

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, 麻依
九州大学大学院芸術工学府

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

浦浜, 喜一
九州大学大学院芸術工学研究院

<https://hdl.handle.net/2324/1961348>

出版情報：映像情報メディア学会誌. 72 (8), pp. J105-J108, 2018-07-25. 映像情報メディア学会
バージョン：
権利関係：著作権は映像情報メディア学会に帰属しています。利用は著作権の範囲内に限られます。



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[†], 正会員 井上 光平[†], 原 健二[†], 浦浜 喜一[†]

Mai Shikita[†], Kohei Inoue[†], Kenji Hara[†] and Kiichi Urahama[†]

あらまし 観測した三刺激値から分光反射率を推定する方法を提案する。そこでは実際の分光反射率は連続的であるということを利用する。推定問題を波長間における分光反射率の差分の2乗和の最小化として定式化し、その解法を示す。従来の方法と比較して推定精度が向上したことを実験結果によって示す。

キーワード：分光反射率，三刺激値，XYZ 値

1. ま え が き

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。その結果、光源が異なれば同じ物体でも異なった色として認識されてしまう場合がある。こうした背景から、画像認識の現場において「色」という要素は使いづらいという課題がある。分光反射率は物体固有の波長ごとにおける光の反射の程度を示すパラメータであり、物体色そのものの性質とも言える。そこで三刺激値から分光反射率の推定を可能にする事で、画像認識の領域において「色」を特徴量として使いやすくなることが考えられる。しかし三刺激値からの分光反射率の推定は、次元数の違いなどの理由から現状では困難である¹⁾。具体的には三刺激値の次元が3であることに對し、分光分布の次元は標本化しただけの数がある点が計算する上での問題となる。

これに対して様々な方法が今までにも提案されている。Amiri と Amirshahi は分光反射率を補間する空間の次元数を6から3に段階的に減らす方法を提案した²⁾。また Wu らは学習データから分光反射率の復元に適したデータを選択する方法を提案した³⁾。しかし、これらの方法はいずれも学習データとして分光反射率と三刺激値が既知である色データが必要となる。そこで以前我々はこの学習データが不要な三刺激値からの分光反射率の推定方法として、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⁴⁾。年次大会での提案手法はこの手法を複数の照明光源に拡張したものである⁵⁾。その手法による色の再現結果は比較的良好ではあったものの、推定分光反射率自体の誤

差は大きいという結果となっていた。

通常の物体では、隣接する波長の反射率の相関が高いことが知られている⁶⁾。そこで本論文ではこの実際の分光反射率は連続的なものであるという特性を考慮した上で、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2乗和の最小化として定式化し、その解法を示す。Macbeth ColorChecker⁷⁾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

等色関数を $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ 、光源の分光分布を $\bar{s}(\lambda)$ とすると (λ は波長を表す)、物体表面の分光反射率 $\bar{p}(\lambda)$ の XYZ 値 (三刺激値) は次式で与えられる。

$$\bar{X} = \bar{k} \int \bar{s}(\lambda) \bar{p}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$\bar{Y} = \bar{k} \int \bar{s}(\lambda) \bar{p}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$\bar{Z} = \bar{k} \int \bar{s}(\lambda) \bar{p}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

この時、 $\bar{k} = c / \int \bar{s}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$ である。また c は定数 (通常は $c = 100$) である。 λ の値を $\Delta\lambda$ 間隔で標本化すると、(1)-(3) 式は

$$X = c \frac{\sum_{i=1}^n s_i p_i x_i \Delta\lambda}{\sum_{i=1}^n s_i y_i \Delta\lambda} = c \frac{\sum_{i=1}^n s_i p_i x_i}{\sum_{i=1}^n s_i y_i} \quad (4)$$

$$Y = c \frac{\sum_{i=1}^n s_i p_i y_i \Delta\lambda}{\sum_{i=1}^n s_i y_i \Delta\lambda} = c \frac{\sum_{i=1}^n s_i p_i y_i}{\sum_{i=1}^n s_i y_i} \quad (5)$$

$$Z = c \frac{\sum_{i=1}^n s_i p_i z_i \Delta\lambda}{\sum_{i=1}^n s_i y_i \Delta\lambda} = c \frac{\sum_{i=1}^n s_i p_i z_i}{\sum_{i=1}^n s_i y_i} \quad (6)$$

となる。ここで s_i は $\bar{s}(\lambda)$ の i 番目の標本値を、 n は標本の大きさを表す。 p_i, x_i, y_i, z_i についても同様であるとする。

X, Y, Z の 3 つの要素をひとつのベクトルとしてまとめるために, $E = [\tilde{c}s_i x_i, \tilde{c}s_i y_i, \tilde{c}s_i z_i]^T, \tilde{c} = c / \sum_i s_i y_i$ とおく. また分光反射率を p_i に対して, n 個の標本値を要素とするベクトルを $\mathbf{p} = [p_1, \dots, p_i, \dots, p_n]^T$ 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 $\mathbf{x} = [X, Y, Z]^T$ とすると, \mathbf{x} は

$$\mathbf{x} = E\mathbf{p} \quad (7)$$

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.

$$\min_{\mathbf{p}} \sum_{i=2}^n (p_i - p_{i-1})^2 \quad (8)$$

$$\text{subj.to } \mathbf{x} = E\mathbf{p} \quad (9)$$

この問題のラグランジュ関数を $\mathcal{L} = \sum_{i=2}^n (p_i - p_{i-1})^2 + \boldsymbol{\mu}^T (\mathbf{x} - E\mathbf{p})$ とおき ($\boldsymbol{\mu}$ はラグランジュ乗数を要素とするベクトル), \mathbf{p} で微分したものを $\mathbf{0}$ とおくと

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{p}} = 2 \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{p} - E^T \boldsymbol{\mu} = \mathbf{0} \quad (10)$$

となる. この式の中の $n \times n$ 行列を L とおいて, \mathbf{p} について解くと

$$\mathbf{p} = \frac{1}{2} L^{-1} E^T \boldsymbol{\mu} \quad (11)$$

が得られる. これを (9) 式に代入すると,

$$\mathbf{x} = \frac{1}{2} E L^{-1} E^T \boldsymbol{\mu} \quad (12)$$

となる. この式から

$$\boldsymbol{\mu} = 2(EL^{-1}E^T)^{-1} \mathbf{x} \quad (13)$$

が得られ, これを (11) 式に代入すると,

$$\mathbf{p} = L^{-1} E^T (EL^{-1}E^T)^{-1} \mathbf{x} \quad (14)$$

が得られる. L は正則ではないため, 逆行列 L^{-1} は存在しない. そこで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

$$L^* = (1 - a)L + aI_n \quad (15)$$

を (14) 式の L に代入し,

$$\mathbf{p} = L^{*-1} E^T (EL^{*-1}E^T)^{-1} \mathbf{x} \quad (16)$$

として表された式を用いる.

以上により, 三刺激値とある照明の分光分布のデータのみで物体の分光反射率の推定が可能になる.

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)⁷⁾ を用いた. D65 光源, A 光源⁹⁾ 下での MCC の色をそれぞれ図 1(a),(b) に示す. 等色関数と MCC の分光反射率は, Munsell Color Science Laboratory⁸⁾ で公開されているものを使用した. この等色関数は CIE XYZ 等色関数 (1931)⁸⁾ である.

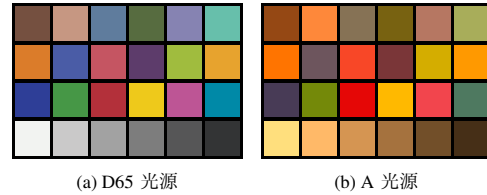


図 1: Macbeth ColorChecker (MCC) Colors

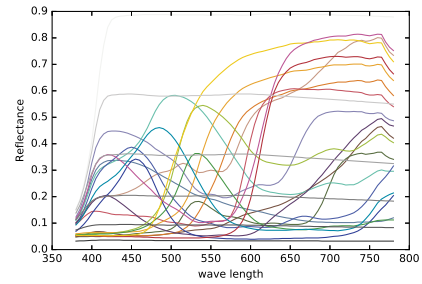
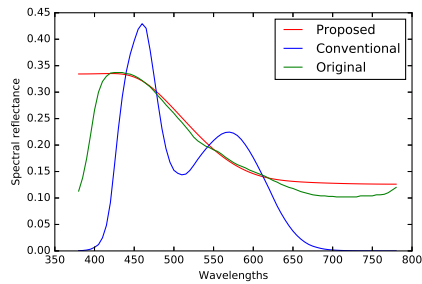


図 2: Spectral reflectance of MCC

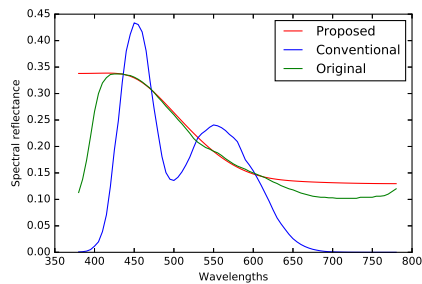
分光反射率の標本数 n は, 380 nm から 780 nm までの波長域を 5 nm 間隔サンプリングした $n = 81$ とした. 標本間隔を 5nm に今回設定した理由は 2 つある. 一つは本実験を行うにあたり必要なデータである分光反射率や等色関数, 光源の分光分布のデータを集める上で, 5 nm 間隔以外では全てのデータを収集することが難しいからである. そしてもう一つは, 標本の大きさを増やすと計算量が増えるからである. 照明光源の分光分布として, D65 光源と A 光源⁹⁾ の 2 種類を用いた. また L^* を構成するにあたり, a は $a = 0.0001$ とした.

図 3 に文献⁵⁾ の方法と提案手法それぞれの方法における, A 光源と D65 光源の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⁴⁾ 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. 図 3(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. 同様に図 3(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

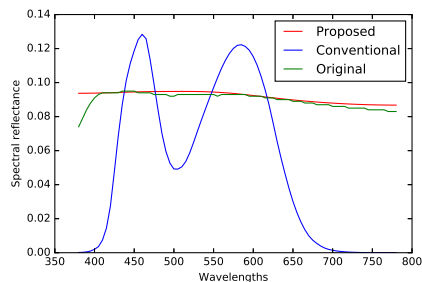
ずれにおいても、従来手法（青色の曲線）よりも提案手法（赤色の曲線）の方が元の分光反射率（緑色の曲線）に近い分光反射率を推定していることが目視で確認できる。



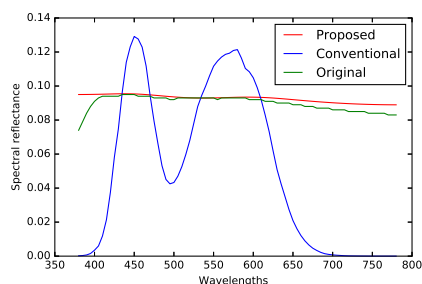
(a) A 光源下での色番号 03



(b) D65 光源下での色番号 03



(c) A 光源下での色番号 23



(d) D65 光源下での色番号 23

図 3: 分光反射率の推定結果

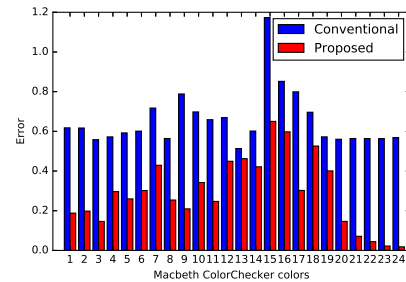
次に、誤差による定量的評価の結果を図 4 に示す。真の分光反射率を p とし、推定した分光反射率を \hat{p} とすると、図 4 のグラフの縦軸の値は

$$\text{Error}(\{p\}, \{\hat{p}\}) = \frac{\sum_i (|\hat{p}_i - p_i| / p_i)}{n} \quad (17)$$

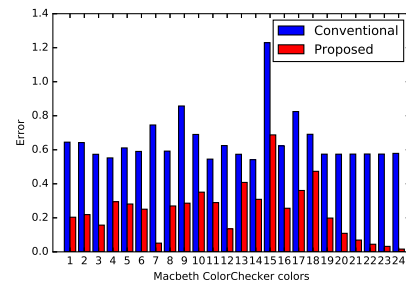
で与えられ、横軸は MCC の色の番号を示す。図 4(a) の青色の棒は A 光源下における従来手法による推定分光反射率

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。また同様に図 4(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。

なお L^* を算出するための補正值である a の値は $a = 0.0001$ より大きい場合はその誤差は大きくなるが、小さい場合は誤差の値に変化は確認できなかった。



(a) A 光源



(b) D65 光源

図 4: 推定分光反射率の誤差

4. む す び

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 2 乗和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れた神奈川大学・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。

〔文 献〕

- 1) S. Westland, C. Ripamonti: Computational Colour Science Using MATLAB, Wiley (2004)
- 2) M. M. Amiri, S. H. Amirshahi: "A step by step recovery of spectral data from colorimetric information", Journal of Optics, **44**, 4, pp. 373–383 (2015)

- 3) G. Wu, X. Shen, Z. Liu, S. Yang, M. Zhu: "Reflectance spectra recovery from tristimulus values by extraction of color feature match", Opt Quant Electron, **48**, 64 (2016)
- 4) 井上光平, 張子シュ, 原 健二, 浦浜喜一: "三刺激値の 2 乗誤差最小化による分光反射率の推定", 映像情報メディア学会誌, **71**, 9, pp.J214-J217 (2017)
- 5) 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)
- 6) 田島譲二, 犬井正男, 東 吉彦: "色再現評価用標準物体色分光データベース (SOCS) の開発", 日本写真学会誌, **62**, pp.126-135 (1999)
- 7) ColorChecker, Wikipedia.
<https://en.wikipedia.org/wiki/ColorChecker>
- 8) Munsell Color Science Laboratory.
<http://www.cis.rit.edu/research/mcsl2/online/cie.php>
- 9) E. Reinhard, E. A. Khan, A. O. Akyuz, G. Johnson: Color Imaging: Fundamentals and Applications, A K Peters/CRC Press (2008)



敷田 麻依 (しきた まい) 2017 年, 九州大学芸術工学部画像設計学科卒業。現在, 同大学大学院コミュニケーションデザイン科学コースに所属。画像処理, 色彩科学に関する研究に従事。



井上 光平 (いのうえ こうへい) 1996 年, 九州芸術工科大学画像設計学科卒業。2000 年, 同大学大学院博士後期課程修了。同年, 九州芸術工科大学助手。2003 年, 九州大学助教。現在, 同大学准教授。パターン認識, 画像処理, コンピュータビジョンに関する研究に従事。正会員。



原 健二 (はら けんじ) 1989 年, 京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年, 武田薬品工業(株)入社。1991 年, 福岡工業技術センター入所。2001 年, 東京大学生産技術研究所協力研究員。現在, 九州大学大学院芸術工学研究院准教授。博士(工学)。コンピュータビジョン, 画像処理に関する研究に従事。



浦浜 喜一 (うらはま きいち) 1980 年, 九州大学大学院工学研究科博士後期過程修了。同年, 同大学助手。1989 年, 九州工業大学助教授。現在, 九州大学大学院芸術工学研究院教授。パターン認識, 画像情報処理に関する研究に従事。