均等色差空間に基づいた色差式

専門会員 小松原 仁 (財団法人日本色彩研究所)

New Color-difference Formula Based on Uniform Color-difference Space

Fellow Member Hitoshi Komatsubara (Japan Color Research Institute)

ABSTRACT

A new color-difference formula based on uniform color-difference space presented. CIELAB color space that was revised seemed to create an equal color difference between the adjacent hue lines or chroma lines on the Munsell system. Weighting functions for a new chroma scale and new hue-difference scale adjust the distance in uniform space to the perceived color-difference magnitude of the Munsell system. We called this uniform space a uniform color-difference space. We determined the total color-difference between two color samples with the weighting factor corresponding to the location of the color samples in uniform color-difference space. The Relationships between the total color-difference used in the new formula and the perceived magnitude were performed analyzed through visual perception data sets. The new formula is better than CIELAB, CIE94, and CIEDE2000.

KEYWORDS : uniform color-difference space, color-difference formula, CIELAB, CIE94, CIEDE2000, Munsell system

1. はじめに

筆者は、色の異なる2色の知覚差に基づいた均等色差空間を開発するために、マンセル表色系の特徴の一つである知覚差の等歩度性に着目し、マンセル表色系の基準値から計算したCIELABの色座標の分布から、マンセル表色系の彩度差を良好に予測することのできる相関量を得るために、 ab クロマ補正関数 $F(C)$ を用いる方法を提案した。 ab クロマを補正することによって、マンセル表色系の色相及び明度の等しい隣接する2色のクロマ差は、色座標の位置に関係なく、ほぼ等しい値が得られることを明らかにした。また、明度及び彩度が等しい隣接する2色の差は、クロマ差が含まれて計算されることのあるCIELABとは異なり、ほぼ色相差だけを表すという結果が得られた。しかし、色相差は、円筒座標系を採用しているマンセル表色系の特徴から推定されるように、色座標の位置によって変化するため、 ab クロマを補正したCIELABは、そのままでは均等色差空間とは言えない。本報では、明度及び彩度の等しいマンセル表色系の ab 色相差の特性から、 ab 色相差の補正方法を提案するとともに、色差知覚の相関量を計算するための色差式について検討する。

ここで、均等色差空間とは、均等色知覚空間であるマンセル表色系における色相差及び彩度差に近似した相関量を与えることのできる色空間という意味で用いている。従って、この色空間における2色の距離が、かならずしも、直接に色差知覚と一致することを意味していない。

2. ab 色相差の補正方法

マンセル表色系で明度及び彩度の等しい隣接する2色の色相差を、明度1, 3, 5, 7, 及び9について計算した結果を図1及び図2

に示す。図2の横軸は2色の平均色相角を、縦軸は ab クロマを補正して求めた ab 色相差を、2色の平均 ab クロマで割った値を示す。平均 ab クロマで割った値を用いている理由は、マンセル表色系が円筒座標系であるために、図1に示したように ab クロマが大きくなるにつれて、隣接する2色の ab 色相差が大きくなることを考慮したものである。均等色差空間では色相及び彩度に関係なく、 ab 色相差を2色の平均 ab クロマで割った値が一定値になることが期待される。図1及び図2からは、色相角による変動とともに、彩度の変化にともなって分散が大きくなる傾向が見られる。彩度にともなう変化は、図2の特定の色相角(例えば、 320° 近傍の□印)において、高彩度になるに従って $(\Delta F/C)$ の値が小さくなる系統的な変化を含んでいる。この変化は、無彩色近傍での変化が大きいことから、 ab クロマの補正方法の検討で明らかになった ab 色座標におけるマンセル表色系の偏心による影響を含んでいることが推定される。彩度 $C=2$ のデータから無彩色点を推定して補正した結果を図3及び図4に示す。図3及び図4と図1及び図2との比較から、彩度に依存した系統的な変化は、無彩色点の偏心に起因していることがわかる。無彩色点の偏心による影響を補正した隣接する2色の ab 色相差は、色相角 50° 付近に見られる明度1及び明度9のデータの一部を除いて、色相角に依存した変化を示すことがわかる。この色相角による ab 色相差の変化を、色相の循環性を考慮して、クロマスケールの場合と同様に余弦関数で最適化することを検討した。用いた余弦関数を式(1)に示す。

$$F(H) = \beta_0 + \beta_1 \cos(H + \beta_2) + \beta_3 \cos(2H + \beta_4) + \beta_5 \cos(3H + \beta_6) + \beta_7 \cos(4H + \beta_8) + \beta_9 \cos(5H + \beta_{10}) \dots \quad (1)$$

図1 ab クロマを補正した色相差とメトリッククロマの関係
Fig.1 Relationship hue-difference and metric-chroma with modified CIE a, b chroma.

図3 無彩色点を補正した色相差とメトリッククロマの関係
Fig.3 Relationship hue-difference and metric-chroma shifted white-point.

図2 ab クロマを補正した色相差の色相角依存性
Fig.2 Variation hue-difference in dependence on hue-angle with modified CIE a, b chroma.

図4 無彩色点を補正した色相差の色相角依存性
Fig.4 Variation hue-difference in dependence on hue-angle shifted white-point.

ここで、式(1)の係数 β_i は、図2又は図4のデータから回帰分析によって求めた回帰係数を示す。

図5に、図4のデータから回帰係数を求め、式(1)によって計算した ab 色相差の色相角に対する変化特性を示す。 ab 色相差の変化の様子は、明度によってやや異なった傾向を示しているが、明度1を除くと、おおむね全体的な変化の特徴は同じとみなすことができる。このため、明度1を除く明度3, 5, 7, 及び9のデータから求めた回帰係数を新たに求め色相補正関数 $F(H)$ とする。図5に補正関数を太線で示す。補正関数による変化特性は、明度5と一致し、明度7に近似していることから、平均的な明るさの色についての ab 色相差の色相角に対する変化特性と考えることができる。

図6及び図7に色相差補正関数 $F(H)$ を用いて隣接する2色の ab 色相差を求めた結果を示す。図3と図6の結果を比較すると、回帰式による決定係数が高くなっており、色相差補正関数の効果が見られる。同様に、図4と図7の比較では、色相角に依存した変化が補正されており、明度1を除くと色相差 ($\Delta H^*/C^*$) の変動が約0.1~0.2の範囲におさまる、分散が小さくなっていることから、補正係数の有効性が確認される。ただし、クロマスケールの場合と比較して色相差の分散が大きく、図4では示していない、彩度10以上の高彩度における変動が顕著になることから、マンセル表色系に

図5 色相差の色相角依存性関数
Fig.5 Function of hue-difference in dependence on hue-angle.

おける知覚差の等歩度性についての疑問が残る結果になっている。この点については、均等色差空間に基づく色差式の性能評価における課題と考えられる。

3. 均等色差空間に基づいた色差式

3.1 色差式の基本構造

図6からも判るように、均等色差空間における2色のab色相差は、クロマに比例して大きくなる特徴を持っている。これは均等色差空間で用いているマンセル表色系が円筒座標系であることによるもので、2色の色相差の知覚が等しいにもかかわらず、均等色差空間での距離が異なる結果になっている。また、筆者が行ったCIELABのメトリック量から求められる色相差、明度差及びクロマ差を比較した実験結果²⁾では、CIELABのメトリック量の差が等しい場合、明度差>色相差>クロマ差の順に色差が大きく知覚されることが明らかになっている。これらのことは、均等色差空間における2色の距離が、かならずしも、直接に色差知覚と一致することを意味していないことを示唆している。このため、均等色差空間における色差知覚に相関する量を計算するための色差式には、CIE94³⁾及びCIEDE2000⁴⁾等と同様に、式(2)に示す基本構造を用いることが適当と考えられる。

$$\Delta E = \{(\Delta L^*/S_L)^2 + (\Delta C^*/S_C)^2 + (\Delta H^*/S_H)^2\}^{0.5} \dots (2)$$

ここで、 ΔE ：均等色差空間における色差知覚に相関する量

ΔL^* ：2色のCIELAB明度指数の差

ΔC^* ：2色のクロマを補正後のクロマ差

ΔH^* ：2色の色相差補正後の色相差

S_L ：色差知覚の相関量を得るための明度差重み付け係数で、 $S_L=1.0$ を用いる。

S_C ：色差知覚の相関量を得るためのクロマ差重み付け係数

S_H ：色差知覚の相関量を得るための色相差重み付け係数

3.2 重み付け係数

CIELAB明度指数(L^*)及びクロマ補正関数 $F(C)$ の性質から、マンセル表色系の $\Delta V=1.0$ 及び $\Delta C=2.0$ の均等色差空間における差は、 L^* 及び色相・クロマに関係なくほぼ一定値で $\Delta L^*=10$ 並びに $\Delta C=10$ になる。一方、図6の色相差(ΔH)とクロマ(C)の関係は零点を切片とする直線回帰式で近似でき、その傾きは $b=0.158$ である。このことから、 $\Delta V=1.0$ 及び $\Delta C=2.0$ のメトリック色差に等しい色差($\Delta H=10$)になるクロマ(C)の値は $C=63.5$ に相当する。この C では、 $\Delta H=2.5$ stepのメトリック色差は、 $\Delta V=1.0$ 及び $\Delta C=2.0$ のメトリック色差に概ね等しくなるため、 $\Delta H=2.5$ step、 $\Delta V=1.0$ 及び $\Delta C=2.0$ の知覚差を、等しいメトリック色差で表すことができる。このことは、 $C=63.5$ における色相差を、クロマに比例して変化する色相差の大きさを調整するための規準として用いることができることを示唆している。従って、規準クロマにおける色相差に対して任意のクロマにおける色相差は、式(3)によって相対色相差として表すことができる。ただし、 C の値は $C=63.5$ ではなく、端数を丸めた $C=65$ を用いている。また、定数項の1は、 $C=0$ の無彩色近傍における異常値を避けるために用いたもので、無彩色近傍では色相の知覚がほとんどないことが考えられることから、色相が知覚されることによる補正を必要としないためである。

$$\begin{aligned} S_H &= 1 + (1/65) \times C \\ &= 1 + 0.0154 \times C \end{aligned} \dots (3)$$

一方、筆者が行ったCIELABのメトリック量から求められる色相差、明度差及びクロマ差と知覚色差との関係を、比率評定法を用いて比較した結果²⁾に、クロマ補正係数 $F(C)$ 及び色相差補正係数 $F(H)$ を適用して整理した結果を図8に示す。メトリック色相差及びメトリック明度差と知覚色差 $[dE(\text{Visual})]$ との回帰分析から得ら

図6 均等色差空間における色相差とメトリッククロマの関係
Fig.6 Relationship hue-difference and metric chroma on uniform color-difference space.

図7 均等色差空間における色相差の角度依存性
Fig.7 Variation hue-difference in dependence on hue-angle, on uniform color-difference space.

れる回帰式の傾き(b)はほぼ等しく、 $b=0.9$ になるのに対して、メトリッククロマ差と知覚色差との回帰式の傾きは $b=0.5$ になり、メトリッククロマ差が知覚色差に比較して、大きく計算されていることを示している。また、McDonald⁵⁾は、繊維製品の色合わせにおける合否判定の結果から、製品として許容できるメトリッククロマ差が2色の平均メトリッククロマに依存して大きくなり、メトリッククロマ差の大きさに比較して色差知覚が小さくなることを報告している。この報告によれば、筆者らが用いた4種類の物体色(色票)²⁾の平均クロマ(C)である $C=38$ 以下のクロマでは知覚色差に対する回帰式の傾きは大きく、 $C=約38$ 以上では小さくなることが推定される。 $C=38$ での知覚色差とメトリッククロマ差の比率は約1:2であることから、メトリッククロマ(C)に比例して傾きが変わると仮定すると、色相差と同様に、式(4)のように $C=38$ におけるクロマ差を規準とした相対クロマ差として表すことができる。ただし、式(4)では、 $C=38$ ではなく端数を丸めた $C=40$ を用いている。定数項の1は、式(3)と同様に、 $C=0$ のときの異常値を避けるために用いた。式(3)を色差知覚の相関量を得るためのクロマ差重み付け係数とする。

$$\begin{aligned} S_C &= 1 + (2/40) \times C \\ &= 1 + 0.05 \times C \end{aligned} \dots (4)$$

また、メトリック色相差及びメトリック明度差と知覚色差との回帰式の傾きは $b=0.9$ であるため、知覚色差に比較してやや大きくメトリック色差が計算される傾向が見られる。知覚色差により相関する量を得るためには、式(3)を式(5)に示すように微調整することが適当と考えられる。この式(5)を色差知覚の相関量を得るための色相差重み付け係数とする。

ただし、比率評定法における基準刺激は明度差だけで構成される色差対を用いているため、明度差の傾きは $b=1.0$ になることが期待されるが、やや傾きが小さくなっている。この理由として、比率評定の回答比率の範囲が 1~10 とやや広い範囲で回答されているため、比率の大きい(色差の大きい)色差対に対する比率判断がやや小さくなっていることが懸念される。式(4)及び式(5)は実験結果に最適化した結果であり、明度差の重み付け係数を含めて、その妥当性については今後の検討が必要と考えられる。

$$S_H = 1 + (0.0154/0.88) \times C \\ = 1 + 0.0175 \times C \quad \dots (5)$$

式(2)の色差知覚の相関量を得るための重み付け係数に、式(4)及び式(5)を用いた色差式を NCDF-2 と呼ぶことにする。また、 ab 色座標におけるマンセル表色系の無彩色点の偏心による影響を補正しない値を用いて $F(H)$, S_H 及び S_C を推定した色差式を NCDF¹⁾ と呼ぶことにする。

図8 知覚色差とメトリック色差との関係
Fig.8 Relationship perceived color-difference and hue-difference, lightness-difference, chroma-difference.

4. 色差観測データによる検討

NCDF 及び NCDF-2 を用いて、CIE94 の検証に用いられた Dupon data⁶⁾ との比較を行い、NCDF 及び NCDF-2 と知覚色差との対応について検討し、他の色差式と比較検討した結果を表 1 及び表 2 に示す。表中の MLAB は、筆者が提案した色差式²⁾である。表 2 は表 1 から、CIE が 1978 年に勧告した色差研究のためのガイドライン⁷⁾で採用している物体色 5 色(赤、黄、緑、青及び灰色)についてのデータをまとめたものである。5 色のうちの有彩色 4 色は、式(4)及び式(5)の検討に用いた 4 種類の物体色と同じ色である。

Dupon data は、アクリルラッカー塗料によって色合わせされた中心色 19 色及びその周辺色を作成して得られた 156 種類の色差対について、恒常法によって知覚される色差を観測したデータで、試験色差対の知覚される色差が参照色差対と比較して、大きいか小さいかを判定して得られた判断確率から閾値を推定したものである。参照色差対の色差は $\Delta E=1.0$ になっているので、得られる閾値は、

参照色差対の色差 $\Delta E=1.0$ に相当する知覚色差に相当する。従って、観測者の知覚色差を良好に予測することが期待される色差式では、基準色と閾値推定色から計算される色差が、 $\Delta E=1.0$ になる。

表 1 及び表 2 の結果を比較すると、CIE94 が全 Dupon data に最適化するように重み付け係数が決定されている実験式になっていることがわかる。しかし、色差ガイドラインの 5 色に限っては、平均色差が 1 より小さく過補正になっており、最適化するデータ群に依存した実験式といえる。NCDF 及び NCDF-2 はデータ群に関係なく、平均色差が 1 に近く、知覚色差の良い相関量を予測できることがわかる。ただし、CIE94 に比較して色差対の種類による分散がやや大きくなる結果になっている。特定の色差観測データによらずに、マンセル表色系の等歩度性に着目した均等色差空間に基づいた NCDF 及び NCDF-2 による色差が、色差観測データを良好に予測できることは、微小色差から大色差までの色差知覚の連続性という観点からも興味深い。 ab 色座標におけるマンセル表色系の偏心による影響を補正していない NCDF の分散は NCDF-2 に比較して小さく、平均色差の値と合わせて総合的に判断すると CIE94 及び CIEDE2000 と同等か、より良い色差式になっている。偏心の補正によるどのような効果や問題点が生じるかを、他の色差観測データを用いて検討する必要があると考えられる。

表 1 Dupon dataset の全データを用いた色差式の性能比較

Table 1 Performance of color-difference formula obtained by all Dupon dataset.

色差式	CIELAB	CIE94	CIEDE2000	CMC(1:1)
平均値: M	1.44	1.01	0.94	1.13
標準偏差: S	0.512	0.213	0.188	0.339
S/M	0.356	0.210	0.200	0.300
ランク(M)	7	1	5	6
ランク(SM)	7	2	1	6
色差式	MLAB	NCDF	NCDF-2	
平均値: M	1.04	1.02	1.03	
標準偏差: S	0.264	0.241	0.262	
S/M	0.255	0.237	0.255	
ランク(M)	4	2	3	
ランク(SM)	5	3	4	

表 2 Dupon dataset の CIE ガイドライン 5 色を用いた色差式の性能比較

Table 2 Performance of color-difference formula obtained by all CIE guideline colors in Dupon dataset.

色差式	CIELAB	CIE94	CIEDE2000	CMC(1:1)
平均値: M	1.40	0.94	0.92	1.02
標準偏差: S	0.470	0.268	0.178	0.254
S/M	0.337	0.178	0.194	0.249
ランク(M)	7	5	6	1
ランク(SM)	7	1	2	6
色差式	MLAB	NCDF	NCDF-2	
平均値: M	0.97	0.98	0.98	
標準偏差: S	0.202	0.202	0.209	
S/M	0.208	0.207	0.213	
ランク(M)	4	1	1	
ランク(SM)	4	3	5	

CIEDE2000 は、平均色差が 1 より小さく過補正になっており、CIE94 と同様に最適化するデータ群に依存した色差式になっており、かならずしも知覚色差の良い相関量を与えるとは言えない結果になっている。CMC[®]は、イギリス規格に採用されている色差式であるが、表 1 及び表 2 ともにランクは低く、色差知覚に対する良好な相関量にはなっていない。表 1 及び表 2 から直接に伺い知することはできないが、無彩色近傍における色差知覚とのズレが大きいことに起因している。

5. おわりに

マンセル表色系における隣接する 2 色の色差が等しくなるように補正した均等色差空間を検討し、均等色差空間における色差式を提案した。提案した色差式によって予測される色差は、CIE94 に用いられた色差観測データを良好に予測できることを明らかにした。

均等色差空間に基づいた色差式は、マンセル表色系の等歩度性に着目したものであり、特定の色差観測データに依存しないものである。特定の色差観測データに最適化した CIE94 及び CIEDE2000 等と比較して、より汎用性の高い色差式といえる。

参考文献

- (1) 小松原仁:均等色差空間の開発—CIELAB クロマスケールの修正, 照学誌, Vol.87, No.11, pp.912-918(2003)
- (2) H.Komatsubara:Evaluation of color difference, AIC Color 85, 44(1985).
- (3) CIE Publication No.116:Industrial colour-difference evaluation (1995).
- (4) CIE Publication No.142:Improvement to industrial colour-difference evaluation (2001).
- (5) R.McDonald:Industrial pass/fail colour matching part 3, J.Soc.Dyers Colourists, Vol.96,p.486(1980).
- (6) R.S.Berns et al:Visual determination of suprathreshold color-difference tolerances using Probit analysis, Color Res. & Appl., Vol.16, pp.297-316(1991).
- (7) CIE TC-1.3 Colorimetry:Guidelines for coordinated research on color difference evaluation (1978).
- (8) F.J.J.Clarke et al:Modification to the JPC79 color-difference formula, J.Soc.Dyers Colourists, Vol.100, p.128(1984).

(受付日 2006 年 3 月 22 日/採録日 2006 年 5 月 12 日)

小松原 仁 (専門会員)

財団法人日本色彩研究所

〒339-0073 さいたま市岩槻区上野 4-6-23

1951 年生まれ。昭和 47 年 3 月長岡工業高等専門学校電気工学科卒、同年 4 月財団法人日本色彩研究所に入所。主として測光・測色、特に測色技術に関する調査研究に従事。日本色彩学会、日本照明委員会等の会員。