

# 周囲の明るさによらずLCD画面を見やすく表示する 視聴環境適応表示技術

Illumination-Adaptive Display Control Technology for Wide Range of Illumination Conditions

小曳 尚 馬場 雅裕 森本 正巳

■ KOBIKI Hisashi

■ BABA Masahiro

■ MORIMOTO Masami

近年、液晶ディスプレイ (LCD) を搭載した携帯端末を様々な明るさの下で視聴する機会が増えている。しかし従来のLCDは、明るい屋外では画面が暗く感じられ、表示画像が見にくいという問題があった。

東芝は、周囲環境の明るさによらずLCD画面を見やすく表示する視聴環境適応表示技術を開発した。この技術は、目の網膜にある、暗い場所で働くかん体細胞と明るい場所で働くすい体細胞の応答をモデル化することで、様々な明るさの環境における画像の見え方を高精度に推定できる。更に、LCDのコントラストなどの特性を考慮しながら、周囲の明るさの変化に対応して画像の最適な表示輝度を求め、バックライト輝度の制御と画像の階調値補正を行う。LCDは、屋外では一般に画面が暗くて見にくいといわれるが、これにより、リビングと同等に明るく見やすい画像を表示できる。

With the wide dissemination of mobile devices in recent years, mobile devices equipped with a liquid crystal display (LCD) have come into widespread use under various illumination conditions. However, conventional LCDs suffer from a degradation of visibility with increasing brightness, particularly in bright outdoor light.

As a solution to this problem, Toshiba has developed an illumination-adaptive display control technology to improve image visibility according to the surrounding lighting conditions. This technology provides backlight luminance control and contrast compensation of LCDs employing both a human vision model based on the responses of rod and cone cells, which mainly work in dark and bright conditions, respectively, and an LCD device properties model. As a result, the visibility of LCDs is significantly improved under a wide range of illumination conditions, allowing comfortable viewing in environments ranging from a dark living room to bright outdoor locations.

## 1 まえがき

近年、LCDの小型化によって、携帯電話や、ノートパソコン、ポータブルDVDプレーヤなどの携帯端末が広く普及し、屋内から屋外まで、様々な場所で画像を見る機会が増えている。しかし、携帯電話のLCD画面を屋外で見た場合など、屋内に比べ暗く見にくいという問題があった。このような周囲の明るさによる画面の見やすさの変化は、人の目の特性とLCDのデバイス特性によって引き起こされている。

携帯端末の視聴環境は、周囲の明るさが $10^{-5}$  lx (暗い屋内) ~  $10^5$  lx (明るい屋外) という広い範囲で変化する。これに対して、人の目は、周囲が明るくても暗くても、目に映る光景の明るさがある一定の白から黒の範囲に収まるよう、感度を自動的に変化させる<sup>(1)</sup>。この目の感度の変化を順応と呼ぶ。明るい屋外では、目が周囲の明るさに順応して画面の明るさが暗く見える。このように周囲の明るさに順応した、物体の見かけの明るさを“見えの明るさ”と呼ぶ。

また、周囲の明るさの変化により、LCD表面で反射する光の量が変化し、画像の黒い部分が灰色に見える黒浮きや映り込みが生じる。更に、LCDはバックライトの光を透過させることで画像を表示するので、光漏れによる黒浮きも発生する。

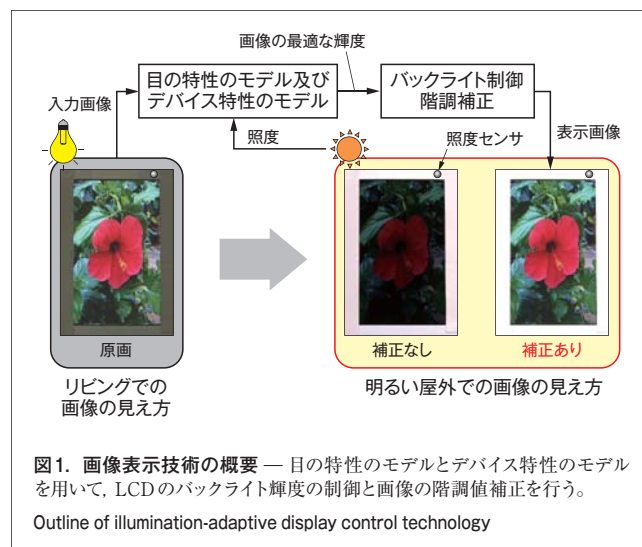


図1. 画像表示技術の概要 — 目の特性のモデルとデバイス特性のモデルを用いて、LCDのバックライト輝度の制御と画像の階調値補正を行う。

Outline of illumination-adaptive display control technology

これらは、LCDの表面反射率やコントラストといったデバイス特性により変化する。

そこで東芝は、周囲の明るさに応じたLCDの見えの明るさを、目の特性とLCDのデバイス特性に基づいて高精度に求め、様々な視聴環境において常にLCD画面を見やすく表示する視聴環境適応表示技術を開発した(図1)。

ここでは、開発した視聴環境適応表示技術について、画像

の見えるモデル化と表示制御アルゴリズム、及び性能評価結果を述べる。

## 2 画像の見えるモデル化と表示制御アルゴリズム

様々な視聴環境において常に見やすい画像を表示するための技術について、周囲の明るさによって変化する画像の見える明るさを推定するための従来手法とその課題、画像の見える明るさを推定するための目の特性とLCDのデバイス特性のモデル化<sup>(2)</sup>、及びそれらを用いたLCDの表示制御アルゴリズムを述べる。

### 2.1 色の見えモデル CIECAM02

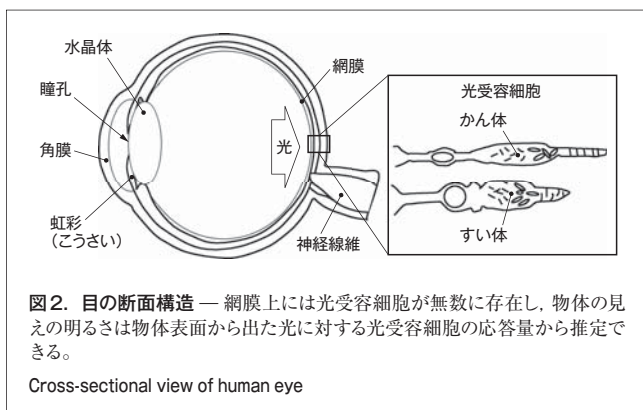
周囲の明るさによらず常に見やすい画像をLCD画面に表示するには、周囲の明るさによって画像の見えるかたがどのように変化するかを正確に推定する必要がある。様々な明るさの下で物体の色の見え方を推定する従来の手法として“色の見えモデル”<sup>(3)</sup>がある。

色の見えモデルは目の特性を踏まえた視覚モデルで、代表的なモデルとして国際照明委員会 (CIE) によって提案された CIECAM02 (CIE Color Appearance Model 02) があり、近年、印刷物の色調整などの用途に採用されている。しかし、CIECAM02を用いてLCDに表示した画像の見える明るさを推定してもその精度は高くない。その理由として、CIECAM02は、前述した目の特性のモデル化が不十分であること、及びLCDのデバイス特性を考慮していないことが挙げられる。

そこで当社は、LCDに表示した画像の見える明るさを従来の手法よりも高精度に推定するため、目の特性をより精密にモデル化し、LCDのデバイス特性のモデルと組み合わせる手法を新たに開発した。

### 2.2 目の特性のモデル化

目の断面を図2に示す。網膜上には、光受容細胞と呼ばれる細胞が無数に存在する。物体表面から出た光は、瞳孔(どうこう)を通して目の中に入り網膜に届く。光受容細胞は届いた光に反応し、その強さに応じた神経信号が目の中の神経線

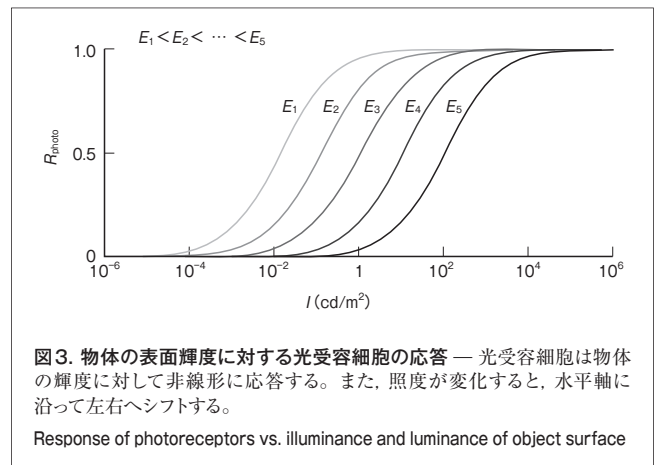


維を伝わって、脳内で統合され明るさ感覚を起こす。そこで、人が感じる物体の見える明るさ(白から黒で表される明るさの感覚)は、物体表面から出た光に対する光受容細胞の応答量から推定できる。

D.C.Hoodによれば、物体の表面輝度に対する光受容細胞の応答量  $R_{\text{photo}}$  は式(1)のようにモデル化される<sup>(1)</sup>。

$$R_{\text{photo}}(I, E) = \frac{I^n}{I^n + \sigma^n(E)} \quad (1)$$

ここで、 $I$ は物体表面の輝度(LCDに表示された画像の輝度:  $\text{cd}/\text{m}^2$ )、 $E$ は周囲の明るさ(照度:  $\text{lx}$ )、 $\sigma$ は順応レベル、 $n$ は定数である。 $I$ 、 $E$ 、 $R_{\text{photo}}$ の関係は、図3に示すように、 $E$ が増えると  $R_{\text{photo}}$  は右へシフトする。すなわち、 $I$ が一定でも、 $E$ の増加により  $R_{\text{photo}}$  が相対的に小さくなる。この現象が、LCDに対する見える明るさの変化を引き起こす。



光受容細胞にはかん体とすい体の2種類がある。かん体は周囲が比較的暗い環境下 ( $\sigma = 10^{-6} \sim 10^2 \text{ cd}/\text{m}^2$ ) で応答し、すい体は周囲が比較的明るい環境下 ( $\sigma = 10^{-1} \sim 10^8 \text{ cd}/\text{m}^2$ ) で応答する。かん体の応答量  $R_{\text{rod}}$  とすい体の応答量  $R_{\text{cone}}$  は、式(1)を元に次のようにモデル化される。

$$R_{\text{rod}}(I, E) = \left( \frac{I^n}{I^n + \sigma_{\text{rod}}^n(E)} \right) S_{\text{rod}}(E) \quad (2)$$

ここで、

$$S_{\text{rod}}(E) = \left( \frac{a}{a + \sigma_{\text{rod}}(E)} \right) : \text{かん体飽和関数}$$

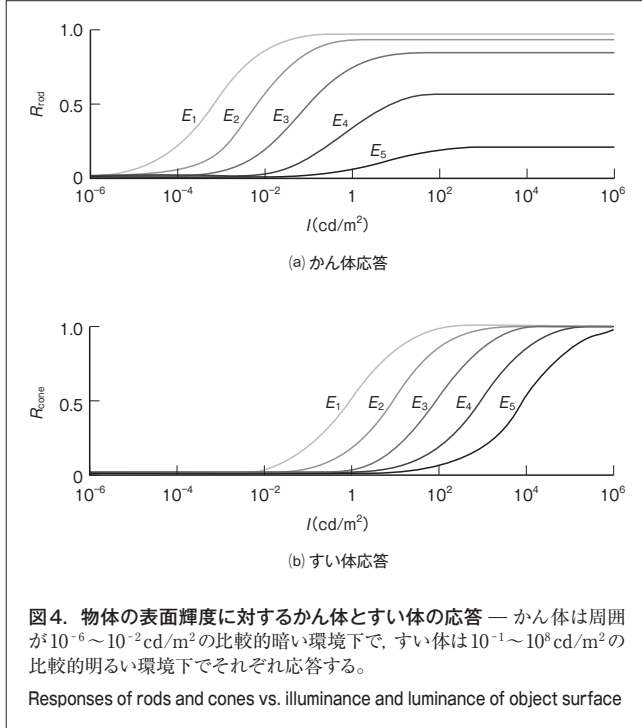
$a$ : 飽和係数

$$R_{\text{cone}}(I, E) = \left( \frac{I^n}{I^n + \sigma_{\text{cone}}^n(E)} \right) S_{\text{cone}}(E) \quad (3)$$

ここで、

$$S_{\text{cone}}(E) = \left( \frac{b}{b + \sigma_{\text{cone}}(E)} \right) : \text{すい体沈静関数}$$

$b$ : 沈静係数



$R_{\text{rod}}$ と $R_{\text{cone}}$ の $I$ 及び $E$ との関係を図4に示す。 $R_{\text{rod}}$ は、 $E$ が十分小さい暗い環境の下で大きくなり、周囲が明るくなると徐々に飽和し始め、明るい屋外ではほとんど応答しなくなる。一方、 $R_{\text{cone}}$ は、暗い環境の下では沈黙しており、周囲が明るくなると応答を始める。すなわち、人の目は、暗い環境の下ではかん体だけの、薄暗い屋内ではかん体とすい体の両方の、明るい屋外ではすい体だけの応答によって明るさを感じる。

このような光受容細胞の応答特性を基に、当社が開発した手法では、ある $E$ の環境下にあるLCDに表示された画像の見えの明るさ $R$ を、 $R_{\text{rod}}$ と $R_{\text{cone}}$ の重み付き線形和として式(4)から算出する。

$$R(I, E) = \frac{R_{\text{rod}}(I, E) + R_{\text{cone}}(I, E)}{S_{\text{rod}}(E) + S_{\text{cone}}(E)} \quad (4)$$

従来手法のCIECAM02では、すい体の応答だけを用いており、かん体の応答は考慮されていない。しかし、 $I$ の範囲は一般にかん体とすい体の両方が応答する $10^{-2} \sim 10^2 \text{ cd/m}^2$ であるため、開発した手法のようにかん体の応答を考慮することで、 $R$ をより高精度に推定できる。

### 2.3 デバイス特性のモデル化

目の特性モデルを用いて $R$ を推定するには、ある階調値を持つ画像がLCD上でどのような輝度で表示されるかを正確に求める必要がある。そこで、開発した手法では、ある $E$ の環境下で $I$ を式(5)のようにモデル化した。

$$I(x, BL, E) = L_{\text{ref}}(E) + L_{\text{tr}}(x, BL) \quad (5)$$

ここで、 $BL$ は、LCDで表示可能な最大輝度を制御するためのバックライト設定値( $\text{cd/m}^2$ )であり、 $x$ は画像の階調値である。また、 $L_{\text{ref}}$ はパネル上での表面反射輝度( $\text{cd/m}^2$ )で、 $L_{\text{tr}}$ はバックライトの透過輝度( $\text{cd/m}^2$ )である。 $L_{\text{ref}}$ と $L_{\text{tr}}$ はそれぞれ式(6)と式(7)で定義される。

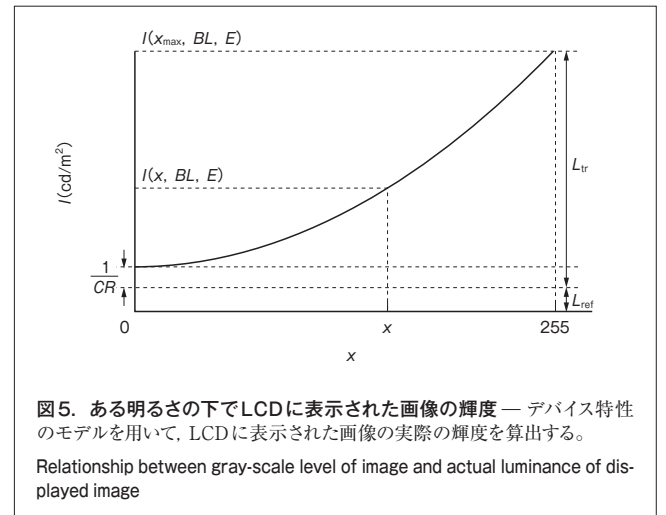
$$L_{\text{ref}}(E) = \frac{EH}{\pi} \quad (6)$$

ここで、 $H$ はパネルの表面反射係数(0~1)である。

$$L_{\text{tr}}(x, BL) = \left[ \left( 1 - \frac{1}{CR} \right) \left( \frac{x}{x_{\text{max}}} \right)^{\gamma} + \frac{1}{CR} \right] BL \quad (7)$$

ここで、 $CR$ はLCDのコントラスト比、 $\gamma$ はディスプレイガンマ、 $x_{\text{max}}$ はLCDで表示可能な階調の最大値である。

$x$ と $I$ の関係を図5に示す。 $x$ が0であっても、 $L_{\text{ref}}$ や $CR$ の影響で、 $I$ は実際には0にならないことがわかる。



### 2.4 LCDの表示制御アルゴリズム

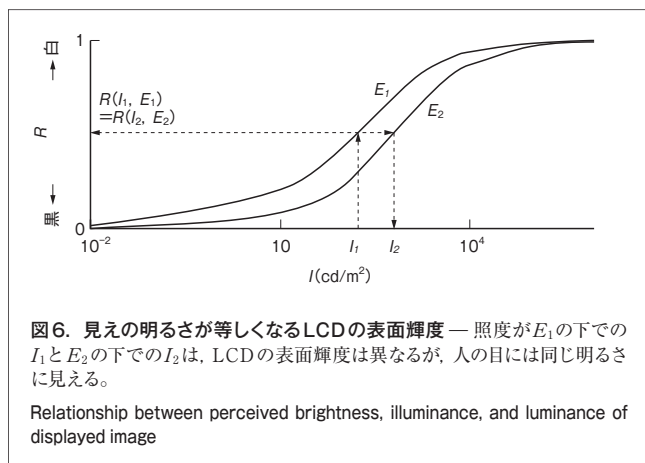
開発した手法は、異なる $E$ の間で $R$ が等しい画像をLCDに表示するため、式(8)を満足するように表示を制御する。

$$R(I_1, E_1) = R(I_2, E_2) \quad (8)$$

式(4)~(7)から求めた $R$ と $I$ 、 $E$ の関係を図6に示す。ここで、照度条件 $E_1$ と $E_2$ は $E_1 < E_2$ である。 $E_1$ の条件下での $I_1$ と $E_2$ の条件下での $I_2$ では $R$ が等しく、人の目にはそれらが同じ明るさに見える。すなわち、照度が $E_1$ から $E_2$ に変わった場合に、式(8)の条件を満たすように $I_2$ を求めLCDを制御することで、異なる $E$ の間で $R$ が等しい画像を表示できる。

LCDの制御アルゴリズムを以下に示す。

- (1)  $E_1$ で $I_{1, \text{image}}$ に対する $R_{1, \text{image}}$ を算出する。
- (2)  $E_2$ での理想的な画像の見えの明るさとして、 $R_{2, \text{image}} = R_{1, \text{image}}$ を設定する。



- (3)  $R_{2, \text{image}}$  及び  $E_2$  を既知として式(2)~(4)を解き、 $E_2$ での理想的な  $I_{2, \text{image}}$  を算出する。
- (4)  $I_{2, \text{image}}$  及び  $E_2$  を既知として式(5)~(8)を解き、 $E_2$ での理想的な  $BL_{2, \text{image}}$  と  $x_{2, \text{image}}$  を算出する。
- (5)  $BL_{2, \text{image}}$  に基づきLCDのバックライトを制御し、 $x_{2, \text{image}}$  に基づき各画素の画素値を変換する。

### 3 性能評価

開発した手法を用いたLCD表示制御の結果評価と開発した手法の性能検証を行った。

#### 3.1 LCD表示制御試験

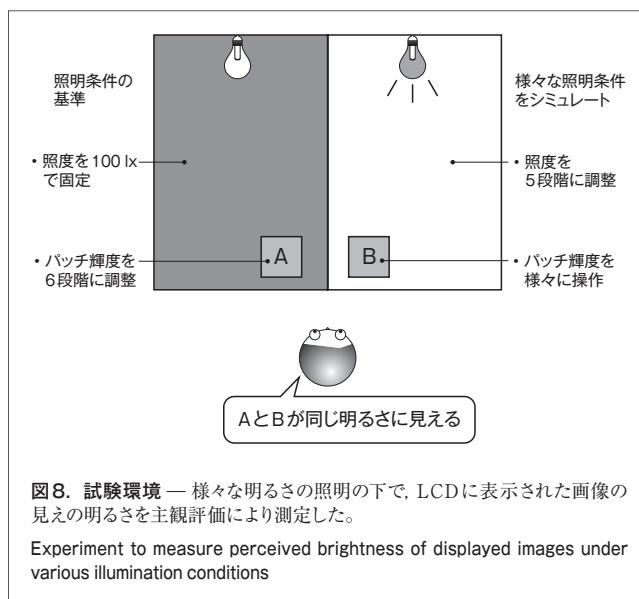
従来手法及び開発した手法を用いて、リビング ( $E_1 = 100 \text{ lx}$ ) での画質を屋外 ( $E_2 = 3,700 \text{ lx}$ ) で再現するようにLCDの表示を制御する試験を行った。

図7において、(b)及び(f)がどちらも(a)及び(e)より暗く見えるのは、目の順応により未処理画像が相対的に暗く見えるためである。(c)及び(g)はどちらも(b)及び(f)よりもコントラストは高いが、明るさの再現が不十分である。これは、従来手法ではかん体の応答を考慮しないので、画像の暗い領域の推定精度が低いためである。これに対して、開発した手法を用いた(d)及び(h)は、(a)及び(e)と同等レベルの画質が再現された。特に、従来手法と比べて、葉の陰や顔のように比較的暗い領域が見やすく再現されている。

#### 3.2 性能検証

開発した手法の性能を検証するため、様々な周囲の明るさの下で、LCDに表示された画像の見える明るさを主観評価により求めた。

試験環境を図8に示す。まず、照度を100 lxに固定した基準となる照明下のLCDに、黒から白の単一色のパッチ画像Aを5 ~ 100  $\text{cd/m}^2$ の6段階の輝度で表示した。次に、照度を100 ~ 4,250 lxの5条件に調整した照明下のLCDに、パッチ画像Bを様々な輝度で表示した。被験者には、両眼隔壁法<sup>(4)</sup>(<sup>注1</sup>)



によりパッチ画像AとBの見える明るさを比較させた。このようにしてパッチ画像AとBが同じ明るさに見えるときのパッチ画像Bを抽出し、その輝度を正規化した値をその照明下での表示輝度に対する見える明るさの実測値とした。

図9に、従来手法であるCIECAM02と開発した手法による見える明るさの推定結果を示す。図9から、開発した手法

(注1) 壁で隔てた照度の異なる環境下で、被験者の左目と右目を別々に順応させ、それぞれの目で見える物の色を回答する官能評価方法。

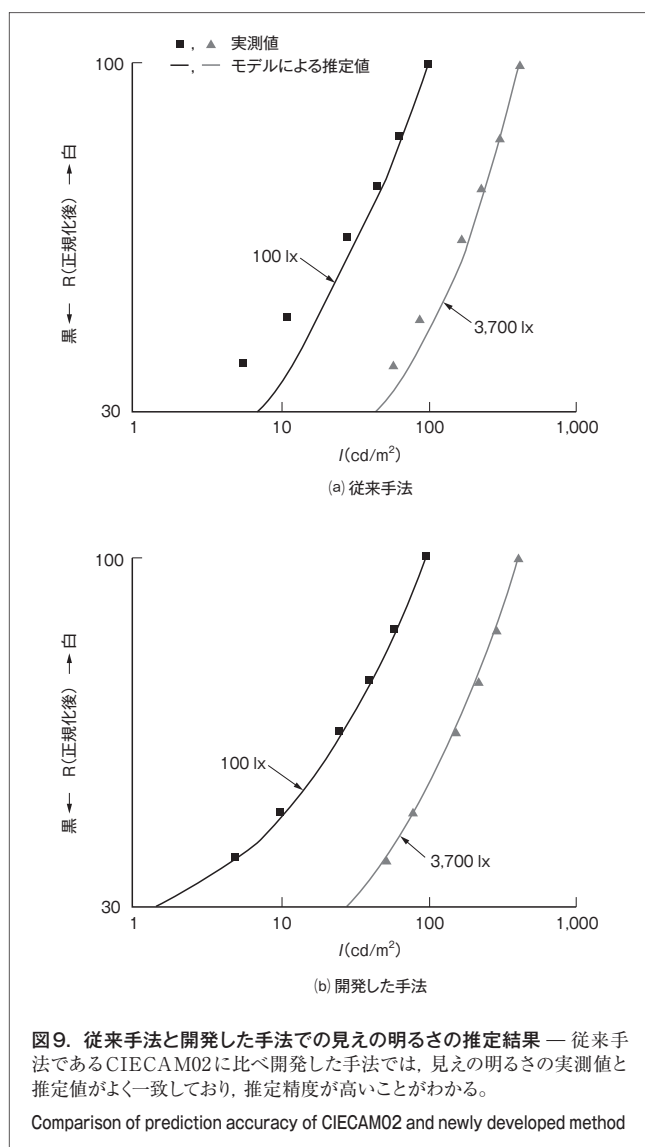


表1. 実測値と推定値の間の誤差の比較

Comparison of root mean square errors (RMSEs) between measured and predicted brightness values

| 対 象            | 従来手法のRMSE | 開発した手法のRMSE |
|----------------|-----------|-------------|
| 100 lx (N=6)   | 9.33      | 1.85        |
| 3,700 lx (N=6) | 4.04      | 0.71        |
| 平均 (N=30)      | 4.84      | 0.96        |

N: サンプル数

では実測値と推定値がよく一致していることがわかり、特に画像の暗い領域に対する見えの明るさの推定精度が従来手法に比べ向上していることが確認できた。実測値と推定値の誤差の二乗平均平方根 (RMSE) 値を表1に示す。全30点のRMSE値の平均は従来手法が4.84であるのに対して開発した手法では0.96であり、開発した手法の推定精度が高いことがわかる。

## 4 あとがき

周囲の明るさの幅広い変化に対して、常に見やすい画像をLCDに表示できる視聴環境適応表示技術を開発した。これにより、一般にLCDでは画面が暗くて見にくいといわれる屋外 (3,700 lx) でも、リビング (100 lx) と同等レベルの明るく見やすい画面を表示できるようになった。

この技術は、スマートフォンや携帯電話に搭載されており、今後はLCDだけでなく、有機EL (Electroluminescence) やその他のデバイスに向けてモデルを改良し、応用範囲を広げていく。

## 文 献

- (1) Hood, D. C.; Finkelstein, M. A. "Sensitivity to Light". Handbook of Perception and Human Performance : Vol.1 : Sensory Processes and Perception. New York, Wiley, 1986, p.5-1 - 5-66.
- (2) 小曳 尚, ほか. "かん体・すい体応答による照度に応じたLCDの見えの明るさ推定手法". 電子情報通信学会大会講演論文集 情報・システム2. 仙台, 2010-03, 電子情報通信学会, p.35.
- (3) Fairchild, M. D. Color Appearance Models. New York, Wiley, 2004, 408p.
- (4) Shin, J. C., et al. Change of Color Appearance in Photopic, Mesopic and Scotopic Vision. Optical review. 11, 4, 2004, p.265 - 271.



小曳 尚 KOBIKI Hisashi

研究開発センター マルチメディアラボラトリー。  
ディスプレイシステム及び画像処理技術の研究・開発に従事。  
Multimedia Lab.



馬場 雅裕 BABA Masahiro

研究開発センター マルチメディアラボラトリー。  
ディスプレイシステム及び画像処理技術の研究・開発に従事。  
電子情報通信学会, SID 会員。  
Multimedia Lab.



森本 正巳 MORIMOTO Masami

ビジュアルプロダクツ社 コアテクノロジーセンター モバイル  
技術開発部主務。高画質化技術の開発に従事。  
Core Technology Center