

## 未校正カメラを用いた分光反射率推定と その精度検証

宮下朋也<sup>†</sup> 田中法博<sup>†</sup> 望月宏祐<sup>††</sup>

本論文では、分光感度が未知のカメラを用いて簡易的に分光反射率を推定する手法を提案する。最初に物体表面の分光反射率はいくつかの基底関数の線形結合で記述できると仮定して、カラーチャートと分光光度計を用いてカメラ出力から分光反射率のシステム変換マトリックスを求める。次に未校正カメラのカメラ出力から分光反射率を推定するために、未校正カメラの RGB 色空間から校正カメラの RGB 色空間への変換マトリックスを作成する。分光反射率を推定することでカメラ出力 (RGB 値) からデバイス特性や照明光源の影響を除去する。最終的に本手法の妥当性は、推定した実際の物体の分光反射率で物体を画像再現して視覚的に確認する。

### Estimation of Spectral Reflectance Using Uncalibrated Camera and Its Evaluation

Tomoya Miyashita<sup>†</sup>, Norhiro Tanaka<sup>†</sup>  
and Kosuke Mochizuki<sup>††</sup>

In this paper, we propose a simplified method for estimating spectral reflectance using an RGB color camera without camera sensitivity function information. Firstly, we assumed that the spectral reflectance of an object surface can be described as linear combination of some basis functions. The system conversion matrix from the camera output to spectral reflection is estimated using color chart and spectral photometer. Secondly, in order to estimate multi-spectral reflectance of the object surface from an uncalibrated camera outputs, we make the conversion matrix from the uncalibrated camera RGB color space to the calibrated camera RGB color space. To estimate spectral reflectance, the camera device characteristics and the influence of illuminant are removed from the camera outputs. Finally, we render a realistic image of an object using the estimated spectral reflectance and confirm the validity of the proposed method visually.

### 1. はじめに

分光ベースのレンダリング手法は干渉光や微細な表面構造により発生する構造色の表現等の様々な応用が可能である。さらに最近では美術品のデジタルアーカイブといった色再現精度が必要とされる分野において分光反射率に基づいた分光反射計算を行うことで色再現精度の向上が目指されている[1]。こういった分光ベースレンダリングを行う時に問題となることは、分光反射率などの分光情報を実際のシーンや物体からどのように獲得するかということである。一般に分光情報は分光放射輝度計や分光光度計といった計測機を用いて計測するが、こういった計測方法では、たとえばテクスチャがあったり色が連続的に変化したりするような物体の分光反射率計測は困難である。このような対象には画像計測が有効であると考えられるが、一般のカメラで得られる色情報は RGB の 3 原色といった低次元情報であるため高次元の分光情報の推定には何らかの推定アルゴリズムが必要であるが、この推定はカメラの分光感度特性や照明環境の影響を受けるという問題がある[2]。この場合、カメラの分光感度特性を事前に調べてその影響を除去するための校正作業 (キャリブレーション) や照明光の分光分布を事前に調べておく必要がある[3]。特にカメラ感度特性のキャリブレーションは分光放射輝度計とモノクロメータを用いた大掛かりな計測設備と労力が必要となる。また画像から分光反射率を計測する場合には、計測時のシーン照明光源の分光分布を事前に計測しておく必要があるため未知の光源環境下では分光反射率の推定が難しくなる。このような問題により一般に分光情報が手軽に獲得できない。

そういったことから、市販のデジタルカメラのように広く普及しているカラーイメージングデバイスで簡便に物体表面の分光反射率が推定できれば極めて有用である。

本研究では一般の未校正の RGB デジタルカメラを用いて簡便に物体表面の分光反射率を推定する手法を提案する。この提案手法では任意の未校正カメラ、任意の照明環境下で撮影した画像から分光反射率の推定を行えることを目的とする。

本稿で提案する手法は①事前にカラーチャートと分光光度計を用いて、基準となるデジタルカメラの RGB 出力から分光反射率のシステム変換マトリックスを構築、② Macbeth 24 色のカラーチャートを用いて任意のデジタルカメラの RGB 出力を基準カメラの RGB 空間に変換、という 2 つのステップから成る。本手法の特徴的な点は一般に使用される任意の未校正 RGB カラーカメラを用いながらも、任意の照明環境下で分光反射率を簡便に推定できることである。逆にカメラメタメリズム[4] (カメラから出力 RGB 値の色恒常性) の問題に対するような推定精度の向上は本研究の対象と

<sup>†</sup> 長野大学 企業情報学部  
Faculty of Business and Informatics, Nagano University

<sup>††</sup> 信州大学  
Shinshu University

はしない。本手法の妥当性は、分光光度計で直接計測した分光反射率と、提案手法により画像から推定した分光反射率の推定値とを比較することにより示す。最後に実際の物体の分光反射率を提案手法で推定して、その結果を用いて分光ベースレンドリングを行う[5].

## 2. カメラモデル

図1はカメラ出力の分光モデルである。このモデルは光源からの光が物体表面で反射してカメラ系に入力するといった光反射に基づくカメラ出力 RGB 値を得るまでのプロセスを記述したものである。このときのカメラ出力 RGB 値は光源の分光分布  $E(\lambda)$  と物体の分光反射率  $S(\lambda)$  を用いて光の可視波長域(400nm-700nm)でモデル化すると次式のように示すことができる。

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \int_{400}^{700} E(\lambda)S(\lambda) \begin{bmatrix} r_r(\lambda) \\ r_g(\lambda) \\ r_b(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \quad (1)$$

ここで  $r_r(\lambda), r_g(\lambda), r_b(\lambda)$  はそれぞれ R(赤), G(緑), B(青)チャンネルの分光感度関数であり、これらはカメラ固有の感度特性である。

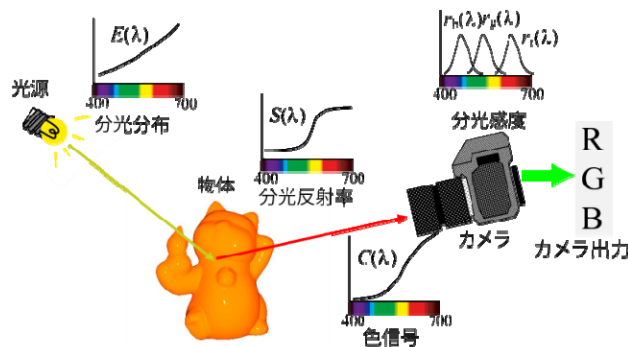


図1. カメラ出力の分光モデル

## 3. 較正されたカメラ出力からの分光反射率推定

本研究では、テクスチャを持つなど表面特性が一様でない物体表面に対して分光反射率を推定する。このような場合、一般的な分光計測器では分光反射率を計測することができないため、画像計測に基づいた計測を行う必要がある。

このとき2つの問題が発生する。まず一つ目は計測した画像は計測に使用したカメラ固有の分光特性に依存していることである。(1)式に示したようにカメラ出力から得られる画像情報(RGB 値)は、カメラ固有の分光感度関数や照明光源の影響が含まれている。分光反射率は、カメラなどの計測機器に依存しない物体固有の物理情報であるため、カメラ出力に含まれている照明光源の影響やカメラ固有の特性を除去する必要がある。

二つ目の問題点としてカメラ出力から得られる画像情報は、RGB 3次元の情報であるが、本研究で求めたい分光関数は連続関数であるため高次元の情報である。つまり、ここでは低次元情報から高次元情報の推定という問題が発生するが、これは一般に数学的には解けない。

そこで本研究では先に示した2つの問題点を解決するために、分光情報の統計的性質を利用して画像から分光反射率を推定する[1]。このような場合、事前にカメラの分光感度特性を調べて、分光感度関数を既知関数として取り扱うことが多い。しかし、分光感度関数の計測にはモノクロメータと分光放射輝度計を併用した大がかりな作業が必要となるという問題がある。そういった問題に対して多数の色表などを分光計測器とカメラで同時に計測し、カメラ出力から分光関数への変換マトリックスを作成する手法が提案されている[6].

これまで我々は RGB3つのカメラ出力という低次元情報から分光反射率という高次元情報を推定する手法を提案した[1]。この方法ではカメラ系に入力される色信号から物体表面の分光反射率を推定できる。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。分光反射率データベース[1]を構築した時、これ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反射率の組み  $\Lambda$  は  $m \times 61$  の行列で示す。ここから得られた3つの主成分ベクトルは、それぞれ  $61 \times 1$  のベクトル  $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \mathbf{b}_3$  で示す。このとき、各画素に対応する分光分布を  $\mathbf{s}$  とすれば、 $\mathbf{s}$  はこの3つの基底ベクトルの線形結合で示すことができる[7].

$$\mathbf{s} = w_1 \mathbf{b}_1 + w_2 \mathbf{b}_2 + w_3 \mathbf{b}_3 \quad (2)$$

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る。一度、基底ベクトルが決定されると、分光分布はこの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、高次元の分光情報がわずか3つの数値で表現できることになる。このようにすればカメラの RGB 出力から基底関数の重み係数への変換は  $3 \times 3$  の変換行列  $\mathbf{M}$  を用いて次式で示すことができる。

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3)$$

このとき  $\mathbf{M}$  は分光反射率の組み  $\mathbf{A}$  とカメラ出力の組みとの関係から推定する[12]。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、分光反射率は  $w_1, w_2, w_3$  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。

ここで重み係数の  $w_1, w_2, w_3$  の推定は、まず分光反射率の組みの分光反射率に対応させて次のような  $3 \times m$  の行列  $\mathbf{W}$  を作成する。

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1m} \\ w_{21} & \cdots & w_{2m} \\ w_{31} & \cdots & w_{3m} \end{bmatrix} \quad (4)$$

次に、 $\mathbf{A}$  を主成分分析して3つの基底ベクトルからつくられた  $61 \times 3$  の行列  $\mathbf{B}'$  を作成する。

$$\mathbf{B}' = [\mathbf{b}_1 \ \mathbf{b}_2 \ \mathbf{b}_3] \quad (5)$$

$\mathbf{B}'$  と重み行列  $\mathbf{W}$  を用いて分光反射率の組み  $\mathbf{A}$  は次式のように記述する。

$$\mathbf{A}^T = \mathbf{B}' \mathbf{W} \quad (6)$$

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

$$\mathbf{W} = \mathbf{B}'^+ \mathbf{A}^T \quad (7)$$

カメラ出力の組みは、分光反射率の組みにそれぞれに対応させ  $m \times 3$  の行列  $\mathbf{P}$  として表

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

$$\mathbf{W}^T = \mathbf{P} \mathbf{M} \quad (8)$$

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

$$\mathbf{M} = \mathbf{P}^+ \mathbf{W}^T \quad (9)$$

この  $\mathbf{M}$  が求めれば、(8)式から基底ベクトルの重み係数が求まり、さらに(2)式から分光反射率を推定することができる。このようにすれば RGB 値から分光反射率関数の変換は変換行列  $\mathbf{M}$  を用いた3対3の線形変換となり、高次元の分光反射率情報は低次元の重み係数で表現できる。これで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。

#### 4. 未校正カメラ出力からの分光反射率推定

ここからは未校正カメラを用いて分光反射率を推定する手法を述べる。先に述べた校正されたカメラのシステム変換マトリックスを利用して未校正カメラからの分光反射率推定を行う。つまり、本稿では2つのカメラ系を用いて分光反射率を推定する。まず一つ目は、事前に分光感度と照明環境の影響を取り除くように校正したカメラ系である。本稿ではこのカメラ系を基準カメラ系と呼ぶ。次に、二つ目のカメラ系として分光感度が未知のカメラ系を未校正カメラと呼ぶ。

まず  $k$  色のカラーチャートを校正したカメラと未校正カメラの両方で撮影する。ただし  $k$  は RGB 3原色よりも多い数が必要であるため  $k \geq 3$  とする。校正したカメラのカメラ出力の組みは  $3 \times k$  の行列  $\mathbf{A}_c$ 、未校正カメラのカメラ出力を  $3 \times k$  の行列  $\mathbf{A}_u$  とすると両者のカメラ出力の関係は、色変換行列  $\mathbf{T}$  を用いて次式のように記述できる。

$$\mathbf{A}_c = \mathbf{T} \mathbf{A}_u \quad (10)$$

このとき  $\mathbf{T}$  は行列  $\mathbf{A}_c$  の一般化逆行列  $\mathbf{A}_c^+$  を用いて  $\mathbf{T} = \mathbf{A}_c \mathbf{A}_u^+$  として推定できる。

この方法では事前に一度基準カメラ系の校正を行えば、そのシステム変換マトリックスを用いることで、その後は任意の未校正カメラのカメラ出力(RGB 値)から分光反射率を推定できる。

画素数  $n$  の未校正カメラの画像を  $3 \times n$  の行列  $\mathbf{C}_u$  で表すと(4)式の重み係数行列は(3)

式から次式のように求めることができる。

$$\mathbf{W} = \mathbf{M}\mathbf{A}_C\mathbf{A}_U^+\mathbf{C}_U \quad (11)$$

このように一度  $\mathbf{W}$  が求めれば(2)式から分光反射率が推定できる。このとき  $\mathbf{M}$  と  $\mathbf{A}_C$  は一度較正すれば、他の未較正カメラに依存しない。このため一度、 $\mathbf{M}$  と  $\mathbf{A}_C$  を決定すれば再利用が可能であり、任意の未較正カメラに対しても使用することができる。

## 5. 実験

未較正カメラを用いて、較正時と異なる照明環境下で画像から分光反射率推定を行った。本実験に用いたカメラは、較正した基準カメラシステムとして Canon EOS 50D、未較正カメラシステムとして Nikon D3000 を用いた(図 2)。

まず GretagMacbeth 社の 176 色カラーチャートと分光光度計(GretagMacbeth i1)を用いて、基準カメラシステムのシステム変換マトリックスとカラーチャートの基底関数を求めた(図 3)。この基準カメラシステムの較正は一般的な蛍光灯照明環境下で行った。

次に未較正カメラの色空間から基準カメラの色空間変換には、GretagMacbeth 社の 24 色のカラーチャートを用いた。基準カメラでは、この 24 色カラーチャートを蛍光灯下で計測し、未較正カメラでは、基準カメラとは異なる照明環境として白熱電球下で計測を行った。これにより、異なる照明環境下でも分光反射率を推定できることを示す。図 4 は基準カメラ(50D)を用いて蛍光灯照明下で計測した 24 色カラーチャートである。図 5 は未較正カメラを用いて白熱電球下で計測した 24 色のカラーチャートである。図 5 は、図 4 と比較して白熱電球下での撮影であるため画像に赤みがかかっていることがわかる。この図 5 の色空間を提案手法で基準カメラの蛍光灯照明下での色空間に変換した結果を図 6 に示す。図 6 は、図 5 と比較して図 4 に色が近くなったことがわかる。

図 7 はカラーチャートの分光反射率の推定結果をグラフで示したものである。赤い実線が分光光度計で直接計測した分光反射率であり、緑色の二点鎖線が基準カメラで推定した分光反射率である。青い点線が未較正カメラで推定した分光反射率である。このグラフから未較正カメラでも基準カメラとほぼ同等の分光反射率の推定精度が得られていることがわかる。

最後に実際の物体を対象に分光反射率の推定を行った。計測の対象は赤色のアクリル塗料で塗布した猫の置物である。この猫の置物の分光反射率の推定結果を図 8 に示す。また、この推定結果を用いて 3 次元光反射モデルに与えて猫の置物を 3DCG で再現した結果を図 9 に示す。再現 CG の光反射の計算は分光ベースの光反射モデルに与え、照明環境は再現シーンを分光的に計測したものを与えている[5]。



図 2. 基準カメラとして使用した Canon EOS 50D(左)と未較正カメラとして使用した Nikon D3000(右)

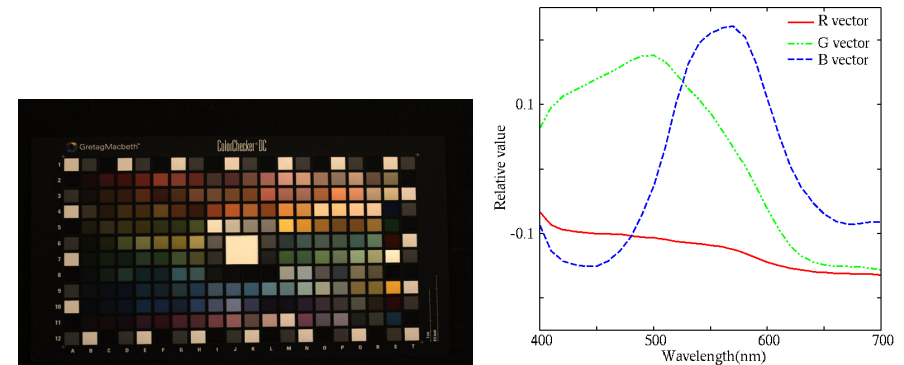


図 3. 基準カメラの較正に用いたカラーチャート(左)と分光反射率の基底関数(右)



図 4. 基準カメラで撮影（蛍光灯下）した 24 色カラーチャート

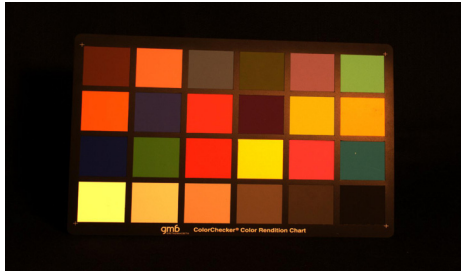


図 5. 未較正カメラで撮影(白熱電球下)した 24 色カラーチャート

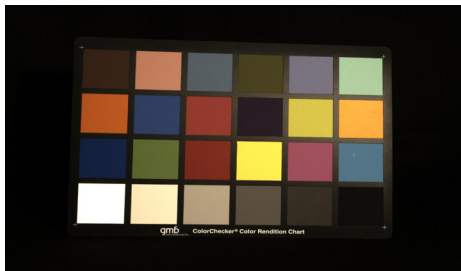


図 6. 未較正カメラで撮影した図 4 の画像を基準カメラの色空間に変換した結果画像

## 6. おわりに

本研究では、一般に市販されている未較正のデジタルカメラで簡便に物体表面の分光反射率が推定できる方法を提案した。この方法では一枚のカラーチャートを用いて未較正カメラの RGB 色空間を較正されたカメラの色空間に変換することで、未較正カメラであっても較正されたカメラのシステム変換マトリックスを利用することが可能となった。このことから任意の未較正カメラ、任意の照明環境下で撮影した画像から分光反射率の推定が可能となった。

本手法の特徴的な点は一般に使用される未較正 RGB カラーカメラを用いることにより、任意の照明環境下での分光反射率計測を簡便化できたことである。このことから分光反射率計測の自由度が大幅に向上した。

## 参考文献

- 1) 田中法博, 禹在勇, 更科友啓, 望月宏祐: 分光的な光反射計測に基づいた物体の表面反射特性推定, 日本感性工学会論文誌, Vol. 8, No. 3, pp. 943-950(2009).
- 2) 富永昌治, 田中法博: カラーカメラを用いた美術絵画の計測とレンダリング, 情報処理学会論文誌, Vol.45, No.1, pp.350-361(2004).
- 3) 横山康明, 長谷川隆行, 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一: 絵画の記録・再現を目的とした高精細カラーマネジメントシステムに関する研究(第一報)-画像入力システム的设计, 日本写真学会誌, Vol. 61, No.6, pp.343-355(1998).
- 4) 長谷川隆行, 飯野浩一, 津村徳道, 中口俊哉, 三宅洋一: メタマ推定に基づく RGB 画像からの被写体の測色値予測(第一報: 理論), 画像電子学会誌, Vol. 38, No.4, pp.365-374(2009).
- 5) 田中法博, 望月宏祐, 禹在勇: 物体表面の反射特性と分光反射モデルに基づいたリアルタイムレンダリング手法, 日本感性工学会論文誌, Vol.9, No. 2, pp.311-322(2010).
- 6) 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).
- 7) M. J. Vrhel and H. J. Trussell: Color Collection Using Principal Components, Color Res. and Appl. Vol. 17, 328(1992).

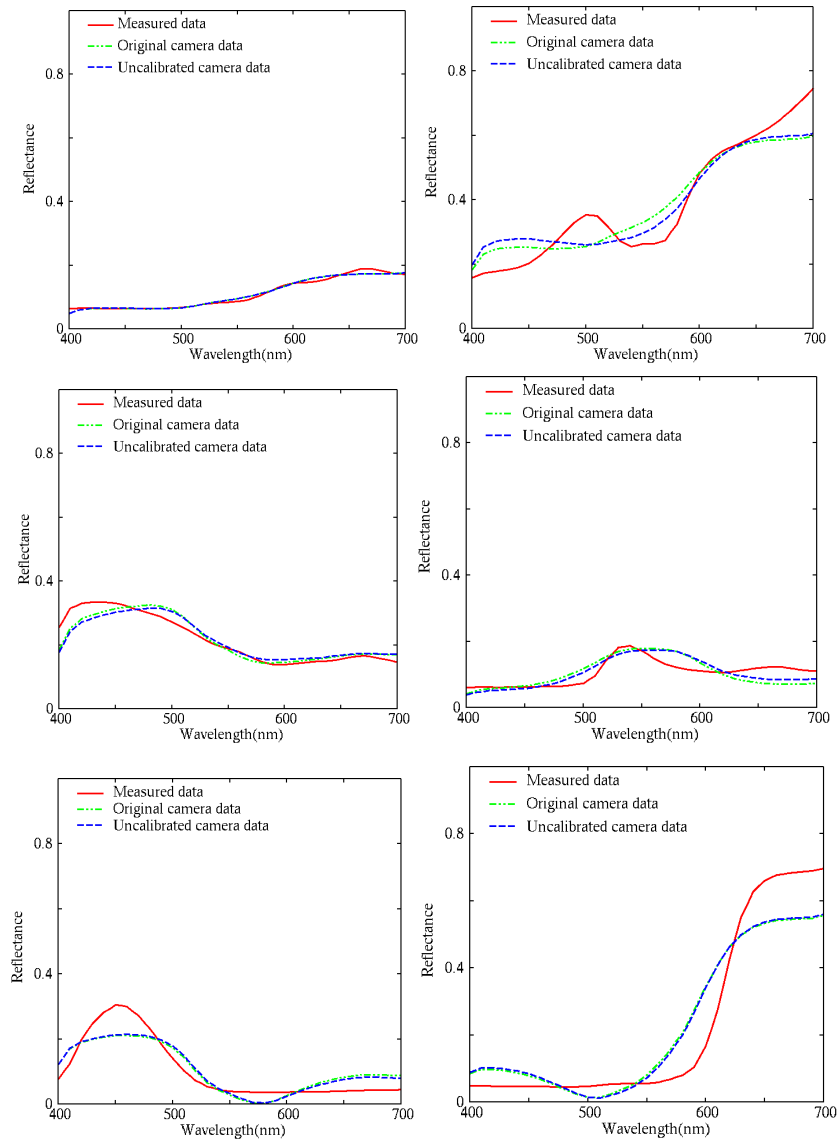


図 7. カラーチャートの分光反射率の推定結果

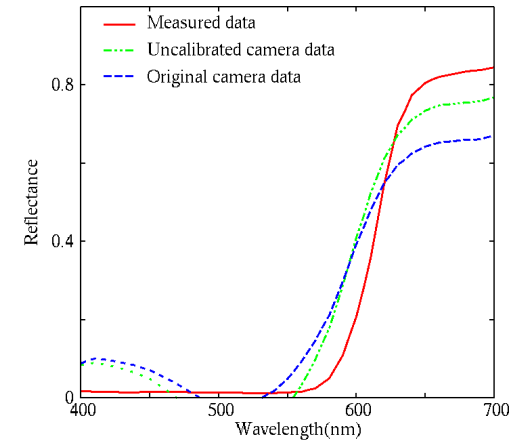


図 8. 実際の物体（猫の置物）の分光反射率の推定結果

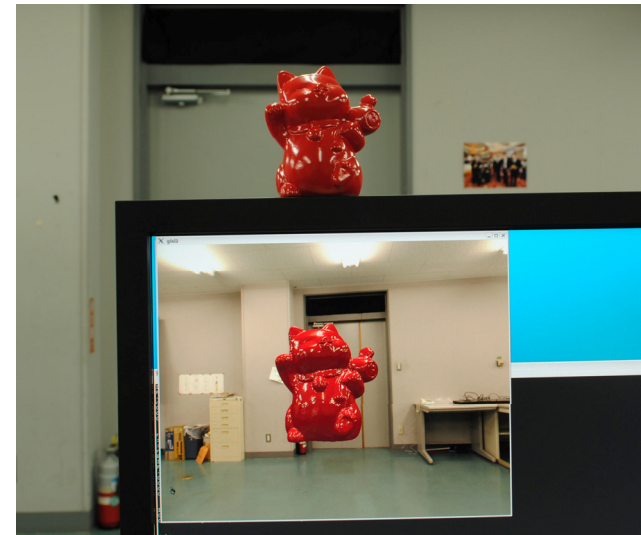


図 9. 推定した分光反射率を用いて再現した猫の置物の 3DCG と実物との比較