

色空間の局所等長写像の新しい推定法を用いた異なる観察者間の色感覚の比較と変換 Comparison and Transformation of Color Perceptions between Different Observers Using a New Estimation Method for Local Isometric Mapping of Color Spaces

小林 知世[†] 神山 諒[†] 趙 晋輝[†]
Tomoyo Kobayashi Ryo kamiyama Jinhui Chao

1 序論

色彩表現による情報の表示は、異なる観察者間の色の見え方の違いなど色覚特性の差異のために正確に情報が伝わらないことがある。色覚の多様性に配慮して、より多くの人に利用しやすい製品や環境、サービス、情報を提供するカラーユニバーサルデザインを実現するには、異なる観察者間の色覚特性を互いに比較して変換できることが望ましい。

従来の研究では、人間の色知覚特性を客観的に観測可能にする色弁別閾値楕円を推定し、異なる観察者間の楕円をマッチングする局所等長写像を求める方式 [1] が知られている。しかし、この方式は非線形方程式の求解であるため、一意に解を定めるためには、等長変換の形に制限が必要であった。本研究では、色弁別閾値のみを利用した新しい局所等長写像の推定法を用いて、異なる観察者間の画像に対して等長変換を行うことで、それぞれの色の見え方の違いについて可視化し、互いに比較と変換することを可能にした。

2 従来研究

リーマン空間である色空間の間で、距離の対応を保つ変換のことを等長変換と呼ぶ。小色差、大色差を保ちながら色彩情報を変換する写像は、それぞれ大域等長写像と局所等長写像と呼ばれ、また互いに同値であることも知られている。これらの写像はそれぞれ [1, 2] に用いられた。特に色空間上の小色差を保つ変換は、局所等長変換と呼ばれる。本文では局所等長写像のみを扱う。

色空間 C_1 のリーマン計量を $G_1(x)$ 、色空間 C_2 のリーマン計量を $G_2(y)$ とする。 C_1 から C_2 への写像 f が任意の $x \in C_1, y = f(x) \in C_2$ において、以下の条件を満たすとき、即ち x における色弁別閾値楕円 (面) を y における色弁別閾値楕円 (面) へ移すとき、 f を局所等長写像という。

$$G_1(x) = (M_f)^T G_2(y) M_f \quad (1)$$

ただし M_f は f のヤコビ行列である。文献 [1] では、観察者 1 と 2 の色空間 C_1, C_2 において、選定された基準点において、色弁別閾値楕円が測定されたとして、それを定義する計量 $G_1(x), G_2(y)$ を用いて、上記方程式を解くことで、局所等長写像 M_f を求めた。しかし、上記方程式のみでは M_f が一意に定まらず、そのため、 M_f を回転行列と対角行列の積という形に仮定して推定を行った。

3 局所等長写像の新しい推定法

本研究では、心理物理空間に対する [3] の方法を色空間に適用して、リーマン計量すなわち色弁別閾値楕円面を仮定とせず、色弁別閾値のデータのみを利用する局所等長写像を推定する。

[†] 中央大学大学院理工学研究科情報工学専攻

Dept. of Information and System Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Chuo University

ここでは Alice と Bob の二人を被験者とする。色空間におけるある基準点 c に対して、両被験者の色弁別閾値を測定し、それぞれの色弁別閾値を $t_i, t'_i (i = 1, \dots, N)$ とする。そのとき、Alice と Bob のデータ行列 ($3 \times N$) を以下のように定義する。

$$T_A := (t_1 - c, t_2 - c, \dots, t_N - c) \quad (2)$$

$$T_B := (t'_1 - c, t'_2 - c, \dots, t'_N - c) \quad (3)$$

これは基準点 c から色弁別閾値 t_i, t'_i までの距離を表している。これらの距離を保存しながら相互に変換する行列、すなわち局所等長写像 M を

$$T_B = M T_A \quad (4)$$

のように定義できる。ここで、 N は十分大きいとしたとき、 M を求めるために一般逆行列などを使用して、

$$M = T_B T_A^T (T_A T_A^T)^{-1} \quad (5)$$

のように求めることができる。これにより、二次方程式を用いることなく、線形代数の計算のみで局所等長写像を一意に推定することができる。さらにここでは、 M の形には制限がない。

色空間内に選定されたすべての基準点 $\{c_i\}$ においては、色弁別閾値が測定され、それに基づき上記の通り各点の局所等長写像が求められる。

4 色空間全体における局所等長変換の計算法

色空間内に各基準点における局所等長変換によって、色空間全体にわたる等長変換が得られるが、具体的に画像の各画素に対する等長変換は、以下の二通りの画素の変換方法が挙げられる。

4.1 画素の変換方法 1

各画素に対して色弁別閾値測定の際に使用した基準色の中で、3次元色空間の中で一番近い基準色に対応する局所等長写像を求め、入力画素に変換を行う方法である。入力画素値を x 、一番近い基準色の Luv 値を c 、変換後の出力画素値を y とすると、以下のように求められる。

$$y = M(x - c) + c \quad (6)$$

4.2 画素の変換方法 2

上記手法は、最近基準色が、不連続に変化することがあるため、基準色が張る単体を考えて、入力画素が入る単体の頂点となる基準色における局所等長変換の凸結合で補正行列を決めれば、より滑らかな色変換が可能となる。

具体的に、色空間において、基準色 $\{c_i\}$ の中で入力画素 x を含む単体を探索し、単体の頂点となる基準色 $c_i (i = 1 \dots 4)$ を求める。また、この単体における x の凸座標 $a_i (i = 1 \dots 4)$ $a_i \geq 0, \sum_i a_i = 1, x = \sum_{i=1}^4 a_i c_i$ を求める。そ

ここで、 c_i における局所等長変換を M_i とすると、 M_i による補正 y_i の凸結合によって、出力画素 y は以下の式によって計算する。

$$y = \sum_{i=1}^4 a_i y_i = x + \sum_{i=1}^4 a_i M_i(x - c_i) \quad (7)$$

方法 1 に比べて、方法 2 は入力画素の最近基準点のみならず、その近傍の基準点も同時に考慮しており、 x の変化に連続的に対応できる等長変換を用いるため、より滑らかな画素変換が可能となる。以下では方法 2 を用いる。

5 実験

本研究では、[2] にて使用された方法を用いて色弁別閾値の測定を行った。具体的に、測定色は、CIELUV 空間内で、5 段階の明度で固定され、それぞれ格子状に並ぶように設定している。観察者は、 10° 視野に基づいた環境下で、色の変化を感じる境目に刺激値を調整する。実験に用いた椅子、机は実生活においてディスプレイを使用する環境を基準として設定し、実験室内は灰色のカーテンで覆われている。また、実験において被験者の疲労の問題を考慮し、1 回の測定は最長でも 90 分間とし、次の測定まで 1 日以上の間隔をあけて行う。

図 1, 2 には、[2] で測定された色弁別閾値から推定した色弁別閾値楕円体が表示されている。両者の閾値楕円体とも色毎に大きさと傾きが様々であり、色度方向と明度方向ともに小色差感覚が複雑であることがわかる。また、D 型色弱者の閾値楕円体の体積は一般色覚者に比べて、各明度で同等または大きくなっており、小色差の変化が判別しにくくなっていることが推測される。

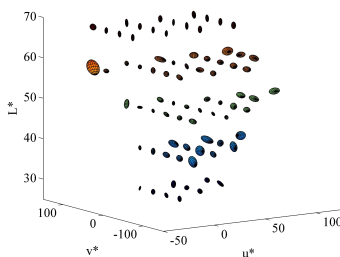


図 1 一般色覚者の色弁別閾値楕円体

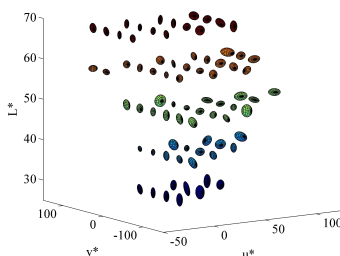


図 2 D 型色弱者の色弁別閾値楕円体

上記測定閾値データに基づき、提案手法によって得られた色空間全体にわたる等長変換を求めた。図 3 から図 5 は、印象派絵画「Flood at Port-Marly」とそれに対して等長変換を施した結果、得られた元画像と色弱シミュレーション画像と色弱補正画像を示している。



図 3 元画像



図 4 色弱補正

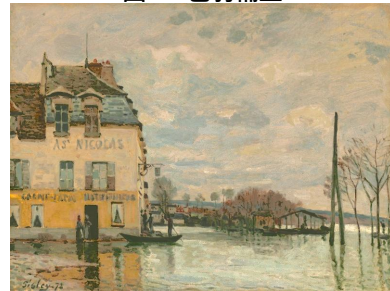


図 5 色弱シミュレーション

色弱補正画像では緑が強調されており、色弱シミュレーション画像では赤が強調されていることがわかる。D 型色弱は緑色を感じる「M 錐体」が正常に機能しないことが特徴とされているため、局所等長写像による色感覚の変換、比較が可能であることが確認できた。

6 結論

本研究では、色空間の局所等長写像の新しい推定法を用いた異なる観察者間の色感覚の比較と変換を行った。本手法では、色弁別閾値楕円面を必要とせず、線型方程式の求解により局所等長写像を一般的な形で一意に定めることが可能である。今後、被験者数と測定データを増やして、主観的印象も含めた色弱補正方式についても検討する予定である。

参考文献

- [1] R. Mochizuki, T. Kojima, R. Lenz and J. Chao "Color-weak compensation using local affine isometry based on discrimination threshold matching" JOSA A, Optics, Image Science and Vision Vol. 32, No. 11, pp.2093-2103, November 2015
- [2] S. Oshima, R. Mochizuki, R. Lenz, J. Chao "Modeling, Measuring, and Compensating Color Weak Vision" IEEE Transactions on Image Processing, Vol.25, Iss. 6, pp. 2587-2600, March 2016
- [3] M. Shinto and J. Chao, "A New Algorithm to Find Isometric Maps for Comparison and Exchange of Facial Expression Perceptions" HCII 2021, LNCS 12762, pp.592-603, Springer 2021.