

CIEDE2000 色差式を用いたデジタルシネマ画像の 所要ビット長の評価

古川 功*・鈴木 純司**

(平成24年8月13日付)

Evaluation of Required Bit Depth for Digital Cinema using CIEDE2000 Color Difference Model

Isao FURUKAWA and Junji SUZUKI

(Received Aug. 13, 2012)

Abstract

Several color difference models have been specified by CIE, and amongst them the CIE 1976 $L^*a^*b^*$ model is widely used in various industry applications for its simplicity. However, it should be needed to investigate the underlying parameters, such as quantization bit depth and gamma value, for emerging high quality imaging systems by means of the newer CIEDE2000 mode. This paper comparatively discusses the required bit depth for digital cinema applications using the both of CIE 1976 $L^*a^*b^*$ and CIEDE2000 color models. The simulation results show that the required bit depths obtained from these two color difference models approximately coincide with each other, so that the design method proposed by the authors with CIE 1976 $L^*a^*b^*$ model enables to predict the required bit depth for high quality imaging systems in a simple manner.

Key Words: digital cinema, quantization bit depth, color difference, CIE 1976 $L^*a^*b^*$, CIEDE2000

1. はじめに

近年、撮像装置と画像表示装置の高性能化に伴い、デジタルシネマ等を含む画像システムの高品質化が急速に進展している。デジタルカラー画像はオリジナル画像を画素単位で量子化して得られるため必ず量子化誤差が発生し、それはオリジナルのカラー画像との間に色差を生じさせる。この色差の評価式はCIEによって検討されてきており、現在までにいくつかの色差評価モデルが規定されている [1]。その中でも、CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色差モデルの評価式 [2] はその簡潔さから様々な分野で応用されていると共に、量子化誤差による色差評価を解析的に取り扱い、色差が検知できないための所要量子化ビット長の検討も行われている [3]。しかしながら、CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色差空間

は完全な均等色差空間ではないため、その後に改良されたCIE1994色差モデルやCIEDE2000色差モデル [4] の適用が厳密な色差評価にとって必要となってきた。特に近年急速に普及し始めているデジタルシネマは、画像品質への要求条件が高く、CIE XYZ信号を12ビットでガンマ量子化 ($\gamma=2.6$) することがDCI (Digital Cinema Initiative) 規格によって規定されている [5]–[7]。

本稿では、デジタルシネマを高品質画像アプリケーションの一つとして設定し、従来のCIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色差モデルを用いた際の所要量子化ビット長に対して解析的に得られている結果を、より新しいCIEDE2000色差モデルを用いて得られる結果と比較し、解析結果の妥当性を検証する。CIEDE2000色差モデルは、評価対象の色差が特に小さい場合に有効であるが [8]、計算式はCIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色

* 広島工業大学情報学部情報工学科

** 愛知県立大学情報科学部情報科学科

差モデルと比較して複雑であり、所要量子化ビット長を解析的に求めるための検討は行われていない。従って、量子化ビット長を与えた時に生じる最大色差の評価は、3次元カラー空間内の全ての隣接する量子化点間でCIEDE2000色差評価式を用いて網羅的に評価することが求められ、これに必要な計算負荷は量子化ビット長が増加すると急激に増加するという問題点がある。そこで、CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色差モデルを用いて解析的に得られる結果から、CIEDE2000 色差モデルによる評価結果がある程度予測できるとすれば、こうした所要量子化ビット長の大きな高品質画像システムの設計に寄与するものと考えられる。

以下、2. ではCIEによって規定されているいくつかの色差評価式について概要を述べる。3. ではCIEDE2000 色差の計算方法を、具体的な演算手順として記述する。4. では、デジタルシネマを対象として、CIE 1976 $L^*a^*b^*$ とCIEDE2000 それぞれの色差評価モデルを適用した場合に得られる所要量子化ビット数について比較検討する。5. はまとめである。

2. 色差評価式

CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色空間内の座標 (L^*, a^*, b^*) は、CIE XYZ 空間の3刺激値 X, Y, Z を参照白色点 Y_n によって正規化した値を x, y, z とすると、以下の式で定義される [2]。

$$\left. \begin{aligned} L^* &= 116f(y) - 16 \\ a^* &= 500\{f(x) - f(y)\} \\ b^* &= 200\{f(y) - f(z)\} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、関数 f は、

$$f(w) = \begin{cases} w^{1/3}, & \text{if } (24/116)^3 < w \leq 1 \\ (1/3)(116/24)^2 w + (16/116), & \text{if } w \leq (24/116)^3 \end{cases} \quad (2)$$

である。この時、CIE $L^*a^*b^*$ のクロマ C_{ab}^* と色相角 h_{ab} は、それぞれ以下の式で定義される。

$$C_{ab}^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (3)$$

$$h_{ab} = \tan^{-1}(b^*/a^*) \quad (4)$$

以上より、CIE $L^*a^*b^*$ 空間内の2点 (L_1^*, a_1^*, b_1^*) と (L_2^*, a_2^*, b_2^*) の間の明るさの差 ΔL^* 、クロマの差 C_{ab}^* 、色差 ΔE_{ab}^* 、色相の差 ΔH_{ab}^* は、それぞれ以下のように計算される。

$$\Delta L^* = L_1^* - L_2^* \quad (5)$$

$$\Delta a = a_1^* - a_2^* \quad (6)$$

$$\Delta b = b_1^* - b_2^* \quad (7)$$

$$\Delta C_{ab}^* = C_{ab,1}^* - C_{ab,2}^* \quad (8)$$

$$\Delta E_{ab}^* = \left\{ (\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right\}^{1/2} \quad (9)$$

$$\Delta H_{ab}^* = \left\{ (\Delta E_{ab}^*)^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C_{ab}^*)^2 \right\}^{1/2} \quad (10)$$

1976年にCIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色空間が規定された後も、色差の研究は継続して行われ、実験データの予測をより正確に行うためには、明るさ、クロマ、色相内の差に異なる重み付けを行うことが有効であることが示された。また、CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色空間を用いた場合の様々な色差比較実験間の不一致は、主に実験条件の違いに起因していることが認識されたため、色差実験が実施された参照条件の規定を含むことが承認された。こうして得られた色差モデルがCIE1994 色差モデルであり、このモデルを用いて評価される色差 ΔE_{94}^* は、以下の式で与えられる [9]。

$$\Delta E_{94}^* = \left\{ \left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C_{ab}^*}{k_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{ab}^*}{k_H S_H} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (11)$$

ここで、

$$S_L = 1 \quad (12)$$

$$S_C = 1 + 0.045 C_{ab}^* \quad (13)$$

$$S_H = 1 + 0.015 C_{ab}^* \quad (14)$$

であり、 C_{ab}^* は標準サンプルのクロマである。もし、どちらのサンプルも標準とは考えられない場合には、 C_{ab}^* は2つのサンプルのクロマの幾何平均とする。上で定義された参照条件における k_L, k_C, k_H の定数は1に設定される。

CIE1994 モデルの策定後から様々な条件での検証が行われ、いくつかの問題点が明らかとなった。修正すべきポイントとして挙げられた項目は、以下のとおりである [1]。

- i) 一定色相時の知覚的な非線形性を補正し、色空間内の青領域に対する色差計算の正確さを期すため、色相とクロマの間の相互作用項を考慮する必要がある。
- ii) 低クロマ（グレイ）カラーの特性を改善するために、CIELAB a^* 項を補正するためのスケール係数を導入する必要がある。
- iii) 知覚される色相差を補正するために、色相依存の関数を含める必要がある。

上記 i) ~ iii) の条件を取り入れて、CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 評価式を改善した色差が、2001年に策定されたCIEDE2000である。CIEDE2000は、特に評価すべき色差が小さい場合の色差の予測を大きく改善する。CIEDE2000の基本はあくまでCIE $L^*a^*b^*$ 色空間であり、CIE $L^*a^*b^*$ 空間内の2点 (L_1^*, a_1^*, b_1^*) と (L_2^*, a_2^*, b_2^*) の間の色差 ΔE_{00} を評価する形となっている。従って、 ΔE_{00} は2つのCIE $L^*a^*b^*$ カラー値 (L_i^*, a_i^*, b_i^*) (但し、 $i = 1, 2$) を入力として用いて、さらにアプリケーションに応じた重み付け係数 k_L, k_C, k_H を与え

ば計算を行うことができる。これを計算式で示せば、以下のように表される [10], [11]。

$$\Delta E_{00} = \Delta E(L_1^*, a_1^*, b_1^*; L_2^*, a_2^*, b_2^*) = \left\{ \left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H} \right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C} \right) \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H} \right) \right\}^{1/2} \quad (15)$$

ここで、 $\Delta L'$, $\Delta C'$, $\Delta H'$ はそれぞれ CIEDE2000 モデルによって色差を計算する際の明度、クロマ、色相であり、 R_T は青色の色差計算に対応した回転関数、 S_L, S_C, S_H はスケリング関数、 k_L, k_C, k_H はそれぞれ明度、クロマ、色相に対する重み付けパラメータで、ほとんどのアプリケーションでは 1 に設定される。本稿での計算機シミュレーションにおいても、 $k_L = k_C = k_H = 1$ としている。式 (15) の具体的な計算手順は次節で述べる。

3. CIEDE2000 の色差 ΔE_{00} の計算法

CIEDE2000 によって定義される色差 ΔE_{00} の計算手順は、図 1 に示すフローチャートのように、STEP-1 から STEP-6 の 6 段階に分割される。この計算手順 STEP-1~STEP-6 による CIEDE2000 計算のための演算詳細の疑似コードを以下に示す。なお、 π は円周率、 e は自然対数の底

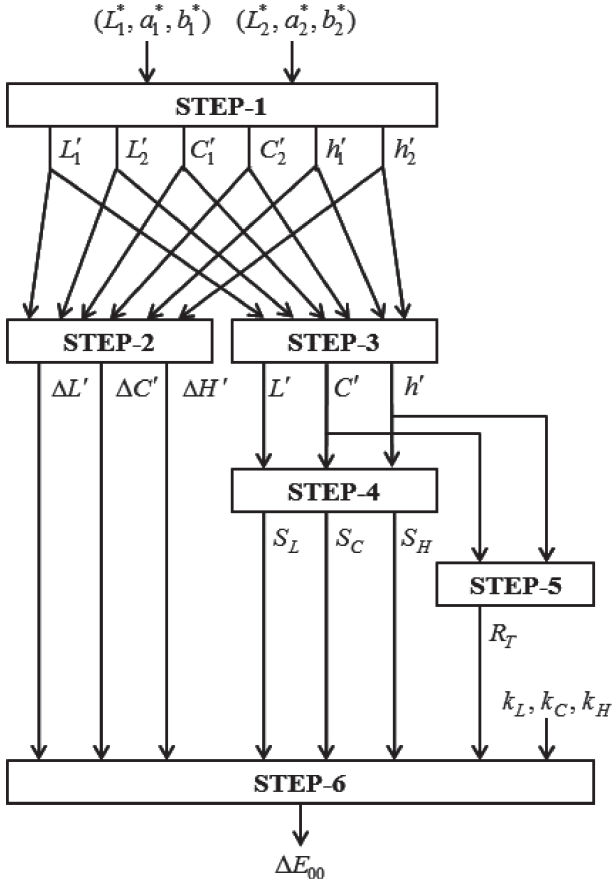


図 1 ΔE_{00} を計算する手順

であり、ここで使用されている関数は、以下の通りである。

- sqrt(x): \sqrt{x}
- pow(x, y): x^y
- exp(x): e^x
- abs(x): $|x|$
- tan⁻¹(x): x の逆正接関数
- sin(x): x の正弦関数
- cos(x): x の余弦関数

STEP-1

内容：低クロマカラーの色差知覚を補正するために、CIELAB の a^* 項を調整する。この補正は、クロマ平均値に修正ガウシアン曲線を適用して行われる。 a^* の修正値 a' を求めると共に修正されたクロマ C' と修正された色相 h' を求める。 $L_1^*, L_2^*, b_1^*, b_2^*$ は修正せず、それぞれ L'_1, L'_2, b'_1, b'_2 とする。

入力： $L_1^*, a_1^*, b_1^*, L_2^*, a_2^*, b_2^*$

出力： $L'_1, L'_2, C'_1, C'_2, h'_1, h'_2$

演算：

```

Ciab = sqrt(ai* * ai* + bi* * bi*), for i = 1, 2
Cab = (C1ab + C2ab) / 2
Cab7 = pow(Cab, 7)
G = 0.5 * (1 - Cab7 / (Cab7 + pow(25, 7)))
Li' = Li*, for i = 1, 2
ai' = (1 + G) * ai*, for i = 1, 2
bi' = bi*, for i = 1, 2
Ci' = sqrt(ai* * ai* + bi* * bi*), for i = 1, 2
if((ai' == 0) && (bi' == 0)) hi' = 0, for i = 1, 2
else hi' = (180 / π) * tan-1(bi' / ai'), for i = 1, 2
if(hi' < 0) hi' + = 360, for i = 1, 2
    
```

STEP-2

内容： a^* が修正された空間内での輝度差 $\Delta L'$ 、クロマ差 $\Delta C'$ 、色相差 $\Delta H'$ を求める。 h' の計算において使用される単位はラジアンではなく、度である。また、 $\Delta h'$ の取り得る値の範囲は、 -180° から $+180^\circ$ の範囲内に限定される。

入力： $L'_1, L'_2, C'_1, C'_2, h'_1, h'_2$

出力： $\Delta L', \Delta C', \Delta H'$

演算：

```

ΔL' = L2' - L1'
ΔC' = C2' - C1'
if(C1' * C2' == 0) ΔH' = 0
else {
    if(abs(h2' - h1') < = 180) Δh' = h2' - h1'
    else if((h2' - h1') > 180) Δh' = h2' - h1' - 360
    }
    
```

```

else if((  $h'_2 - h'_1$ ) < -180)  $\Delta h' = h'_2 - h'_1 + 360$ 
}
 $\Delta H' = 2 * \text{sqrt}(C'_1 * C'_2) * \sin((\pi/180) * (\Delta h'/2))$ 

```

STEP-3

内容：CIELAB の輝度 L'_i 、修正されたクロマ C'_i 、修正された色相 h'_i (いずれも $i=1, 2$) の算術平均を計算する。この時、STEP-2 で行ったのと同様に、色相差 $h'_1 - h'_2$ の大きさを 180° と比較する場合分け計算を行う。

入力： $L'_1, L'_2, C'_1, C'_2, h'_1, h'_2$

出力： L', C', h'

演算：

$$L' = (L'_1 + L'_2) / 2$$

$$C' = (C'_1 + C'_2) / 2$$

$$\text{if}(C_1 * C_2 = 0) \quad h' = h'_1 + h'_2$$

else {

$$\text{if}(\text{abs}(h'_1 - h'_2) \leq 180) \quad h' = (h'_1 + h'_2) / 2$$

$$\text{else if}((h'_1 + h'_2) < 360) \quad h' = (h'_1 + h'_2 + 360) / 2$$

$$\text{else if}((h'_1 + h'_2) \geq 360) \quad h' = (h'_1 + h'_2 - 360) / 2$$

}

STEP-4

内容：CIELAB 空間内の輝度、クロマ、色相の間の知覚される色差を調整するための重み付け関数 S_L, S_C, S_H を計算する。ここで、 S_H の計算には、色相角の依存性を考慮した係数 T が用いられる。

入力： L', C', h'

出力： S_L, S_C, S_H

演算：

$$rd = \pi / 180$$

$$T = 1 - 0.17 * \cos(rd * (h' - 30)) + 0.24 * \cos(rd * (2 * h')) \\ + 0.32 * \cos(rd * (3 * h' + 6)) - 0.2 * \cos(rd * (4 * h' - 63))$$

$$LL' = (L' - 50) * (L' - 50)$$

$$S_L = 1 + 0.015 * LL' / \text{sqrt}(20 + LL')$$

$$S_C = 1 + 0.045 * C'$$

$$S_H = 1 + 0.015 * C' * T$$

STEP-5

内容：CIELAB の青領域 (位相角が 275° 周辺) は色相角に対して非線形性が高く、クロマと相互依存性があることが知られている。従って、この相互依存性を補償するために回転関数 R_T を定義する。

入力： C', h'

出力： R_T

演算：

$$C'_7 = \text{pow}(C', 7)$$

$$R_C = 2 * \text{sqrt}(C'_7 / (C'_7 + \text{pow}(25, 7)))$$

$$d\theta = 30 * \exp(-\text{pow}((h' - 275) / 25, 2))$$

$$R_T = -\sin((\pi / 180) * 2 * d\theta) * R_C$$

STEP-6

内容：最終的な CIEDE2000 の色差 ΔE_{00} を計算する。

入力： $\Delta L', \Delta C', \Delta H', S_L, S_C, S_H, R_T, k_L, k_C, k_H$

出力： ΔE_{00}

演算：

$$L_P = \Delta L' / (k_L * S_L)$$

$$C_P = \Delta C' / (k_C * S_C)$$

$$H_P = \Delta H' / (k_H * S_H)$$

$$\Delta E_{00} = \text{sqrt}(L_P * L_P + C_P * C_P + H_P * H_P + R_T * C_P * H_P)$$

4. デジタルシネマに対する評価結果

DCIにおけるデジタルシネマ用カラー画像のデジタルデータは、CIE XYZ 色空間における γ 補正された12ビット値として与えられる。従って、CIE XYZ 空間の3刺激値 X, Y, Z の正規化値を x, y, z とすると、 x, y, z が N ビットで量子化されて各々の量子化インデックスが m_x, m_y, m_z であるとし、それぞれの量子化値が $\hat{x}(m_x), \hat{y}(m_y), \hat{z}(m_z)$ と表される場合、例えば $\hat{x}(m_x)$ は、最小値を ρ 、ガンマ値を γ として、以下のように表される [3], [12]。

$$\hat{x}(m_x) = \rho + (\Delta_g m_x)^\gamma, \quad 0 \leq m_x \leq 2^N - 1 \quad (16)$$

ここで、ガンマ量子化の場合の量子化ステップ幅 Δ_g は

$$\Delta_g = \frac{(1 - \rho)^{1/\gamma}}{2^N - 1} \quad (17)$$

である。

CIEDE2000 モデルに基づく色差 ΔE_{00} は、 $L^* a^* b^*$ 空間内の隣接量子化点を、以下のように量子化インデックスの差が最大で ± 1 となるように選んだ場合に計算される色差である。

$$\left. \begin{aligned} L_1^* &= L^*(m_x + \delta_x, m_y + \delta_y, m_z + \delta_z), L_2^* = L^*(m_x, m_y, m_z) \\ a_1^* &= a^*(m_x + \delta_x, m_y + \delta_y, m_z + \delta_z), a_2^* = a^*(m_x, m_y, m_z) \\ b_1^* &= b^*(m_x + \delta_x, m_y + \delta_y, m_z + \delta_z), b_2^* = b^*(m_x, m_y, m_z) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

ここで、 $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ は $(-1, 0, +1)$ の値を取り得る。但し、全てが同時に 0 となることはない。

以下では、式 (9) の ΔE_{ab}^* と、式 (15) の ΔE_{00} を計算機シミュレーションによって比較評価する。すなわち、全ての隣接する m_x, m_y, m_z に対して定義式から計算される色差を網羅的探索によって求め、その中で色差値が最大となる時のその色差値と、 $m_x, m_y, m_z, \delta_x, \delta_y, \delta_z$ の値、それらに対応する L^*, a^*, b^* の値を求める。これらの式で変数となっているのは、量子化ビット数 N と、 x, y, z の最小値 ρ 、ガンマ値 γ である。また、 $\hat{x}(m_x), \hat{y}(m_y), \hat{z}(m_z)$ は 1 に正規化された値であるので、最小値 ρ を用いる代わりにダイナミックレンジ Dr (すなわち、 $\rho=1/Dr$) を使用する。さらに、想定するアプリケーションがデジタルシネマであることから、 Dr の範囲は $10^{3.0} \sim 10^{4.0}$ 、 γ の範囲は $2.0 \sim 3.0$ とした。

図 2 に、一例として $\log_{10} Dr = 4.0, \gamma = 2.6, 2.9$ の場合における量子化ビット数に対する最大色差値 ΔE_{ab}^* と ΔE_{00} の値を示す。これより、 ΔE_{00} の最大値は ΔE_{ab}^* の最大値と比較して、この量子化ビット数の範囲内では約 28% ~ 43% 大きい値となっている。色差の検知限については、小松原

[13] によって約 1.2 であることが示されているが、ここでは最も厳しい条件として 1.0 を仮定する。その場合には同図より、従来 ΔE_{ab}^* に基づいて得られた所要量子化ビット数 $N=11$ の結果は変わらないことが明らかである。これ以外のダイナミックレンジと γ 値の組み合わせに対しても、 ΔE_{00} の最大値が 1 以下となるのは $\gamma=2.0$ の場合を除けば 11 ビット以上である ($\gamma=2.0$ の場合のみ 12 ビット以上)。最大色差が生じる 2 点間の量子化インデックスは、いずれの場合においても、 $(\delta_x, \delta_y, \delta_z) = (1, -1, 1)$ の位置関係にある。この位置関係を図 3 に示す。従って、最大色差が生じる L^*, a^*, b^* の対は、 m_x, m_y, m_z の 3 次元量子化インデックス空間において、サンプル点間の距離が $\sqrt{3}$ の場合に対応する。ガンマ値に対する最大色差が生じる量子化インデックス m_y の変化の様子を図 4 に示す。ここで、 $m_x = m_z = m_y - 1$ である。また、 $\log_{10} Dr = 3.2$ はフィルムスキャン画像のダイナミックレンジに相当する [14]。これより、最大色差値が生じる際の輝度値 L^* の値は、ダイナミックレンジ $\log_{10} Dr$ が 3.2 のとき γ が 2.6 以下の場合で、 $\log_{10} Dr$ が 4.0 のとき γ が 2.9 以下の場合で比較的低輝度であるが、 γ が 3.0 近傍ではより高輝度側にシフトし、特に ΔE_{ab}^* に関しては最大輝度値において最大色差値が得られている。

次に、最大色差値のガンマ値に対する依存性を調べる。理論検討によれば、信号のダイナミックレンジ $\log_{10} Dr$ が 3.0 ~ 4.0 の範囲においては、 ΔE_{ab}^* を最小化する γ の値は 2.9 ~ 3.0 の範囲におおよそ存在することが分かっている [3]。図 5 にガンマ値に対する最大色差値の変動の様子を示す。この結果より、 ΔE_{ab}^* と ΔE_{00} の最大値は γ 値が 2.9 ~ 3.0 の間で最小値を持ち、かつ γ が 3.0 に近づくほどダイナミックレンジに依存する差は減少していくことが分かる。従って、 ΔE_{ab}^* に対する理論式から得られる最適ガンマ値の結果は、 ΔE_{00} に対しても同様に成り立つと結論できる。

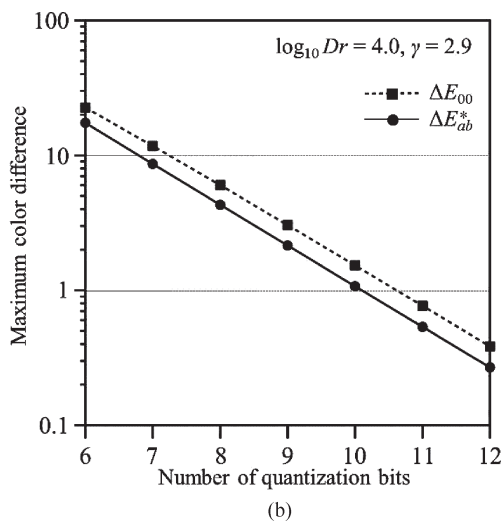
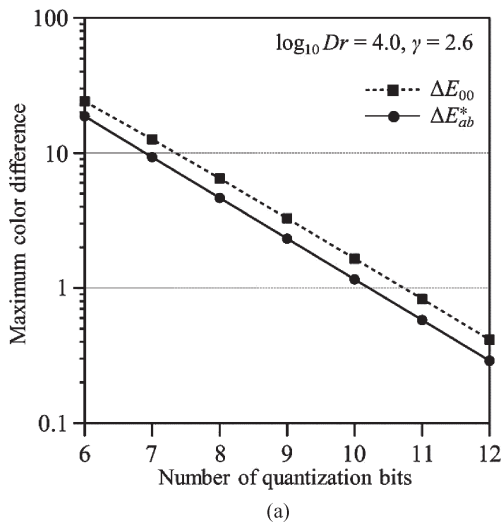


図 2 ガンマ量子化によって生じる最大色差 (a) $\gamma = 2.6$, (b) $\gamma = 2.9$

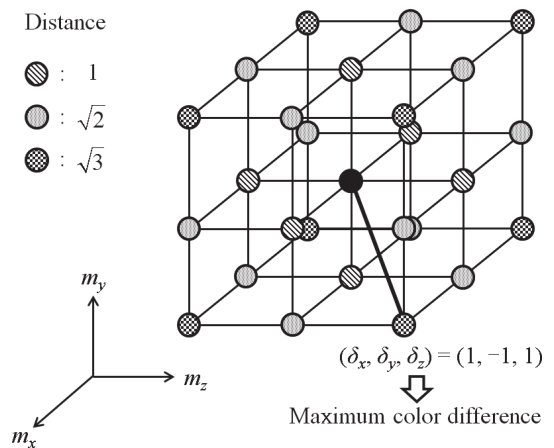


図 3 3次元量子化インデックス空間における最大色差が発生する位置

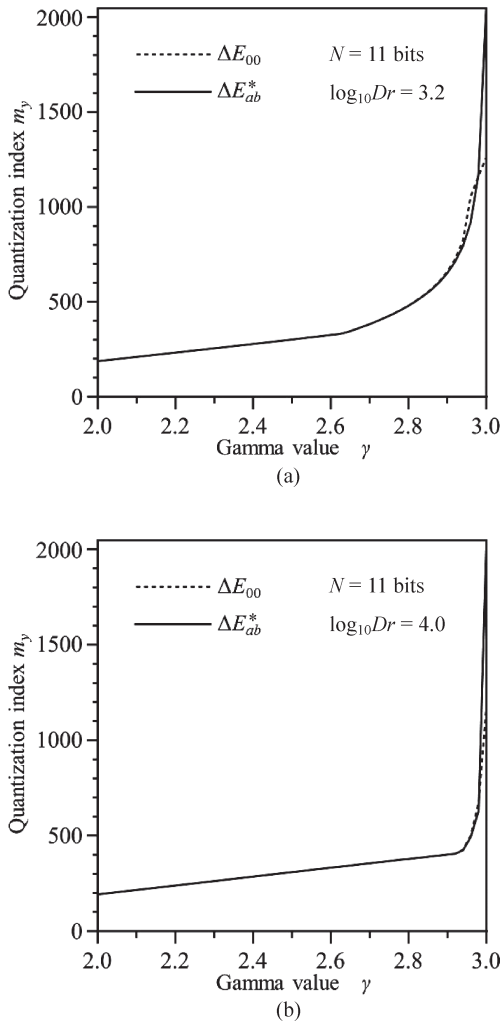


図4 最大色差が生じる量子化インデックス m_y
 (a) $\log_{10}Dr = 3.2$, (b) $\log_{10}Dr = 4.0$

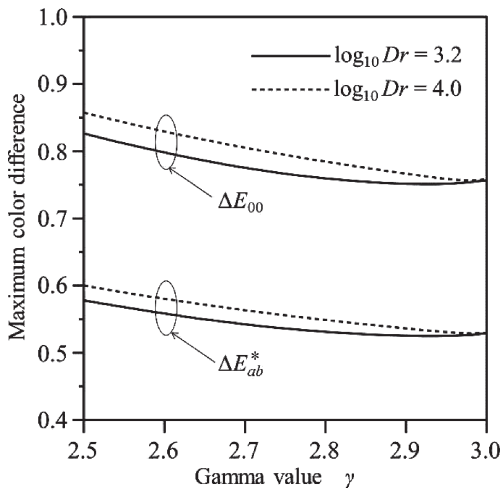


図5 ガンマ値と最大色差値との関係

5. まとめ

CIE 1976 $L^*a^*b^*$ モデルから得られる色差値 ΔE_{ab}^* と、CIEDE2000 モデルから得られる色差値 ΔE_{00} を、デジタルシネマに代表される高品質画像アプリケーションで用い

られると想定されるパラメータ範囲に対して計算機シミュレーションによる比較を行った。その結果、DCI規格で採用されているガンマ値である $\gamma = 2.6$ において、 ΔE_{ab}^* に対して得られていた理論式から導かれる所要量子化ビット長である11ビットという結果は、 ΔE_{00} に対しても同様に成り立つことが明らかになった。

CIEDE2000 の色差式を用いて所要量子化ビット数の評価を行うためには、3次元カラー空間内の隣接量子化点間の色差値を網羅的に探索する必要がある、特に高品質画像のように所要量子化ビット数が大きいアプリケーションのパラメータ設計に際しては現実的な時間内で計算を行うことは困難であるが、CIE 1976 $L^*a^*b^*$ の色差式に基づけば、これを一つの式で計算でき、設計が極めて容易となるため、ここで得られた結論は実用上の効果大きい。

今後は、実際の主観評価実験によって本シミュレーション検討結果の検証を行うことが課題として残されている。

文 献

- [1] H.-C. Lee, Introduction to Color Imaging Science, pp. 113-115, Cambridge University Press, 2005.
- [2] The Color Science Association of Japan, ed., Handbook of Color Science [Second Edition], University of Tokyo Press, 1998.
- [3] J. Suzuki and I. Furukawa, "Required number of quantization bits for CIE XYZ signals applied to various transforms in digital cinema systems," IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E90-A, No. 1, pp. 1072-1084, May 2007.
- [4] CIE, "Improvement to industrial colour-difference evaluation," Vienne: CIE Publication, No. 142-2001, Central Bureau of the CIE, 2001.
- [5] Digital Cinema Initiatives, "Digital cinema system specification," Ver. 1.2, Mar. 2008.
- [6] M. Cowan, G. Kennel, T. Maier and B. Walker, "Contrast sensitivity experiment to determine the bit depth for digital cinema," SMPTE Motion Imaging Journal, vol. 113, pp. 181-292, Sept. 2004.
- [7] G. Kennel, Color and Mastering for Digital Cinema, pp. 17-56, Elsevier Inc., 2007.
- [8] M. R. Luo, G. Cui and B. Rigg, "The development of CIE2000 color-difference formula: CIEDE2000," Color Research and Application, Vol. 26, No. 5, pp. 340-350, Oct. 2001.
- [9] R. S. Berns, Principles of Color Technology, Third Edition, pp. 120-121, John Wiley & Sons, 2000.
- [10] G. Sharma, W. Wu and E. N. Dalal, "The CIEDE2000

- color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations,” *Color Research and Application*, Vol. 30, No. 1, pp. 21–30, Feb. 2005.
- [11] G. Johnson and M. D. Fairchild, “A top down description of S-CIELAB and CIEDE2000,” *Color Research and Application*, Vol. 28, No. 6, pp. 425–435, Dec. 2003.
- [12] I. Furukawa and J. Suzuki, “An investigation on optimum gamma characteristics for digital cinema images,” *Proc. Chugoku-branch, Joint Convention of Institute of Electrical and Information Engineers*, 23–9, pp. 76–77, Oct. 2011.
- [13] H. Komatsubara, “Performance testing of color-difference formulas using their acceptability dataset,” *J. Illum. Engng. Inst. Japan*, Vol. 87, No. 5, pp. 293–298, 2003.
- [14] G. Kennel and D. Snider, “Gray-scale transformations of digital film data for display, conversion, and film recording,” *SMPTE Journal*, vol. 102, pp. 1109–1119, Dec. 1993.