九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

連続性を考慮した三刺激値からの分光反射率の推定

敷田，麻衣
九州大学大学院芸術工学研究院

井上，光平
九州大学大学院芸術工学研究院

原，健二
九州大学大学院芸術工学研究院

浦濱，喜一
九州大学大学院芸術工学研究院

https://hdl.handle.net/2324/1912755

出版情報：2017-12-21
バージョン：
権利関係：http://www.ite.or.jp/content/copyright/

連続性を考慮した三刺激値からの分光反射率の推定
Continuity-Aware Estimation of Spectral Reflectance from Tristimulus Values

敷田麻依　井上光平　原　健二　浦浜喜一
Mai Shikita　Kohei Inoue　Kenji Hara　Kiichi Urahama

九州大学 大学院芸術工学研究院 コミュニケーションデザイン科学部門
Department of Communication Design Science, Faculty of Design, Kyushu University

Abstract: We propose a method for estimating spectral reflectance from tristimulus values observed. We use the fact that the real spectral reflectance is continuous. We formulate the estimation problem as a minimization of spectral reflectance difference between neighboring wavelengths, and show the analytic solution. Experimental results show that the proposed method improves the estimation accuracy compared with the previous method.

1　はじめに

物体色は光源の分光分布・物体の分光反射率・等色関数の３つの要素で決定し，三刺激値やそれに基づく色空間で表される．三刺激値から分光反射率を推定しようとする場合，次元数の違いなどの理由から現状では困難である [1]．以前我々は分光反射率の推定を制約条件付きユークリッドノルム最小化として定式化し，その解法を示した [2]．そこでは分光反射率の特性について考慮しなかったが，実際の分光反射率は連続的なものである．そこで本論文ではこの分光反射率の連続性を考慮した上で，その推定問題を考える．具体的には，波長間における分光反射率の差分の最小化として定式化し，その解法を示す．Macbeth ColorChecker [3] のデータを用いた実験を行うことで，従来手法と比較して推定精度が向上することを確認する．

2　提案手法

可視光線の波長域を等間隔に標本化した際の i 番目の波長を λ_i とする．波長 λ_i に対する物体表面の分光反射率を p_i とし，n 個の標本値を要素とするベクトルを $\boldsymbol{p} = [p_1, \ldots, p_i, \ldots, p_n]^T$ とする．物体表面の色を照明光源の下で計測した時，XYZ 値を要素とするベクトルを $\boldsymbol{x}$ とすると，$\boldsymbol{x}$ は

$$\boldsymbol{x} = E\boldsymbol{p} \tag{1}$$

と表される．ここで E は照明光源の分光分布と等色関数で定まる $3 \times n$ の行列である．本論文では，分光反射率推定問題を次のように定式化する．

$$\min_{\boldsymbol{p}} \quad \sum_{i=2}^{n}(p_i - p_{i-1})^2 \tag{2}$$

$$\text{subj.to} \qquad \boldsymbol{x} = E\boldsymbol{p} \tag{3}$$

この問題のラグランジュ関数を $\mathcal{L} = \sum_{i=2}^{n}(p_i - p_{i-1})^2 + \boldsymbol{\mu}^T(\boldsymbol{x} - E\boldsymbol{p})$ とおき（$\boldsymbol{\mu}$ はラグランジュ乗数を要素とするベクトル），$\boldsymbol{p}$ で微分すると

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \boldsymbol{p}} = 2\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & \ldots & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & \ldots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \ldots & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}\boldsymbol{p} - E^T\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{0} \tag{4}$$

となる．この $n \times n$ で構成される行列を L として，$\boldsymbol{p}$ を求めると

$$\boldsymbol{p} = \frac{1}{2}L^{-1}E^T\boldsymbol{\mu} \tag{5}$$

が得られる．これを (3) 式に代入すると，

$$\boldsymbol{x} = \frac{1}{2}EL^{-1}E^T\boldsymbol{\mu} \tag{6}$$

となる．この式から

$$\boldsymbol{\mu} = 2(EL^{-1}E^T)^{-1}\boldsymbol{x} \tag{7}$$

が得られ，これを (5) 式に代入すると，

$$\boldsymbol{p} = L^{-1}E^T(EL^{-1}E^T)^{-1}\boldsymbol{x} \tag{8}$$

が得られる．L には逆行列が存在しないため，実際に計算を行う際には L，定数 a（$0 < a < 1$），単位行列 I_n を用いた

$$L^* = (1 - a)L + aI_n \tag{9}$$

を (8) 式の L に代入し，

$$\boldsymbol{p} = L^{*-1}E^T(EL^{*-1}E^T)^{-1}\boldsymbol{x} \tag{10}$$

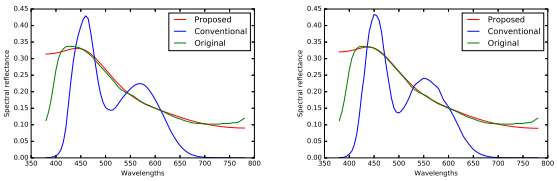
として表された式を用いる．

3　実験例

実験を行うにあたり，分光反射率が既知であるデータとして，Macbeth ColorChecker (MCC) [3] を用いた．また，等色関数と MCC の分光反射率は，Munsell Color Science

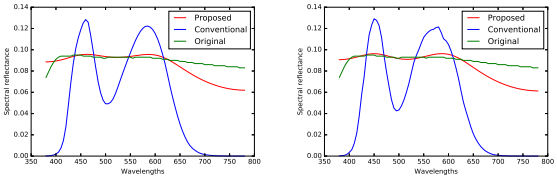
Laboratory [4] で公開されているものを使用した．分光反射率の標本数 n は，380 nm から 780 nm までの波長域を 5 nm 間隔サンプリングした $n = 81$ とした．照明光源は D65 光源と A 光源 [5] の 2 種類を用いた．また L^* を構成するにあたり，0 に限りなく近い値 a は $a = 0.0001$ とした．

以下に，文献 [2] の方法と提案手法それぞれの方法における，A 光源下での推定分光反射率曲線，D65 光源下での推定分光反射率曲線を示す．緑色の曲線は試料の分光反射率を示し，青色の曲線は従来手法による推定結果を，赤色の曲線は提案手法による推定結果を示している．Fig. 1(a) と (b) は，MCC の色番号 3 における，A 光源と D65 光源の下での推定分光反射率の結果である．同様に Fig. 1(c) と (d) は，MCC の色番号 23 における A 光源と D65 光源の下での推定結果を示している．いずれにおいても，従来手法（青色の曲線）よりも提案手法（赤色の曲線）の方が元の分光反射率（緑色の曲線）に近い分光反射率を推定していることが目視で確認できる．



(a) Color No.03 under A

(b) Color No.03 under D65



(c) Color No.23 under A

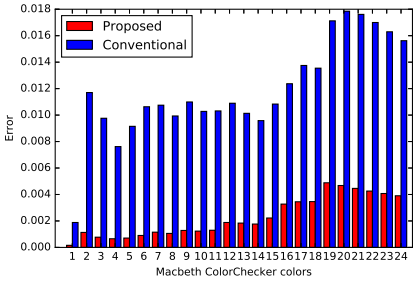
(d) Color No.23 under D65

Figure 1: Estimation of spectral reflectance

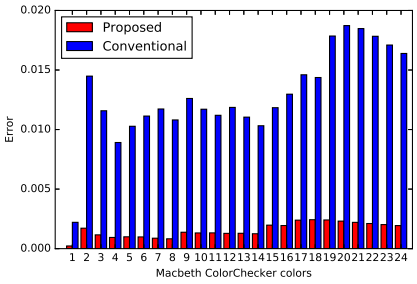
次に，誤差による定量的評価の結果を Fig. 2 に示す．真の分光反射率を p とし，推定した分光反射率を $\tilde{p}$ とすると，Fig. 2 のグラフの縦軸の値は

$$\mathrm{Error}\left(\{p\},\{\tilde{p}\}\right) = \frac{\sum_i (\tilde{p}_i - p_i)^2 (\bar{x}_i + \bar{y}_i + \bar{z}_i)}{\sum_i (\bar{x}_i + \bar{y}_i + \bar{z}_i)} \qquad (11)$$

で与えられ，横軸は MCC の色の番号を示す．ここで $\bar{x}_i$，$\bar{y}_i$，$\bar{z}_i$ は等色関数の波長 λ_i における標本値を表す．Fig. 2(a) の青色の棒は A 光源下における従来手法による推定分光反射率の誤差を示し，赤色の棒は提案手法による推定結果の誤差を示す．また同様に Fig. 2(b) は D65 光源下における従来手法，提案手法による推定分光反射率の誤差を示している．いずれの図においても従来手法（青色の棒）よりも提案手法（赤色の棒）のほうが誤差の値が小さいことから，提案手法により，推定分光反射率の精度が向上することが定量的にも確認できる．



(a) Illuminant A



(b) Illuminant D65

Figure 2: Estimation error of spectral reflectance.

4 おわりに

三刺激値からの分光反射率推定問題をその連続性を考慮するために，波長間における推定分光反射率の差分の最小化として定式化し，その解法を示した．従来手法と推定分光反射率曲線や誤差の比較を行うことで，提案手法の有効性を確認した．結果は従来手法よりも改善したが，完全に正確という訳ではなく，特に波長の両端においてはそれが顕著である．よってこの両端の波長領域において誤差を減少させることが今後の課題である．

謝辞　有益なコメントを下さった神奈川大学・齊藤隆弘教授に感謝致します．本研究は JSPS 科研費 JP16H03019 の助成を受けたものです．

参考文献

[1] S. Westland, C. Ripamonti: Computational Colour Science Using MATLAB, Wiley (2004)

[2] 敷田麻依，井上光平，原　健二，浦浜喜一: “異なる照明下の三刺激値からの分光反射率の推定”, 映像情報メディア学会年次大会, 13B-4 (2017)

[3] ColorChecker, Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/ColorChecker

[4] Munsell Color Science Laboratory. http://www.cis.rit.edu/research/mcsl2/online/cie.php

[5] E. Reinhard, E. A. Khan, A. O. Akyuz, G. Johnson: Color Imaging: Fundamentals and Applications, A K Peters/CRC Press (2008)

九州大学 大学院芸術工学研究院
〒*815–8540* 福岡市南区塩原 *4-9-1*　*TEL. 092-553-4512*
E-mail: m.shikita.050@s.design.kyushu-u.ac.jp