像は撮影範囲の問題から一枚だけでは全方位を計測することできないため、複数枚の画像を計測し、基準となる座標系の中でそれらを合成する(図4)。合成・変換後の画像の仰角は  $\theta'$ 、方位角は  $\varphi'$  とすると合成後は座標系  $(\theta', \varphi')$  の全方位画像となる。ここで全方位画像上の光源の分光分布は  $E(\theta', \varphi', \lambda)$  という方向と波長  $\lambda$  の関数で示す。

#### 4.3 カメラ出力のモデル化

ここではまずカメラ系に入射する色信号をモデル化する。カメラ系に入力する色信号  $C(\lambda)$  は、光源からの直接光であれば光源の分光分布  $E(\lambda)$  を用いて、 $C(\lambda)=E(\lambda)$  として記述され、一度物体に反射した反射光ならば  $E(\lambda)$  と物体の分光反射率  $S(\lambda)$  を用いて、 $C(\lambda)=E(\lambda)S(\lambda)$  と記述される。このとき本稿では、直接光と反射光などは区別しないため、全方位画像の画素の値は全て  $C(\lambda)$  として求める。ただし、ここでは位置パラメータ  $(\theta, \varphi)$  は省略して記述している。

次に RGB カラーカメラのカメラ出力  $\rho$  は RGB 3つの値を持つ 3・1 のベクトルで示す。これをモデル化すると次式のようなになる。光源の分光分布は  $E(\lambda)$ 、カメラの分光感度は RGB それぞれのチャンネルに対して  $R_R(\lambda)$ 、 $R_G(\lambda)$ 、 $R_B(\lambda)$  である。ここで一つの画素あたりのカメラ出力  $\rho$  を可視波長域(400nm-700nm)に関してモデル化すると次式のようなになる。

$$\rho = \int_{400}^{700} C(\lambda) \begin{bmatrix} R_R(\lambda) \\ R_G(\lambda) \\ R_B(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \quad (1)$$

このように RGB カメラから得られたカメラ出力  $\rho$  は RGB 3つの値を持つ。

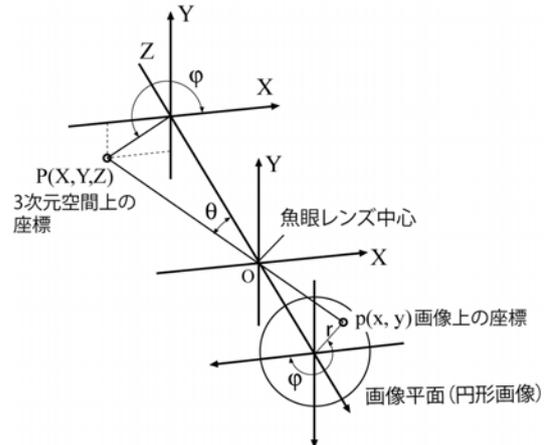


図3. 魚眼レンズの幾何モデル

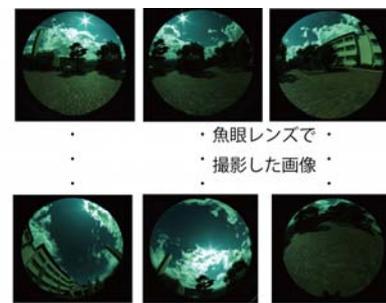


図4. 魚眼レンズで撮影した画像から全方位画像へ合成

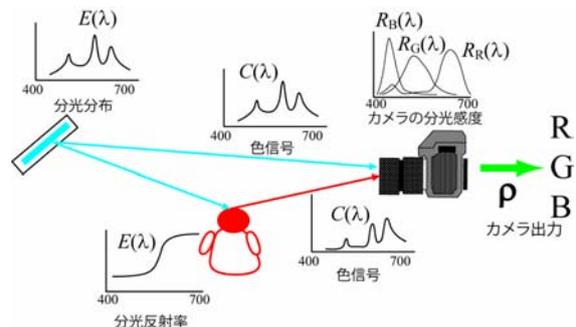


図5. 分光情報に基づいたカメラ出力モデル

### 5. 光源の分光分布の推定

#### 5.1 分光分布データベースの構築

低次元のカメラ出力から高次元情報である分光分布を推定する。ここで視覚系に入射する分

光分布は色信号と呼ぶ。カメラ出力(RGB 値)から色信号の推定方法を述べる。ここでは有限次元線形モデルに基づいて分光分布を推定する[3]。

本稿では、カメラ系に入力される色信号は、全て光源の分光分布  $E(\lambda)$  であると仮定する。つまり、直接光の分光分布と物体からの反射光の分光分布を区別しない。この条件で分光情報は可視波長域(400nm-700nm)を 5nm 間隔でサンプリングし、61次元のベクトルとして扱う。

ここでは61個以上のカラーパッチを持ったカラーチャートを分光放射輝度計とRGBカラーカメラで計測して、色信号とそれに対応するRGB値を得る。これら色信号とRGB値の集合をここでは分光分布データベースと呼ぶ。

## 5.2. 分光分布情報の推定

分光分布データベースに含まれる分光分布の数を  $m$  とすると、データベース内の分光分布  $\Lambda$  は  $m \times 61$  の行列で示す。このとき  $\Lambda$  を主成分分析した結果を  $61 \times 61$  の行列  $B$  で示す。本研究で用いたカメラはRGB3次元のカメラ出力を得ることができるため、 $B$  から寄与率の高い順に主成分ベクトルを3つ取り出す。この3つの主成分ベクトルは、それぞれ  $61 \times 1$  のベクトル  $b_1, b_2, b_3$  で示す。これらの3つのベクトルが分光分布の基底ベクトルとなる。このとき、分光分布を  $\bar{s}$  とすれば、この3つの基底ベクトルの線形結合で示すことができる。

$$\bar{s} = w_1 b_1 + w_2 b_2 + w_3 b_3 \quad (2)$$

このとき  $w_1, w_2, w_3$  は、それぞれの基底ベクトルの重み係数であり、スカラー量である。一度、基底ベクトルが決定されると、分光分布は  $w_1, w_2, w_3$  という3つのスカラー値のみが分かれば元の情報をほぼ復元することができる。つまり、このことにより高次元の分光情報がわずか3つの数値で表現できるということを意味する。この3つの重み係数の  $w_1, w_2, w_3$  の推定は、まずデータベース内の各分光分布に対応した重み係数で  $3 \times m$  の行列  $W$  を用意する。

次に3つの基底ベクトルからつくられた  $61 \times 3$  の行列  $B'$  を作成すれば、データベース内の分光分布  $\Lambda$  は次式のように書ける。

$$\Lambda^T = B' W \quad (3)$$

$W$  は  $B'$  の一般化逆行列  $B'^{\dagger}$  を用いて次式のようにして求めることができる。

$$W = B'^{\dagger} \Lambda^T \quad (4)$$

このように高次元の分光分布情報は低次元の重み係数で表現できる。このようになれば低次元のカメラ出力RGB値から高次元の分光関数推定

問題は、RGB値から3つの重み係数への変換処理に帰着させることができる。

カメラ出力の集合は、データベース中の分光分布それぞれに対応させ  $m \times 3$  の行列  $P$  として表す。

このカメラ出力  $P$  を重み係数行列に変換する変換行列は  $3 \times 3$  の行列  $M$  とすると、これらの関係は次式で表すことができる。

$$W^T = P M \quad (5)$$

ここから変換行列  $M$  は、 $P$  の一般化逆行列を用いて次式のように求める。

$$M = P^{\dagger} W^T \quad (6)$$

この  $M$  が求まれば、(5)式から基底ベクトルの重み係数が求まり、さらに(2)式から分光分布を推定することができる。

## 6. 実験

先に述べた方法でRGBカラーカメラと魚眼レンズを用いて白熱電球、蛍光灯それぞれの環境下でカラーチャートの計測を行った。ここではまず分光分布データベースを作成した。Gretag Macbeth社のデジタルカメラ色校正用色票を用いて作成した。画像はカメラからRAWデータを直接取り出して使用した。このときのデータベース作成に使用した色票を図6に示す。ここでは重複する色を除去して176色のカラーパッチの分光反射率データとRGB値が得られた。そして、このデータベース内の分光反射率データを主成分分析し、3つの基底ベクトルを得た。使用したカメラはRGB3つのカメラ出力しか得られないため、使用できる基底ベクトルは3つまでである。

図7は構築した分光分布データベースから得られた基底関数である。図7(a)は白熱電球下、図7(b)は蛍光灯下である。この条件下で色票からの色信号(分光分布)を推定した結果を図8に示す。実線は分光放射輝度計による計測値、破線は推定値である。次に長野大学キャンパス内で全方位画像を計測した。図9は長野大学ホール内の全方位画像で主に白熱電球により照明されている。図10は長野大学図書館内のシーンで、白熱電球と蛍光灯の両方の光源が存在している。図11は計測した図9の全方位分光画像を用いてIBLにより分光的にレンダリングしたCGである。

## 7. まとめ

本研究では、市販の分光感度が未知の RGB カラーカメラと魚眼レンズを用いた簡便な計測系で全方位の光源の分光分布を推定する手法を提案した。通常低次元情報から、高次元情報を推定する場合、何らかの数学的拘束条件が必要となるが、本研究では、Schmitt らの研究に基づいて、分光反射率とカメラ出力の間のシステム変換マトリックスを求めた。ここで様々な光源環境下の光源分光分布データベースを構築し、そこから統計的性質に基づいてカメラ出力から高次元の分光情報を推定した。そして、シーン中の存在する主たる光源の種類に応じた分光分布データベースを構築し、そのデータベースの統計的特徴から、シーン内の全方位の分光分布を推定した。

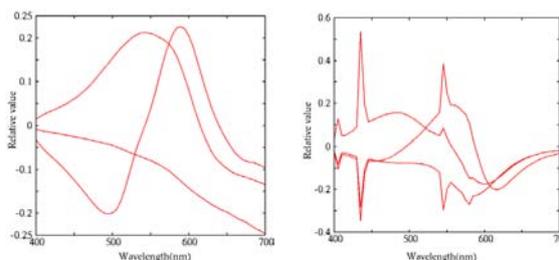
本研究により、市販の RGB カメラというチャンネル数の少ないカメラでも比較的複雑な分光波形を持つシーンに対しても分光分布が推定できる可能性を示すことができた。

### 参考文献

- [1] P. E. Debevec : Rendering Synthetic objects into real scenes: bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography, *Proc. of SIGGRAPH 98*, pp.189-198, 1998.
- [2] 望月宏祐, 林一成, 田中法博, 禹在勇, 福田 剛, 富永昌治:GPU を用いた分光ベースレンダリングのための分光画像マッピング法, VC/GCAD 合同シンポジウム論文集, 6pages, 2008.
- [3] 田中法博, 梶本めぐみ, 富永昌治: 鏡面球を用いた光源の全方位分布の推定, 日本色彩学会誌, Vol.25, No.2, pp.92-101, 2001.
- [4] S. Tominaga, T. Fukuda and A. Kimachi: High-resolution Imaging System for Omnidirectional Illuminant Estimation, IS&T 15<sup>th</sup> CIC, 2007.
- [5] F. Schmitt, H. Brettel and J. Y. Hardeberg: Multispectral imaging development at ENST, Proc.of International Symposium of Multispectral Imaging and Color Reproduction for Digital Archive, pp. 50-57, 1999.



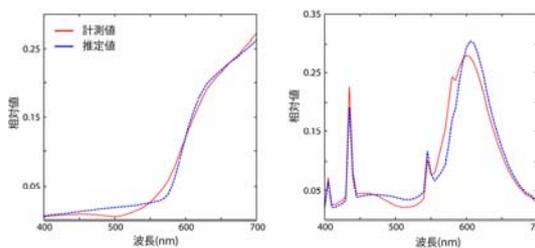
図6. 計測に使用した色票



(a) 白熱電球

(b) 蛍光灯

図7. 構築した分光分布データベースから得られた基底関数



(a) 白熱電球

(b) 蛍光灯

図8. カラーチャート中の赤色パッチの計測値と推定値の比較



(a) 長野大学ホール内



(b) 長野大学図書館内

図9. 計測した全方位画像



図10. 計測した全方位分光分布下でレンダリングしたCG