

異なる照明下の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

浦浜, 喜一
九州大学大学院芸術工学研究院

<https://hdl.handle.net/2324/1929655>

出版情報：映像情報メディア学会誌. 72 (5), pp. J86-J88, 2018-04-25. 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。

論文

異なる照明下の三刺激値からの分光反射率の推定

Estimating Reflectance Spectra from Tristimulus Values under Different Illuminations

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 異なる照明の下で得られた複数の三刺激値から対象の分光反射率を推定する方法を提案する。分光反射率推定問題を制約条件付きユークリッドノルム最小化問題として定式化し、その解析的な解法を示す。従来手法と比較して、推定精度が向上することを実験で確認する。

キーワード：分光反射率，三刺激値，XYZ 値，照明条件

1. ま え が き

物体表面の色は三刺激値に基づく色空間で表されるが、三刺激値から物体表面の分光反射率を計算することは困難な問題である¹⁾。これまでにニューラルネットを用いた方法²⁾、主成分分析に基づく方法³⁾、分光反射率を補間する空間の次元数を段階的に減らしていく方法⁴⁾、学習データの中から分光反射率復元に適したデータを選択する方法⁵⁾、分光反射率の非負性に基づく方法⁶⁾、スパース Neugebauer モデルに基づく方法⁷⁾⁸⁾などが提案されているが、これらは学習データとして分光反射率と三刺激値が既知の色データを必要とする。そこで筆者らは学習データを必要としない方法として、三刺激値の2乗誤差最小化による方法を提案した⁹⁾。

本論文では、一つの対象を異なる照明の下で観測して得られる複数の三刺激値から対象の分光反射率を推定する方法を提案する。分光反射率推定問題を制約条件付きユークリッドノルム最小化問題として定式化し、その解析的な解法を示す。従来手法⁹⁾と比較して、推定精度が向上することを実験で確認する。

2. 提 案 手 法

可視光線の波長域を等間隔に標本化し、その 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 $\mathbf{p} = [p_1, \dots, p_i, \dots, p_n]^T$ とする。その物体表面の色を K 種類の照明光源の下で計測する。第 k 照明光源の相対分光分布の波長 λ_i における標本値を s_{ki} とし、XYZ 値に対応する

3種の等色関数の標本値をそれぞれ x_i, y_i, z_i とすると、この照明下での \mathbf{p} の XYZ 値は

$$X_k = \sum_{i=1}^n \frac{c s_{ki} x_i}{\sum_{i'=1}^n s_{ki'} y_{i'}} p_i = \sum_{i=1}^n E_{ki}^X p_i \quad (1)$$

$$Y_k = \sum_{i=1}^n \frac{c s_{ki} y_i}{\sum_{i'=1}^n s_{ki'} y_{i'}} p_i = \sum_{i=1}^n E_{ki}^Y p_i \quad (2)$$

$$Z_k = \sum_{i=1}^n \frac{c s_{ki} z_i}{\sum_{i'=1}^n s_{ki'} y_{i'}} p_i = \sum_{i=1}^n E_{ki}^Z p_i \quad (3)$$

で与えられる。ここで $c = 100$ である。 X_k, Y_k, Z_k を要素とするベクトルを \mathbf{x}_k とすると、 \mathbf{x}_k は

$$\mathbf{x}_k = E_k \mathbf{p} \quad (k = 1, \dots, K) \quad (4)$$

と表せる。ここで E_k は

$$E_k = \begin{bmatrix} E_{k1}^X & \dots & E_{kn}^X \\ E_{k1}^Y & \dots & E_{kn}^Y \\ E_{k1}^Z & \dots & E_{kn}^Z \end{bmatrix} \quad (5)$$

で与えられる $3 \times n$ 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。

$$\min_{\mathbf{p}} \|\mathbf{p}\|^2 \quad (6)$$

$$\text{subj.to } \mathbf{x}_k = E_k \mathbf{p} \quad (k = 1, \dots, K) \quad (7)$$

ここで $\|\cdot\|$ はユークリッドノルムを表す。この問題のラグランジュ関数を $\mathcal{L} = \|\mathbf{p}\|^2 + \sum_{k=1}^K \boldsymbol{\mu}_k^T (\mathbf{x}_k - E_k \mathbf{p})$ とおくと (ここで $\boldsymbol{\mu}_k$ はラグランジュ乗数を要素とするベクトルである), $\partial \mathcal{L} / \partial \mathbf{p} = 2\mathbf{p} - \sum_{k=1}^K E_k^T \boldsymbol{\mu}_k = \mathbf{0}$ より、

$$\mathbf{p} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K E_k^T \boldsymbol{\mu}_k = \frac{1}{2} [E_1^T \ \dots \ E_K^T] \begin{bmatrix} \boldsymbol{\mu}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{\mu}_K \end{bmatrix} \quad (8)$$

2017年10月20日受付, 2018年3月23日採録

[†]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)

が得られる。これを (7) 式に代入すると、

$$\mathbf{x}_k = \frac{1}{2} E_k \sum_{k'=1}^K E_{k'}^T \boldsymbol{\mu}_{k'} \quad (k = 1, \dots, K) \quad (9)$$

となり、これらは一つの式にまとめて

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_K \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_K \end{bmatrix} [E_1^T \ \dots \ E_K^T] \begin{bmatrix} \boldsymbol{\mu}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{\mu}_K \end{bmatrix} \quad (10)$$

と書ける。この式から

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\mu}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{\mu}_K \end{bmatrix} = 2 \left(\begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_K \end{bmatrix} [E_1^T \ \dots \ E_K^T] \right)^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_K \end{bmatrix} \quad (11)$$

が得られ、これを (8) に代入すると、

$$\mathbf{p} = [E_1^T \ \dots \ E_K^T] \left(\begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_K \end{bmatrix} [E_1^T \ \dots \ E_K^T] \right)^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_K \end{bmatrix} \quad (12)$$

が得られる。この式に K 種類の照明下で取得した三刺激値 $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_K$ を代入すると分光反射率 \mathbf{p} が求まる。

3. 実験例

分光反射率のわかっている色のデータとして、Macbeth ColorChecker (MCC)¹⁰⁾ を用いて実験した。等色関数と MCC の分光反射率は、Munsell Color Science Laboratory¹²⁾ で公開されているものを用いた。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て $n = 81$ とした。

まず、照明光源の数 K を 2 として D65 光源と A 光源¹¹⁾ を用いた実験例を示す。D65 光源と A 光源の下での MCC の真の色を、それぞれ図 1(a) と (b) に示す。図 1(c) と (d) はそれぞれ、文献⁹⁾ の方法を用いて、A 光源下で推定した分光反射率から D65 光源下での色を再現した結果と、D65 光源下で推定した分光反射率から A 光源下での色を再現した結果である。それに対して、図 1(e) と (f) は、2 種類の照明光源 D65 と A を用いて提案手法によって推定した分光反射率から、それぞれ D65 光源と A 光源の下で色を再現した結果である。図 1(e)-(f) は、図 1(c)-(d) よりも図 1(a)-(b) に近いことが目視で確認できる。

次に、平均絶対誤差 (Mean Absolute Error: MAE) による定量的評価の結果を図 2 に示す。真の色の RGB 値を r, g, b とし、推定した分光反射率から再現した色の RGB 値を $\tilde{r}, \tilde{g}, \tilde{b}$ とすると、図 2 のグラフの縦軸の値は



図 1: Macbeth ColorChecker (MCC).

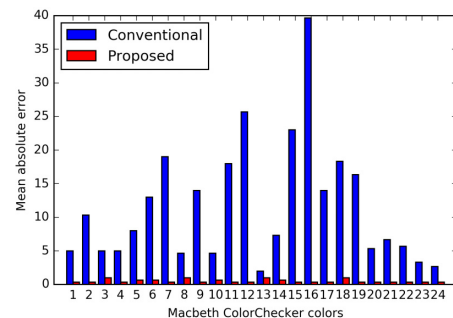
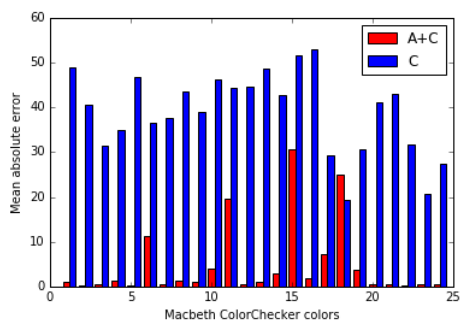


図 2: D65 光源下での平均絶対誤差

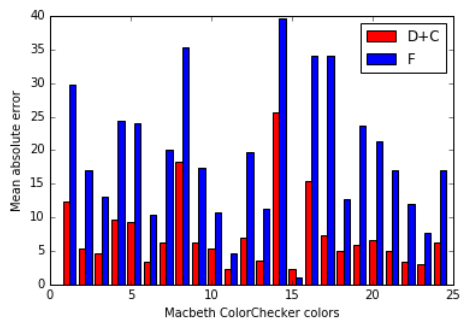
$$\text{MAE} \left(\{r, g, b\}, \{\tilde{r}, \tilde{g}, \tilde{b}\} \right) = \frac{|r - \tilde{r}| + |g - \tilde{g}| + |b - \tilde{b}|}{3} \quad (13)$$

で与えられ、横軸は MCC の色の番号を示す。図 2 の青色の棒は図 1(c) の色の MAE を示し、赤色の棒は図 1(e) の MAE を示す。また、図 1(d) と (f) の色の MAE についても同様のグラフが得られた。従来手法 (青色の棒) よりも提案手法 (赤色の棒) のほうが MAE が小さいことから、提案手法によって色の再現性が向上することを定量的にも確認できる。

分光反射率の推定に用いた光源と異なる光源で色再現したときの MAE を図 3 に示す。図 3(a) は D65 光源下での色再現の結果であり、青色の棒は文献⁹⁾ の方法による C 光源下での推定を表し、赤色の棒は提案手法による A 光源と C 光源の下での推定を表す。図 3(b) は A 光源下での色再現の結果であり、青色の棒は文献⁹⁾ の方法による F 光源下



(a) D65 光源下での誤差



(b) A 光源下での誤差

図 3: 平均絶対誤差 (2 光源)

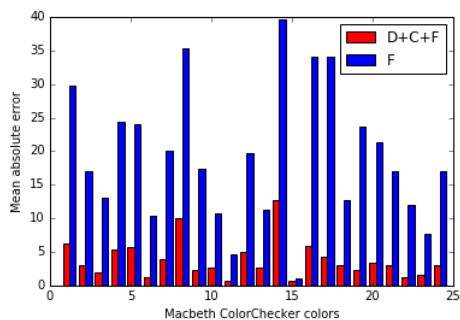


図 4: 平均絶対誤差 (3 光源)

での推定を表し、赤色の棒は提案手法による D65 光源と C 光源の下での推定を表す。どちらも提案手法によって低い MAE 値が得られた。

最後に光源の数を 3 に増やしたときの MAE を図 4 に示す。青色の棒は図 3(b) のそれと同じであり、赤色の棒は提案手法による D65, C, F 光源の下での推定を表す。赤色棒が全体的に図 3(b) よりも短くなっており、光源数を増やすことによって MAE 値が下がることが確認された。

4. む す び

複数の照明光源の下で得られた三刺激値から分光反射率を推定する問題を、制約条件付きユークリッドノルム最小化問題として定式化し、その解析的解法を示した。実験では、照明光源の数が 2 と 3 の場合について、提案手法の有効性を確認した。照明光源の数を更に増やした場合につい

ての検証と、照明光源の組み合わせ方と推定精度の関係についての調査が今後の課題である。

謝辞 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) G. Sharma, S. Wang: “Spectrum recovery from colorimetric data for color reproductions”, Proc. SPIE, **4663**, pp. 8–14 (2002)
- 3) T. Harifi, S. H. Amirshahi, F. Agahian: “Recovery of reflectance spectra from colorimetric data using principal component analysis embedded regression technique”, Optical Review, **15**, 6, pp. 302–308 (2008)
- 4) 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)
- 5) 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)
- 6) K. Inoue, K. Hara, K. Urahama: “Reflectance Spectra Recovery with Non-negativity Constraints,” Proc. ISPACS (2016) DOI: 10.1109/ISPACS.2016.7824687
- 7) 井上光平, 原 健二, 浦浜喜一: “スパース Neugebauer モデルに基づく分光反射率の推定”, 第 31 回信号処理シンポジウム, A2-1, pp. 23–28 (2016)
- 8) K. Inoue, K. Hara, K. Urahama: “Spectral Reflectance Estimation and Color Reproduction Based on Sparse Neugebauer Model”, Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, **2**, 3, pp. 958–966 (2017)
- 9) 井上光平, 張子シユ, 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”, 映像学誌, **71**, 9, pp. J214–J217 (2017)
- 10) ColorChecker, Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/ColorChecker>
- 11) E. Reinhard, E. A. Khan, A. O. Akyuz, G. Johnson: Color Imaging: Fundamentals and Applications, A K Peters/CRC Press (2008)
- 12) Munsell Color Science Laboratory. <http://www.cis.rit.edu/research/mcs12/online/cie.php>



敷田 麻依 2017 年, 九州大学芸術工学部画像設計学科卒業。現在, 九州大学大学院修士課程在籍中。画像処理, コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。



井上 光平 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 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, 福岡県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科准教授。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 1980 年, 九州大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年, 同大学助手。1989 年, 九州工業大学助教。現在, 九州大学大学院芸術工学研究科教授。パターン認識, 画像情報処理の研究に従事。