

論文

OSA表色系からXYZ表色系への表色値変換アルゴリズム

An OSA-UCS to CIEXYZ Conversion Algorithm

小林 光夫

Mituo Kobayasi

電気通信大学

The University of Electro-Communications

関 宏市郎

Kôitirô Seki

電気通信大学

The University of Electro-Communications

吉識 香代子

Kayoko Yosiki

電気通信大学

The University of Electro-Communications

Abstract

OSA-UCS released in 1974 is often used in the field of categorical color, color appearance model, etc., because of the uniformity of perceived color difference. The color specification value of OSA-UCS is defined with equations of tristimulus value of CIEXYZ. But, a conversion method from OSA-UCS to CIEXYZ isn't known except table-lookup method.

In this article, a direct conversion algorithm from OSA-UCS to CIEXYZ according to the definition of OSA-UCS is proposed. The algorithm enable to convert any color value in OSA-UCS to CIEXYZ, even out of the gamut of existing color chips. The accuracy and the speed of the algorithm are evaluated, and its usefulness is confirmed. Further, two examples of OSA-XYZ conversion are shown.

keywords: color conversion, iterative algorithm, color specification system, OSA-UCS, CIEXYZ, uniform color space.

要 旨

1974年に発表されたOSA表色系は、知覚的な等歩度性という特徴から、カテゴリカルカラーや知覚モデルなどの分野でよく利用されている。OSA表色値はCIEXYZ値により定義されているが、OSA表色値からXYZ表色値へ直接変換する方法は知られておらず、従来は表探索と補間により行なわれている。

本論文では、OSAの定義に従った、OSA表色値からXYZ表色値への一つの直接的な変換アルゴリズムを提案する。これにより、色票の範囲外の色を含む任意のOSA表色値について、XYZ表色値へ容易に変換することが可能となる。このアルゴリズムの精度および速度の評価を行なったところ、良い結果が得られ、実用的なものであることがわかった。また、OSA-XYZ変換を利用した例をあわせて紹介する。

キーワード：表色値変換、反復アルゴリズム、表色系、OSA-UCS、CIEXYZ、均等色空間

1. はじめに

OSA表色系(OSA-UCS)はアメリカ光学会(Optical Society of America, 通称OSA)のメンバーが中心となって作成した表色系である。作成の経緯は、文献[1]に詳しい。1944年、明度差と色度差の複合した3次元の色差が評価できる体系を、というJuddの提案が発端となり、59個の修正Munsell色票を用いて色差を判定する心理実験が数多く行なわれた。その結果をもとに、種々の数学的モデルが提案され改良されて、1974年、色差の等しい点が等距離に位置するような3次元の尺度OSA-UCS(OSA Uniform Color Scales)が構成された[2]。さらに、OSA-UCS上の格子点における色票が作成され、対応するCIE XYZの値が公表された[3]。

OSA表色系の特徴をまとめると、次のようである。

1. 比較的大きい色差(jndの20倍程度)における均等性を考慮して、色票を立方8面体(cubo-octahedron)の中心および頂点に配し(図1参照)、隣接するそれぞれの色票間の色差が一定となるように設計された[2, p.1695]。
2. 実用性を重視し、10°視野のCIE1964三刺激値に対して、定義されている。
3. 色の見えに関するHelmholtz-Kohlrausch効果[4]と、視感反射率 $Y=30$ の背景に対するcrispness効果[5]に配慮している。

これらの特徴から、OSA表色系は近年、カテゴリーカルカラーの分野[6]や、色覚モデルの検証[7]などに用いられている。

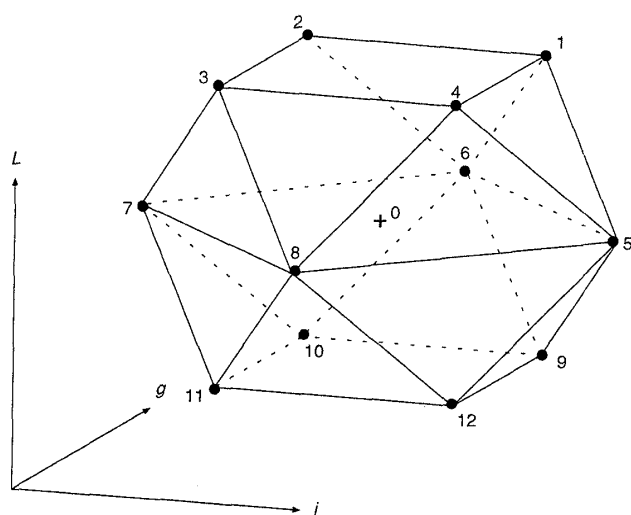


図1 OSA色票の配置

OSAの表色値(L, j, g)の各成分は、それぞれ lightness, yellowness, greennessを表しており、これらは10°視野の三刺激値(X_{10}, Y_{10}, Z_{10})から、いくつかの数式を経て定義される。

この定義に従って、三刺激値からOSA表色値を求めることは容易である。しかし、三刺激値の各成分をOSA表色値で陽に表わすことはできないため、OSA表色値を与えて三刺激値を求めることは容易でない。そのため従来は、便宜的な手段として、表探索と補間による方法が用いられてきた。ただし、Smithの文献[8]には、MacAdamとの私信により反復アルゴリズムを用いた解法を得たとの記述がある。しかし、OSA誌およびColor Research and Application誌の論文を見る限りではそのアルゴリズムは発表されておらず、詳細は知られていない。

表探索と補間による方法では、両表色値の対応表に登録された表色値の範囲外の変換が保証されない。すなわち、変換できる表色値の色域が狭い。また、色域内の表色値に対しても、多数の表色値が登録されていなければ、補間値の精度向上は望めない。さらに、表探索には一般に時間がかかるという欠点がある。OSA表色系の定義に基づく解析的なかつ高速な変換があれば、このような短所が克服され、OSA表色系のさらなる活用が期待される。

本論文では、まずOSA表色系の定義式をアルゴリズムの観点から整理し、それに基づき考案したOSA表色値からXYZ三刺激値を得る解析的な変換アルゴリズムを述べる。さらに、そのアルゴリズムの有効性を評価し、最後に二つの利用例を示す。なお、本論文は、カラーフォーラムJAPAN 2000の発表[9]をもとに論を詰め、数値実験を重ねた成果である。

2. XYZからOSAへの変換

2.1 XYZ-OSA変換のアルゴリズム

文献[2]には、三刺激値(X_{10}, Y_{10}, Z_{10})をもとに、OSAの表色値(L, j, g)が定義されている。その定義式に従ったXYZからOSAへの表色値変換のアルゴリズムは、次のように書ける。

以下、簡単のため、 X_{10}, Y_{10}, Z_{10} の添字10は省略する。

1. まず、三刺激値(X, Y, Z)から色度座標

$$x = X/(X + Y + Z), \quad y = Y/(X + Y + Z) \quad (1)$$

を求め、これを用いて

$$K = 4.4934x^2 + 4.3034y^2 - 4.276xy - 1.3744x - 2.5643y + 1.8103 \quad (2)$$

を計算する.

2. つぎに,

$$Y_0 = K \cdot Y \quad (3)$$

を計算し, Y_0 から L および C を, それぞれ

$$L = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ 5.9 \left[\left(Y_0^{\frac{1}{3}} - \frac{2}{3} \right) + 0.042(Y_0 - 30)^{\frac{1}{3}} \right] - 14.3993 \right\} \quad (4)$$

および

$$C = 1 + 0.042(Y_0 - 30)^{\frac{1}{3}} / \left(Y_0^{\frac{1}{3}} - \frac{2}{3} \right) \quad (5)$$

によって求める.

3. 一方, 三刺激値 (X, Y, Z) から線形変換

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7990 & 0.4194 & -0.1648 \\ -0.4493 & 1.3265 & 0.0927 \\ -0.1149 & 0.3394 & 0.7170 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (6)$$

によって (R, G, B) を求め, さらに

$$R' = R^{\frac{1}{3}}, \quad G' = G^{\frac{1}{3}}, \quad B' = B^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

を計算する.

4. (R', G', B') から

$$\begin{aligned} a &= -13.7R' + 17.7G' - 4B', \\ b &= 1.7R' + 8G' - 9.7B' \end{aligned} \quad (8)$$

を計算し, 先に求めた C を乗じて

$$g = C \cdot a, \quad j = C \cdot b \quad (9)$$

とする.

以上によって, (X, Y, Z) から (L, j, g) が求まる. このアルゴリズムにおけるデータの流れを, 図2に示す.

2.2 K の値について

色票の視感反射率に相当する Y 値と知覚明度に対応する Y_0 との比である K の値は, いわゆる Helmholtz-Kohlrausch 効果の影響を表している.

色度座標 (x, y) に対する K のグラフは, 式(2)からわかるように, 楕円放物面を形成する. K の値は, 図3

の等高線で表されるように, 黄色の近辺で1より若干小さい値をとるものの, それ以外では, 照明光 D_{65} の色度点(+印)から遠ざかるにつれ, すなわち刺激純度が増すにつれ, 大きくなる. スペクトル軌跡上で最大値 $K = 2.2960$ をとり, D_{65} 照明光の色度座標 $(0.3138, 0.3310)$ では $K = 1$ となる. 最小値は色度座標 $(0.3859, 0.4897)$ で生じ, $K = 0.9173$ である.

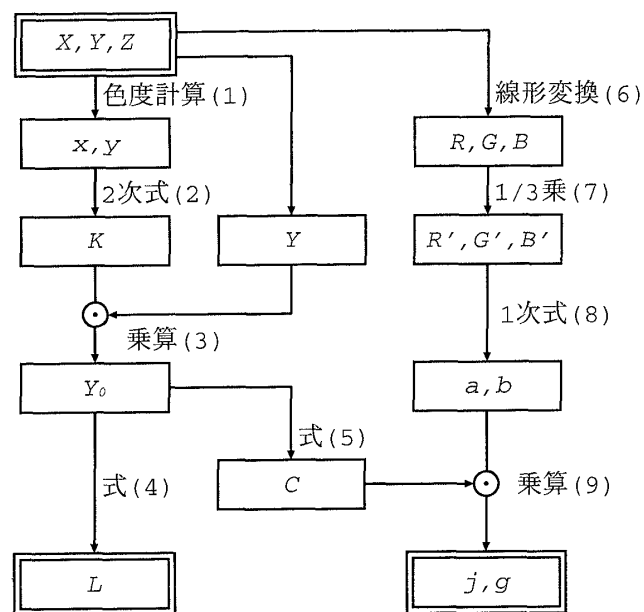


図2 XYZ-OSA変換におけるデータの流れ

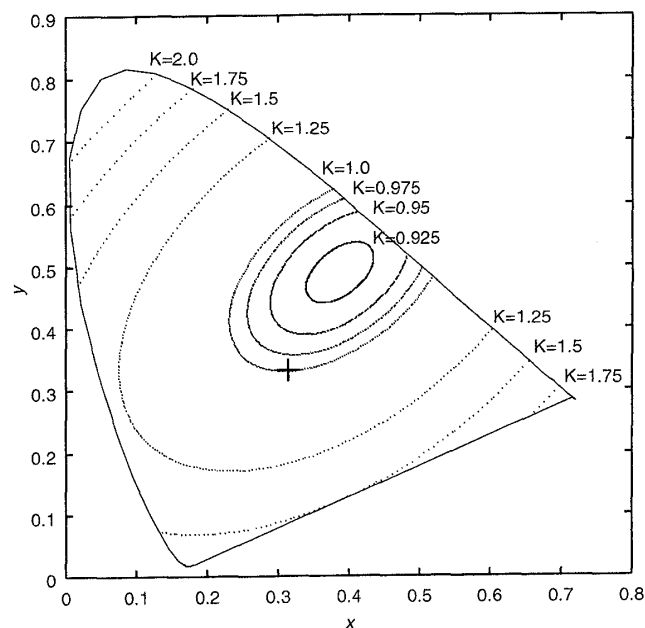


図3 xy 色度図における K の等高線 (+印は D_{65} 光の色度点)

2.3 L および C について

式(4)および式(5)に含まれる $(Y_0 - 30)^{\frac{1}{3}}$ は、視感反射率 $Y = 30\%$ の背景におけるいわゆるcrispening効果を表すものである。crispening効果とは、背景に隣接する色の明度が背景色の明度に近い場合、明度差が強調されて見える現象である。

Y_0 に対する L および C のグラフを書くと、それぞれ図4および図5のようになる。 L も C も Y_0 の滑らかな単調増加関数であり、いずれのグラフも $(Y_0 - 30)^{\frac{1}{3}}$ の因子によって $Y_0 = 30$ で傾きが垂直となる。

C の値は、 $Y_0 = (2/3)^3 \doteq 0.2963$ で負の方向に発散する関数であるが(図5参照)、 C は知覚明度によって色みの大きさを調節するものであることを考えると、このような小さな Y_0 の値は考慮外のものと思われる。文献[2]には Y_0 の有効な範囲について特に記述されていないが、以下では、 $Y_0 \geq 1$ と仮定してすすめる。実用色票の範囲では、 Y_0 が1未満になることはほとんどないから、このように仮定してもさしつかえない。

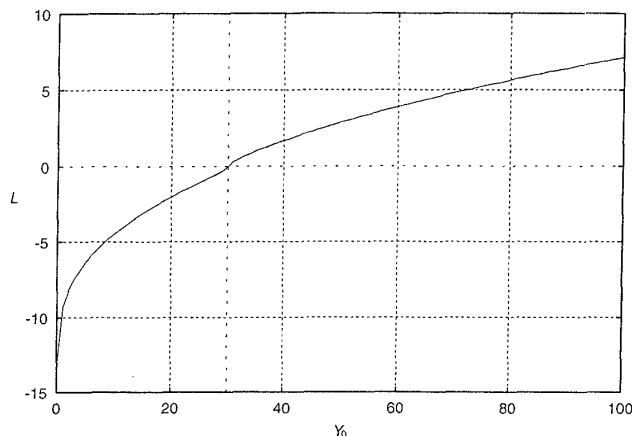


図4 Y_0 に対する L のグラフ

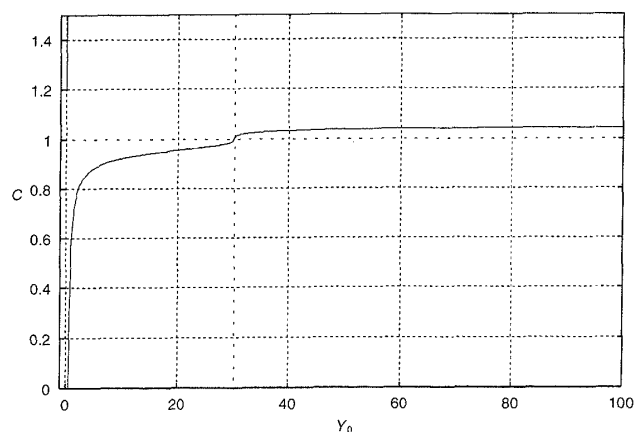


図5 Y_0 に対する C のグラフ

3. OSAからXYZへの変換

3.1 OSA-XYZ変換における困難

前節のXYZ-OSA変換におけるデータの流れを念頭におき、OSA表色値 (L, j, g) を与えて三刺激値 (X, Y, Z) を求めることを考える。

まず、 L から Y_0 を求める。そのためには L を与えて式(4)を Y_0 について解かなければならないが、2.3節に述べたように L は Y_0 のなめらかな単調増加関数であるから、数値計算の手法(たとえば、Newton-Raphson法やregula-falsi法[10])が適用できる。

Y_0 が求まれば、式(5)により C が得られ、さらに、与えられた j および g と C から、式(9)を用いて a, b を求めることができる：

$$a = g/C, \quad b = j/C. \quad (10)$$

しかし、この先 X, Y, Z を得るに至る簡単な道がない。

ところで、式(8)はいずれも R', G', B' の1次式である。したがって、これから B' あるいは G' を消去することにより、 G' あるいは B' は R' の1次式として、

$$G' = R' + a', \quad B' = R' + b' \quad (11)$$

のように表せることがわかる。ここに、

$$\begin{aligned} a' &= (9.7a - 4b)/139.69, \\ b' &= (8a - 17.7b)/139.69 \end{aligned} \quad (12)$$

とおいた。

いったん G', B' が R' で表せれば、 R, G, B も R' (の3次式)で表せる。さらに、線形変換(6)の逆変換

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0.7990 & 0.4194 & -0.1648 \\ -0.4493 & 1.3265 & 0.0927 \\ -0.1149 & 0.3394 & 0.7170 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1.0626 & -0.4121 & 0.2975 \\ 0.3599 & 0.6401 & -0.0000 \\ -0.0001 & -0.3690 & 1.4424 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

により、 X, Y, Z はいずれも R, G, B の1次式で表せるから、いずれもまた、 R' (の3次式)で表せる。

これから、色度座標 (x, y) は R' (の複雑な式)で表せることになり、したがって K および式(3)の右边 $K \cdot Y$ も R' で表せることがわかる。式(3)の左边 Y_0 は、先に述べたように L から求められるから、式(3)は R' の満たす方程式となり、原理的には、これを解けば R' が求まる。 R' が求まれば式(11)から G', B' が求まり、これらから

$$R = (R')^3, \quad G = (G')^3, \quad B = (B')^3 \quad (14)$$

を得て、線形変換(13)により (X, Y, Z) を得ることができる。

しかし、 R' の方程式としての式(3)はたいへん複雑な式となり、容易には解けない。

3.2 反復アルゴリズムによる変換法

前述の困難を避けるべく、以下のように考察を進めよう。式(3)のうち Y は R' の3次式で表わせるので、 K の値さえ決めることができれば、 Y_0 を与えて R' を求めることは、数値解法により可能となろう。

ところで、2.2節に述べたように、 K の値はおおよそ0.92～2.30の範囲であり、あまり大きく変化しない。そこで、 K の値を(たとえば1に)仮定して計算を進め、とりあえず得られた (X, Y, Z) から K の値を修正するという、反復アルゴリズムが考えられる。

K の値が分かっているれば、式(3)から

$$Y = Y_0/K \quad (15)$$

として、 Y が求まる。式(13)より Y は R' の3次式

$$Y = 0.3599(R')^3 + 0.6401(R' + a')^3 \quad (16)$$

で表せるので、これを解いて R' を求めることができる。

R' から G', B' を求め、 R, G, B を経由して (X, Y, Z) を得るまでは、前節に述べたとおりである。 (X, Y, Z) から、さらに xy 色度座標を求め、式(2)により K を計算しなおす。この新たな K を用いて、 R' の3次方程式(16)を解く段階から、再び計算を繰り返す。 K の値が十分一定値に近くなったら反復を終了する。

この反復アルゴリズムを以下にまとめる。また、このアルゴリズムにおけるデータの流れを図6に示す。

1. 与えられた L に対し方程式(4)を(数値解法により)解き Y_0 を求める。
2. 式(5)を用いて Y_0 から C を求める。
3. 与えられた j および g に対し、式(10)により a, b を求め、さらに式(12)により a', b' を計算する。
4. K の初期値を1と設定する。
5. 式(15)により Y を求め、 K の値を K_{old} に保存する。
6. R' に関する3次方程式(16)を(数値解法により)解く。
7. 式(11)によって G', B' を求め、さらに式(14)より R, G, B を求める。

8. 1次式(13)によって X, Z を計算する。
9. (X, Y, Z) から色度座標 (x, y) を計算し、新たな K の値を式(2)により計算する。
10. 微小定数 $\varepsilon > 0$ に対し、
 $|K - K_{old}| < \varepsilon$ となれば反復を終了し、 (X, Y, Z) を出力。 $|K - K_{old}| \geq \varepsilon$ のときは、5.に戻り計算を繰り返す。

(反復終了判定のための ε は予め与えておく。)

なお、この反復アルゴリズムの収束性を理論的に示すには、ステップ5から9までの K の値を修正する過程を

$$K := \phi(K)$$

と書くとき、写像 ϕ が縮小写像であることを言う必要がある。しかし、 ϕ は K の関数としては極めて複雑であり、 ϕ の縮小写像性を解析的に示すことはほとんど不可能である。4.2節で述べるように、多数の数値実験により、広範囲の表色値に対して収束することが確かめられている。このことが逆に、 ϕ が縮小写像であることを数値的に保証していると考えられる。

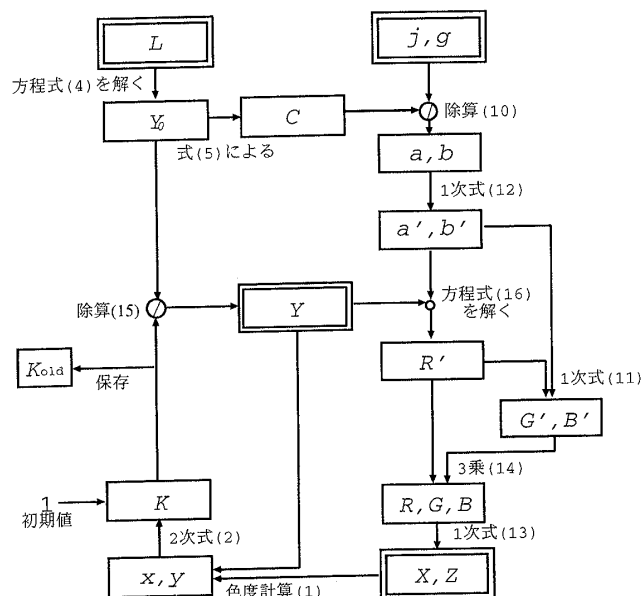


図6 OSA-XYZ変換におけるデータの流れ

3.3 数値解法上の工夫

上述のOSA-XYZ変換アルゴリズムには、方程式を数値解法によって解く部分が2ヶ所含まれている(式(4)および式(16))。方程式の解法としてはNewton-

Raphson法が有効であるが、1次導関数の値が0や不定となる場合には適用できないという点、および局所的な収束性しか保証されていない点に注意しなければならない。

筆者らはこれらの点を考慮し、どのような場合でも解が求まるように、以下に示す工夫を施した。

(a) L から Y_0 を求める方程式(4)について

まず、 L から Y_0 を求める部分、すなわち方程式(4)について考える。

式(4)の右辺の Y_0 の関数を

$$f(Y_0) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ 5.9 \left[(Y_0^{\frac{1}{3}} - \frac{2}{3}) + 0.042(Y_0 - 30)^{\frac{1}{3}} \right] - 14.3993 \right\}$$

とおくとき、その導関数

$$f'(Y_0) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{5.9}{3} \left[\frac{1}{Y_0^{\frac{2}{3}}} + \frac{0.042}{(Y_0 - 30)^{\frac{2}{3}}} \right]$$

は、 $Y_0 = 30$ で値が定まらない(0で割ることになる)。したがって、 $Y_0 = 30$ の近傍では Newton-Raphson 法は適用できない。

そこで、 $Y_0 = 30$ の近傍、具体的には $29 \leq Y_0 \leq 31$ では、導関数の要らない regula-falsi法(はさみうち法)を用いて方程式(4)を解くことにした。

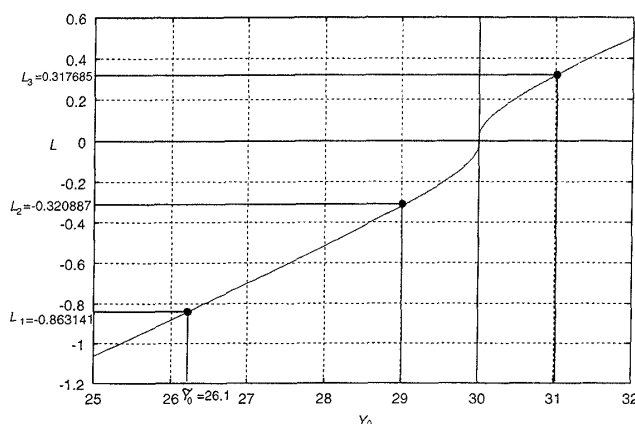


図7 区間[25, 32]における Y_0 - L のグラフ

上記以外の区間では、収束の速い Newton-Raphson 法を用いることにする。ところで、Newton-Raphson 法の大域的な収束性については、次のことがわかっている[11]。すなわち、単調増加関数の場合、グラフが上に凸の区間では、初期値を区間の左端点にとれば、近似解は単調増加し真の解に収束する。またグラフが下に凸の区間では、初期値を区間の右端点に

とれば、近似解は単調減少し真の解に収束する。

$1 \leq Y_0 < 29$ あるいは $31 < Y_0$ では、 $L = f(Y_0)$ のグラフは、 $1 \leq Y_0 < \tilde{Y}_0$ および $31 < Y_0$ で上に凸、 $\tilde{Y}_0 < Y_0 < 29$ で下に凸である(図7参照)。ここに、 $\tilde{Y}_0 \doteq 26.1037$ は $L = f(Y_0)$ のグラフの変曲点の Y_0 座標である。そこで、われわれは初期値 $Y_{0, \text{init}}$ を

$$Y_{0, \text{init}} = \begin{cases} 1, & L < L_1 \text{ のとき,} \\ 29, & L_1 < L < L_2 \text{ のとき,} \\ 31, & L_3 < L \text{ のとき} \end{cases}$$

と設定することにした。ここに、

$$\begin{aligned} L_1 &= f(\tilde{Y}_0) \doteq -0.863141, \\ L_2 &= f(29) \doteq -0.320887, \\ L_3 &= f(31) \doteq 0.317685 \end{aligned}$$

である。

(b) Y から R' を求める方程式(16)について

つぎに、 Y を与えて R' を得る方程式(16)について考える。

R' - Y のグラフは、 R' のすべての区間で単調増加であり、垂直になる点がない。したがって、区間を限定しないで Newton-Raphson 法が適用可能である。図8に、 R' - Y のグラフを実線で示す。

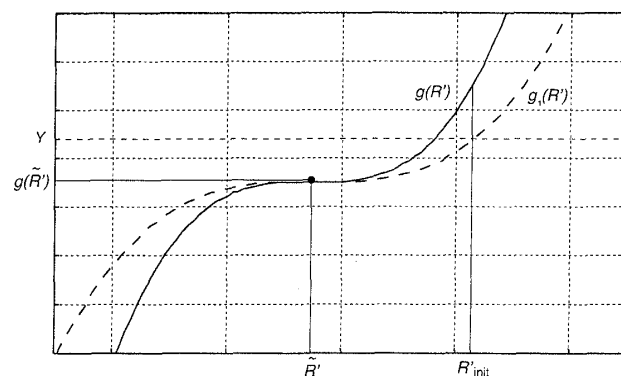


図8 関数 $g(R')$ と Newton-Raphson 法の初期値 R'_{init} を得るための近似関数 $g_1(R')$

しかし、アルゴリズム中のこの部分は、 K の値の修正反復の際毎回実行されるので、計算速度を早める必要がある。そこで、なるべく解に近い値を初期値とし、Newton-Raphson 法における反復回数を減らすことを試みる。

与えられた Y に対し解に近い初期値 R'_{init} を得るには、

次のようにする. 式(16)の右辺の関数を

$$g(R') = 0.3599(R')^3 + 0.6401(R' + a')^3 \quad (17)$$

とおくとき, $g(R')$ に近い値をとる関数でかつ簡単に逆関数が得られる関数 $g_1(R')$ を作り, $R'_{\text{init}} = g_1^{-1}(Y)$ とする. ところで, $g(R')$ は, $\tilde{R}' = -0.6401a'$ とおくとき, $R' > \tilde{R}'$ では下に凸, $R' < \tilde{R}'$ では上に凸である. そこで, 大域的収束性を保証するため, $R' > \tilde{R}'$ では $g(R') > g_1(R')$, $R' < \tilde{R}'$ では $g(R') < g_1(R')$ を満たすようにする.

このような条件を満たす関数として, 次を示す関数

$$g_1(x) = (x - \tilde{R}')^3 + g(\tilde{R}') \quad (18)$$

を採用する(図8の破線). このとき g_1 の逆関数は

$$g_1^{-1}(y) = [y - g(\tilde{R}')]^{\frac{1}{3}} + \tilde{R}'$$

で与えられる. 初期値 R'_{init} は, 与えられた Y に対し,

$$\begin{aligned} R'_{\text{init}} &= g_1^{-1}(Y) \\ &= [Y - g(\tilde{R}')]^{\frac{1}{3}} + \tilde{R}' \end{aligned} \quad (19)$$

で計算する.

4. 変換アルゴリズムの評価

前節のアルゴリズムをC言語で実現し, Unix上に実装して, 変換の精度および速度の評価を行った. コンパイラはgccを用いた.

4.1 変換精度に対する検討

文献[3]には, OSA色票 558 個の (L, j, g) 表色値に対応する (Y, x, y) の規定値が記載されている. 当初, この規定値との比較により変換精度を調べようと試みたが, これらの値の多くは, 定義式による計算値と, 2~3桁の精度でしか一致しないことがわかった(付録に詳しく述べる).

そこで, 次のような方法で変換精度のチェックを行なうことにした(図9参照). 与えられた (L, j, g) に対し, まずOSA-XYZ変換を適用し (X, Y, Z) を得る. つぎに, この (X, Y, Z) にXYZ-OSA変換を施し再びOSA表色値 (L', j', g') を得る. こうして得た (L', j', g') ともとの (L, j, g) とのOSA色差 ΔE を

$$\Delta E = \sqrt{2(L' - L)^2 + (j' - j)^2 + (g' - g)^2} \quad (20)$$

により計算し, 変換精度を検討する.

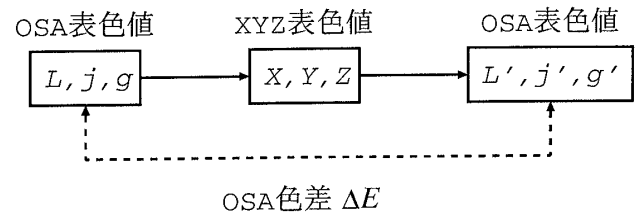


図9 アルゴリズムの精度の評価方法

文献[3]の 558 個の (L, j, g) に対して OSA-XYZ-OSA 変換を行ったときの ΔE の平均値, 最大値, および最小値を, L ごとに分類し表1に示す. ここに, OSA-XYZ変換アルゴリズムにおける反復終了判定の定数は, $\varepsilon = 1.0 \times 10^{-7}$ とした.

表1 OSA-XYZ-OSA変換における色差

L	データ数	平均色差	最大色差	最小色差
-7	6	0.0007	0.0009	0.0005
-6	17	0.0007	0.0012	0.0002
-5	24	0.0008	0.0014	0.0002
-4	29	0.0008	0.0014	0.0002
-3	39	0.0009	0.0016	0.0003
-2	47	0.0010	0.0019	0.0001
-1.5	16	0.0012	0.0014	0.0010
-1	64	0.0011	0.0018	0.0002
-0.5	24	0.0012	0.0016	0.0011
0	69	0.0025	0.0044	0.0009
0.5	24	0.0014	0.0017	0.0012
1	65	0.0013	0.0021	0.0005
1.5	16	0.0015	0.0017	0.0013
2	45	0.0013	0.0021	0.0006
3	37	0.0013	0.0020	0.0007
4	28	0.0015	0.0020	0.0009
5	8	0.0017	0.0020	0.0014
計	558			

ΔE は, 高々小数以下3桁目に0でない値が現われる程度であり, 実用上は十分であるといえる.

なお, 表1をよく見ると, $L = 0$ のとき, 他の L に比べ平均および最大色差が大きくなっているが, これは変換アルゴリズムの問題ではなく, 次に説明するように, OSA表色系の定義式そのものに原因がある.

$L = 0$ は $Y_0 = 30$ に対応している. 式(4)において, Y_0 が 30 から微小数 ε だけずれたとし, $Y_0 = 30 + \varepsilon$ とおくと,

$$L \sim \frac{5.9 \times 0.042}{\sqrt{2}} \times \varepsilon^{\frac{1}{3}}$$

となる。ここで、たとえば $\varepsilon = 10^{-3}$ (千分の一) とすると L に与える影響は $\varepsilon = 10^{-1}$ (十分の一) となる。すなわち、 $Y_0 = 30$ においては誤差が $1/3$ 乗に拡大されるが、これは L の定義に crispening 効果を表すために $(Y_0 - 30)^{1/3}$ の項を取り入れたことに由来するものである。

4.2. 変換速度に対する検討

精度調査に用いた 558 個の規定値に対し、表色値変換を 20 回繰り返し (計 11160 回の変換)、変換速度を計測した。実行時に使用した計算機の CPU は Pentium III 500 MHz である。実行時間は表 2 のようになった。

表 2 11160 回の変換に対する実行時間

	実行時間 (sec)	
	入出力含む	入出力除く
XYZ-OSA 変換	0.49	0.10
OSA-XYZ 変換	1.00	0.51

この結果は、たとえば 1000×1000 画素の画像のすべての色値に対し変換を行なった場合 (ファイルへの入出力時間は除く)、XYZ-OSA 変換には約 9 秒、OSA-XYZ 変換に約 46 秒かかることを意味している。このことから、計算速度の点でも実用に耐え得るといえる。

なお、 K の修正反復の回数は表 3 のようになった。1 回の OSA-XYZ 変換に対する反復は平均 4.6 回である。色票の規定値だけでなくスペクトル色のような広範囲の色に対しても OSA-XYZ 変換を試みたが、 K の値はいずれも少ない回数で収束することが確認できた。

表 3 K に関する反復回数

反復回数	2	3	4	5	6	7	8	9	10
個数	8	66	241	130	71	22	14	5	1

5. OSA-XYZ 変換の使用例

OSA から XYZ への変換アルゴリズムによって、任意の OSA 表色値に対する XYZ 値を求めることが可能になる。本節では、OSA-XYZ 変換を利用し、OSA 表色値を他の表色系で表わす例を二つ示す。

ところで、OSA から変換される XYZ 値は、 D_{65} 照明

光 10° 視野の視環境における値であることに注意する必要がある。したがって、XYZ 値からさらに他の表色系の色値へ変換する場合、視環境の違いに配慮しなければならない。たとえば、Munsell 表色系の表色値に対応する XYZ 値は、C 照明光 2° 視野における値が規定されている。したがって、OSA 表色値を Munsell 表色値に変換する場合には、OSA から (X_{10}, Y_{10}, Z_{10}) へ変換した後、本来は、 D_{65} 照明光 10° 視野で (X_{10}, Y_{10}, Z_{10}) となる色と同じ見えを与える C 照明光 2° 視野の下の色の (X, Y, Z) を求め、それから Munsell 表色値へ変換しなければならない。

しかし、視環境が異なる場合の対処については適切な方法が確立していない。そこでわれわれは、D. Nickerson による OSA 表色値の Munsell 色空間へのプロット [12] にならって、以下では、視環境の違いをあえて考慮せず、OSA-XYZ 変換で得た XYZ 値をそのまま用いて他の表色系の値へ変換するという、もっとも単純な方法による結果を示す。もちろん、視環境の違いを無視しているため、OSA 表色系と他の表色系の対応する色が、必ずしも同じ見えを与えるとは言えないが、表色系のおおまかな対応をみるには役立つであろう。

5.1 OSA 上の軌跡を他の色空間に表示

OSA 表色系における色相角 h およびクロマ c を、文献 [13] にならってそれぞれ

$$h = \tan^{-1}(g/j)$$

および

$$c = \sqrt{j^2 + g^2}$$

で定義する。

OSA の j - g 座標において、 $c=1$ から $c=9$ まで (2 刻み) の等 c 線と、 $h=0^\circ$ から 15° 刻みの等 h 線上の点を、XYZ (xy 色度)、CIELAB, CIELUV, NCS, および Munsell の各表色系の値に変換し、それぞれの色空間上にプロットした。図 10 に、 $L=0$ の場合の軌跡を示す。

同様に、OSA の等 j 線および等 g 線を種々の色空間上にプロットしたものを図 11 に示す。

5.2 カテゴリカルカラーの分布

カテゴリカルカラーの分野では、OSA 色票を用いた Boynton らによる実験結果 [6] がよく利用されている。

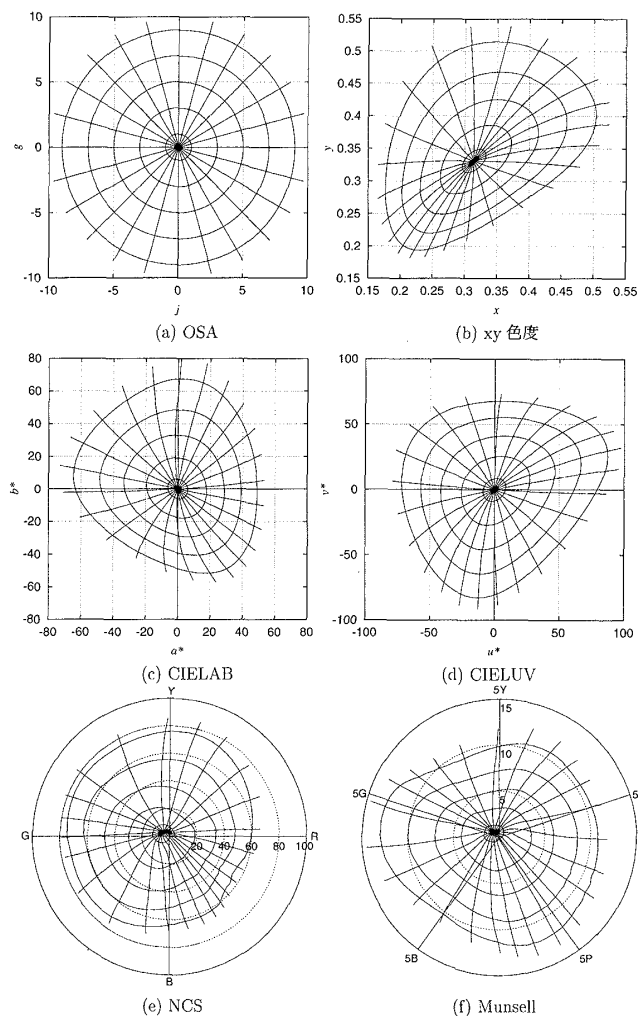


図10 各表色系におけるOSAの等 h 線と等 c 線 ($L=0$ の場合)

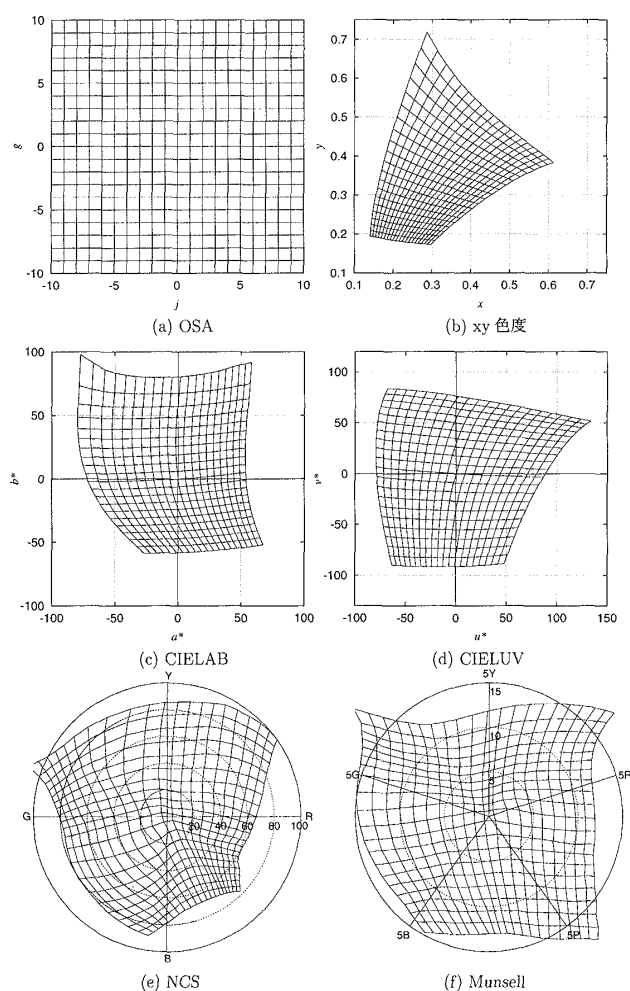


図11 各表色系におけるOSAの等 j 線と等 g 線 ($L=0$ の場合)

る。ここでは、その実験データのうち、各カテゴリーの重心(7人の被験者による選択回数で重み付けした表色値の平均)の値を、Munsell表色系およびNCS表色系の値へ変換した。表4および図12に、各カテゴリーの重心の値およびその分布を示す。(各表色値の対応は、前述したように視環境の違いを無視しているため、おおまかな対応であることに注意しておく。)

6. おわりに

OSAからXYZへの解析的、直接的な高速変換アルゴリズムを提案した。このアルゴリズムは、評価の結果、実用的であることがわかった。

変換アルゴリズムをより高速化するために、 R' の方程式として式(3)を解く方法を検討することなどが、残された課題である。

表4 各カテゴリーの重心の表色値

色名 (略号)	OSA			NCS			Munsell		
	L	j	g	s	c	ϕ	H	V	C
Red (R)	-3.6	1.5	-6.9	34.1	55.2	Y98R	4.5R	4.0	8.3
Green (G)	-0.4	3.9	2.5	28.6	42.4	G36Y	7.2GY	6.1	5.4
Orange(O)	-0.2	5.7	-6.3	18.3	65.3	Y56R	2.2YR	5.8	10.1
Purple (P)	-2.5	-2.5	-1.8	50.7	19.7	R54B	5.3P	4.7	3.5
Gray (Gy)	-1.3	0.3	0.1	50.7	6.76	G44Y	6.3GY	5.5	1.0
Pink (Pi)	0.5	0.3	-4.9	26.0	32.4	R04B	2.1R	6.1	5.8
Black (Bk)	-6.2	-0.5	0.5	81.1	7.95	B70G	5.0BG	2.7	1.2
White (Wt)	4.0	1.7	-0.3	16.5	10.3	G89Y	9.0Y	8.3	1.9
Brown (Br)	-3.2	2.8	-2.9	53.4	30.0	Y49R	4.7YR	4.4	4.7
Yellow (Y)	2.6	8.2	-1.7	15.5	57.2	Y12R	2.1Y	7.5	8.8
Blue (B)	-0.8	-2.5	2.8	33.6	33.6	B33G	2.1B	5.6	4.7

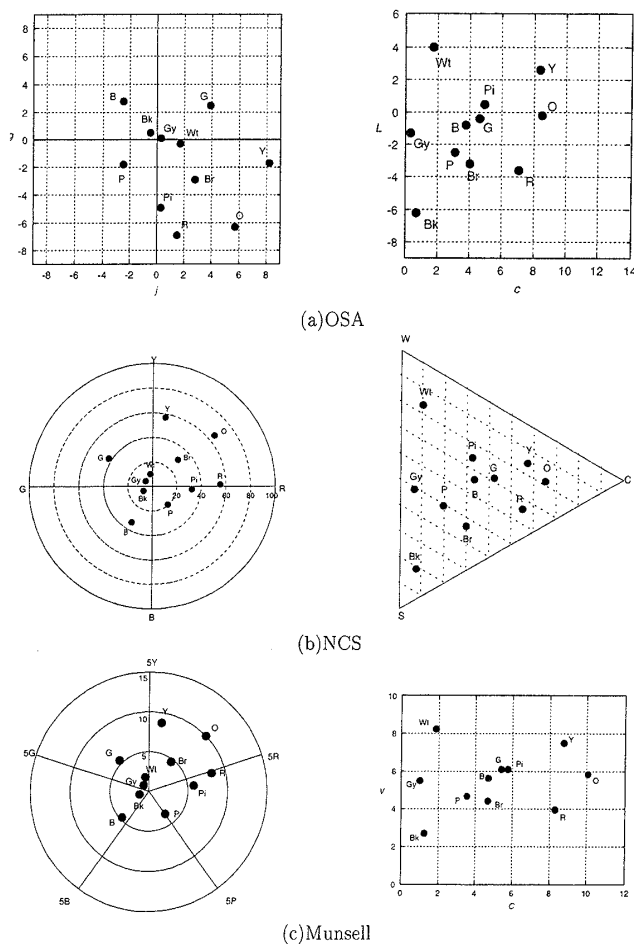


図12 各カテゴリにおける重心の分布

参考文献

- [1] D.Nickerson: History of the OSA committee on Uniform Color Scales, Optics News/Winter 1977, pp.8-17(1977).
- [2] David L.MacAdam: Uniform color scales, J. Opt. Soc. Am., Vol. 64, No.12, pp. 1691-1702(1974).
- [3] David L. MacAdam: Colorimetric data for samples of OSA uniform color scales, J. Opt. Soc. Am., Vol. 68, No.1, pp.121-130 (1978).
- [4] C.L. Sanders and G. Wyszecki: L/Y ratios in terms of CIE-chromaticity coordinates, J. Opt. Soc. Am., Vol. 48, No.6, pp.389-392(1958).
- [5] C.C. Semmelroth: Prediction of lightness and brightness on different backgrounds, J. Opt. Soc. Am., Vol. 60, No. 12, pp.1685-1689(1970).
- [6] Robert M. Boynton and Conrad X. Olson: Locating basic colors in the OSA space, Color Res. Appl., Vol.12, No.2, pp.94-105(1987).
- [7] Rolf G. Kuehni: Uniform color space modeled with cone responses, Color Res. Appl., Vol. 25,

No.1, pp.55-63 (2000).

- [8] N. S. Smith: A colour notation conversion program revisited, Color Res. Appl., Vol.17, No. 6, pp.405-409 (1992).
- [9] 小林光夫, 関宏市郎: OSA表色系からXYZ表色系への色値変換アルゴリズム, カラーフォーラム JAPAN 2000 論文集, pp.103-106 (2000).
- [10] G.Dahlquist and Å. Björck: Numerical methods, Prentice-Hall, Inc., 1974.
- [11] P. Henrici: Elements of numerical analysis, John Wiley & Sons, Inc., 1963.
- [12] D. Nickerson: Uniform color scales: Munsell conversion of OSA committee selection, J. Opt. Soc. Am., Vol. 65, No. 2, pp. 205-207 (1974).
- [13] N.S.Smith, T. W. A. Whitfield and T. J. Wiltshire: The accuracy of the NCS, DIN, and OSA-UCS colour atlases, Color Res. Appl., Vol. 15, No. 2, pp. 111-116 (1990).
- (受付日 2001年1月15日)

付録A OSA色票の規定値について

文献[3]に記載されたOSA色票の対応表の値が、定義式と一致しているかどうかを確認するため、次のことを行なった。

本来の (L, j, g) と、それに対応する規定値 (Y, x, y) から定義にしたがって計算した値 (L', j', g') とのOSA色差を調べ、 L ごとに平均、最大、および最小色差を求めたところ、表A1のようになった。

誤差は、いずれも0に近いものと期待したが、実際は、ほとんどのデータに対し小数点以下1桁目までしか0にならないことがわかった。

さらに誤差の傾向をみるために、全色票に対する (L, j, g) の各成分の誤差 $\Delta L, \Delta j, \Delta g$ およびOSA色差 ΔE を調べた。その結果、3成分のうち g の誤差がもっとも大きく、 ΔE へ影響していることがわかった。より詳細に調べたところ、 g の誤差は、 $L > 0$ のときは $j+g$ が大きくなるにつれて大きく、 $L < 0$ のときは $|j-g|$ が大きくなるにつれて大きくなる傾向があった。また、 L と j の誤差が大きい点は、 $L=0$ および $L=0$ 以外の数ヶ所であった。

このうち $\Delta E > 0.05$ のものを表A2に挙げる。 $L=0$ で誤差が大きくなるのは4.1節で述べたとおりであるが、 $L=0$ 以外で突出して誤差の大きい2点については、表の値に誤りがある可能性も考えられる。

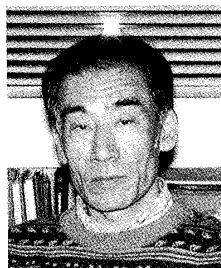
表A1 OSA変換における色差

L	データ数	平均色差	最大色差	最小色差
-7	6	0.0103	0.0137	0.0058
-6	17	0.0222	0.2094	0.0041
-5	24	0.0181	0.0954	0.0058
-4	29	0.0112	0.0260	0.0017
-3	39	0.0112	0.0246	0.0013
-2	47	0.0176	0.0633	0.0045
-1.5	16	0.0069	0.0131	0.0030
-1	64	0.0126	0.0338	0.0015
-0.5	24	0.0075	0.0167	0.0026
0	69	0.0362	0.0624	0.0090
0.5	24	0.0071	0.0133	0.0014
1	65	0.0142	0.0407	0.0016
1.5	16	0.0068	0.0138	0.0026
2	45	0.0182	0.0423	0.0031
3	37	0.0187	0.0423	0.0041
4	28	0.0162	0.0398	0.0019
5	8	0.0129	0.0243	0.0043
計	558			

表A2 計算値との誤差が大きいOSA色票値

元の OSA 値			計算した OSA 値			誤差
L	j	g	L'	j'	g'	ΔE
-6.0	2.0	-6.0	-5.8560	1.9903	-6.0476	0.2094
-2.0	6.0	4.0	-1.9567	6.0037	3.9842	0.0633
0.0	-4.0	4.0	0.0351	-4.0154	4.0290	0.0595
0.0	-2.0	4.0	0.0301	-2.0054	4.0265	0.0504
0.0	0.0	-8.0	0.0269	-0.0012	-8.0337	0.0508
0.0	0.0	-2.0	0.0342	-0.0002	-2.0158	0.0509
0.0	4.0	-8.0	0.0284	4.0136	-8.0458	0.0624
0.0	6.0	-4.0	0.0288	6.0169	-4.0369	0.0575
0.0	8.0	-4.0	0.0214	8.0183	-4.0387	0.0524
0.0	8.0	-2.0	-0.0273	7.9809	-2.0270	0.0508

著者紹介

こばやしみつお
小林光夫

1941年1月13日生

1966年東京大学大学院工学系研究科修了博士(工学,東京大学). 電気通信大学情報通信工学科教授. 日本色彩学会, 情報処理学会, 日本応用数理学会, 他会員.

せきこういちろう
関宏市郎

1975年7月7日生

2001年電気通信大学大学院情報工学専攻修了. 工学修士. 2001年4月より株式会社マイオクリエイティブに勤務. 日本色彩学会会員.

よしき かよこ
吉識香代子

1971年8月1日生

1996年電気通信大学大学院情報工学専攻修了. 工学修士. 現在, 電気通信大学情報通信工学科色彩情報学研究室に勤務. 日本色彩学会会員.