チャネル間相互作用を考慮した液晶ディスプレイの色再現特性 のキャリブレーション

Calibration of LCD Colorimetry Considering Channel Interaction

田村信彦[†], 津村徳道[†], 三宅洋一[†]

Tamura Nobuhiko[†], Tsumura Norimichi[†] and Miyake Yoichi[†]

Abstract LCD monitors are begining to replace CRT monitors with significant improvement of performace and falling price. Accurate color reproduction on LCD is drawing attention and sRGB-compatible LCDs are increasing. In such color management system, accurate colorimetric charcterization of display device has a critical role for achieving device independent color reproduction. In this paper, a new method of color measurement is proposed which is applicable to the assessment of color reproduction of LCD. Proposed method characterizes electro optical transfer function using Masking model which considers both channel interaction and non-constancy of channel chromaticity. In the experiment, comparison with five conventional characterization method proved proposed method is very significant to the colorimetry of LCD.

キーワード: characterization, calibration, LCD, Masking model, channel interaction, PCA, colorimetry, color management

1. ま え が き

液晶ディスプレイ装置 (LCD) は軽量性, 省電力性, 省 スペース性に優れ、近年の低価格化に伴い今後一層の普 及が見込まれる.一方で画像のマルチメディア化、ネッ トワーク環境の整備に伴い同一画像情報を異なるデバイ スで表示することが多くなってきた. デバイス間におけ る表示色の整合性を保つため色空間の国際規格である sRGB を満足する LCD も普及の兆しを見せている. ディ スプレイ装置における正確な色再現ではキャリブレー ションによってディスプレイに入力される RGB 信号と 心理物理量である CIE XYZ 三刺激値の対応関係を求め ることが重要である. CRT については Berns らにより提 案された GOG(Gain-Offset-Gamma) モデル¹⁾ を用いた キャリブレーションが標準的*であり、少数の XYZ の測 定値を基に任意の入力信号に対応する XYZ を予測する ことが可能である.しかしながらLCDの場合、RGBチャ ネル間における相互作用の存在、プライマリカラー色度 が入力レベルに応じて変化するなどの CRT にはない特 性があり、キャラクタライゼーションが困難である. ディ

年月日受付

†千葉大学 工学部 情報画像工学科

(〒 263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

† Dept. of Info. & Image Sci., Faculty of Engineering, Chiba University

* CIE 122-1996, ASTM(American society for testing and materials) designation: E 1682-96 スプレイのキャラクタライゼーション手法はこれまでに 数多く提案されており、LCD を対象とする手法では入力 信号に対する輝度変化をS字曲線で近似するS-curveモ デル²⁾ などが存在する.また、LCD の色再現原理を考慮 しない手法では多項式近似、3次元 LUT、行列演算に基 づく手法³⁾ などがある.次節においてこれらの手法につ いて概説を行うが、行列演算に基づく手法を除き推定精 度において十分ではなく、また測定回数も多い.唯一、行 列演算に基づく手法はチャネル間相互作用、入力レベル に依存したプライマリカラー色度変動を考慮しているた め推定精度は高い.しかしながら XYZ→RGB の計算が 困難であり、実用性に欠ける.本論文では逆変換可能、か つチャネル間相互作用、プライマリカラー変動を考慮し た Masking モデルによる高精度キャラクタライゼーショ ン手法を提案する.

2. キャラクタライゼーション手法概説

2.1 GOG モデル, S-curve モデル, 多項式近似 GOG モデル, S-curve モデル, 多項式近似は式 (1) で 定義される共通の構造を持つ.

$$\begin{bmatrix} X\\Y\\Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B\\Y_R & Y_G & Y_B\\Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R\\G\\B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0\\Y_0\\Z_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで X_0, Y_0, Z_0 は RGB 信号 (0,0,0) に対応する XYZ である. X_C, Y_C, Z_C はチャネル C(C=R, G, B) におけ る最大輝度の XYZ からバイアス X_0, Y_0, Z_0 を差し引い

^{(1-33,} Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi 263-8522, Japan)

たものである. RGB 信号 (d_R, d_G, d_B) に依存して各チャ ネルの XYZ の強度を示す係数 $R(d_R), G(d_G), B(d_B)$ が 変動する. 各モデルにおける $R(d_R)$ の定義を次に示す. GOG モデル

$$R(d_R) = \begin{cases} (k_{g,R}d_R + k_{o,R})^{\gamma_R} & , k_{g,R}d_R + k_{o,R} \ge 0\\ 0 & , k_{g,R}d_R + k_{o,R} < 0 \end{cases} (2)$$

S-curve モデル

$$\begin{aligned} R(d_R, d_G, d_B) &= \\ A_{RR}f(d_R) + A_{RG}f'(d_G) + A_{RB}f'(d_B) \quad (3) \\ where \ f(d_R) &= \frac{d_R^{\alpha}}{d_R^{\beta} + C}, \ f': \ derivative \ of \ f \end{aligned}$$

多項式近似

$$R(d_R) = a_R d_R^2 + b_R d_R + c_R \tag{4}$$

ここで d_B, d_G, d_B 以外の変数は全て定数であり、トレー ニングデータとの誤差を最小にするように求められる (4.3 節参照). *G*(*d_G*), *B*(*d_B*) の定義も同様に行われる. GOG モデルは CRT モニタの内部構造を定式化したもの であり、本来LCD のキャラクタライゼーションには適し ていないがある程度の推定精度を持つため LCD に対し ても用いられることがある*. S-curve モデルは RGB 信 号に対する輝度変化を式(3)で与えられるS字曲線で近 似する.液晶ディスプレイにおいてS字曲線状の輝度変 化は特徴的ではあるが多くの場合、入力信号を LUT で 変換しガンマカーブを近似する方式がとられるため近似 精度は高くない. GOG, S-curve, 多項式近似ではトレー ニングデータとして各チャネル独立に測定した XYZ 値 を用いるためチャネル間相互作用を反映することができ ず、推定精度に限界がある. なお S-curve モデルにおいて $R(d_R)$ の項に d_G, d_B が含まれるが、これはプライマリカ ラーの変動を係数の変動として扱うための項でありチャ ネル間相互作用のモデル化ではない.詳細は参考文献²⁾ を参照されたい.

2.2 行列演算に基づく手法

IEC TC100 PT61966 Part4 に記載の行列演算に基づ くキャラクタライゼーションでは式 (5) における 3×8 の 行列を用いて RGB 信号から XYZ 値への変換をモデル 化している.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} 1 \ R \ G \ B \ RG \ GB \ BR \ RGB \end{bmatrix}^T$$
(5)

ここで R,G,B はそれぞれ *d_R, d_G*, *d_B*の関数であり, 各 チャネルについて 0~255 までを等間隔で 32 点計測した 輝度値を用いて補間により求める.また変換行列 A に ついては 32 色のカラーに対応する RGB と XYZ の組を

* 例えば ⁴⁾ など

用いて推定誤差を最小にするよう求める.式(5)におい てRG,GB,BR,RGBなどの交差項の導入によりチャネ ル間相互作用を考慮している.このためRGB信号から XYZを推定する精度は高いが,式(5)はR,G,Bについ ての非線形三連立方程式であるためXYZ→RGB信号の 計算が困難であり,実用性に欠ける.また相互作用によ る影響はR,G,Bに対し単調増加であることが仮定され ているが,実際にはこの仮定を満たさないディスプレイ も存在する.例えば図1では相互作用の影響は入力レベ ルの中間ほどで最も大きい.

3. Masking モデル

- 3.1 チャネル相互作用
 - ☑ 1 Difference of electoro-optical transfer function caused by channel interaction(SHARP LL-T180A)

図1に入力レベルに対するR チャネルの輝度変化を表 す.図中破線で示した曲線はG,B チャネルの入力レベ ルを0に保ち,R チャネルの入力レベルを変化させた場 合である.また実線はG,B チャネルの入力レベルを 255 に保った場合の輝度変化である.図1よりチャネル間相 互作用により LCD の色再現特性が大きく影響を受ける ことが理解される.

チャネル間相互作用は液晶パネル内部における電極 の容量的な相互結合に起因すると考えられているが, その特性は駆動回路に大きく依存するため定式化が困 難である. そこで本研究ではチャネル間相互作用が強 く現れることが想定される二次色、三次色、すなわち Cyan, Magenta, Yellow, Gray の XYZ を直接計測する ことによりチャネル間相互作用を考慮した推定を行う. RGB 信号 (d_R, d_G, d_B) を入力とした場合のディスプレ イの XYZ を要素にもつベクトルを $I(d_R, d_G, d_B)$ とす る.2.1節で概説した従来法では各チャネルからの寄与 の推定値 $\hat{\mathbf{I}}(d_R, 0, 0), \hat{\mathbf{I}}(0, d_G, 0), \hat{\mathbf{I}}(0, 0, d_B)$ の加法によ り XYZ の推定を行った. このような推定ではチャネル 間相互作用が含まれないため推定精度が低下する事が 問題であった.本論文で提案する Masking モデルでは 図 2 のように RGBCMYGr を用いて $I(d_R, d_G, d_B)$ を推 定する. $\mathbf{I}(d_Y, d_Y, 0)$ を $\mathbf{I}_{\mathbf{Y}}(d_Y)$, また $\mathbf{I}(d_{Gr}, d_{Gr}, d_{Gr})$ を $I_{Gr}(d_{Gr})$ などと略記すると式 (6) に基づいて XYZ を推 定する.

$$\hat{\mathbf{I}}(d_R, d_G, d_B) = \hat{\mathbf{I}}_{\mathbf{Gr}}(d_B) + (\hat{\mathbf{I}}_{\mathbf{Y}}(d_G) - \hat{\mathbf{I}}_{\mathbf{Y}}(d_B)) + (\hat{\mathbf{I}}_{\mathbf{R}}(d_R) - \hat{\mathbf{I}}_{\mathbf{R}}(d_G))$$
(6)
$$if \ d_B \le d_G \le d_R$$

 $d_B \leq d_G \leq d_R$ 以外の場合も同様、一次色、二次色、三次 色を用いて推定を行う. $\mathbf{I}_{\mathbf{i}}(d_i)(i = RGBCMYGr)$ の推 定方法については次節で解説する.

3.2 プライマリカラー非恒常性

図3にRGB各チャネルについて入力レベルを $0 \sim 255$ まで変動させた場合の u'v' 色度図上での軌跡を表す.測定値からブラックのXYZを差し引いた場合においても, 色度は入力レベルに応じて若干ではあるが変動する (プライマリカラー非恒常性). これは液晶の透過率特性が印加電圧に依存して変動するためである. Masking モデルでは $I_i(d_i)$ (i=RGBCMYGr)を次式により推定を行う.

$$\hat{\mathbf{I}}_{\mathbf{i}}(d_i) = C_i(d_i) \begin{bmatrix} X_{i,PCA} \\ Y_{i,PCA} \\ Z_{i,PCA} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$$
(7)

ここで *X_{i,PCA}*, *Y_{i,PCA}*, *Z_{i,PCA}* はチャネル i について 0 ~ 255 の入力レベルに対応する XYZ に主成分分析を施し, 得られた第一主成分ベクトルである.例えば 0 ~ 255 を 15 刻みで測定した場合

$$\begin{bmatrix} X_{i,PCA} \\ Y_{i,PCA} \\ Z_{i,PCA} \end{bmatrix} = 1st \ Principal \ Component \ of$$
$$\{\mathbf{I}_{\mathbf{i}}(d_i) - \mathbf{I}_{\mathbf{0}} | i = 0, 15, 30, ..., 255\}$$
(8)

のように書き表すことができる. プライマリカラー恒常 性が成り立つ場合,入力レベルに応じて XYZ は直線上 を移動するが,実際には入力レベルに対し液晶の透過率 特性が変動するため曲線上を移動することになる. この ため図 3 に示す入力レベルに依存した色度のばらつきが 生じる. Masking モデルでは主成分分析により曲線との 差を最小とする最適なベクトル $X_{i,PCA}, Y_{i,PCA}, Z_{i,PCA}$ を計算し,プライマリカラー非恒常性に起因する推定誤 差を最小限度に抑える. 式 (7)中の係数 $C_i(d_i)$ は 0~255 を 15 刻みで測定した場合,測定データに対して

$$C_{i}(d_{i}) = \begin{bmatrix} X_{i,PCA} \\ Y_{i,PCA} \\ Z_{i,} \end{bmatrix}^{T} (\mathbf{I}_{i}(d_{i}) - \mathbf{I}_{0})$$
(9)
$$(d_{i} = 0, 15, 30..., 255)$$

のように求める. 但し主成分ベクトルはノルム 1 に正規 化されているとする. 任意の d_i に対する $C_i(d_i)$ の値は 測定データ点に対する C_i を用いてスプライン補間によ り求める.

4. 実 験

三種類の液晶ディスプレイを用いて提案手法である Masking モデルの有効性の判定を行った. 比較対象と して、GOG モデル、S-curve モデル、多項式近似、3次 元 LUT、行列演算に基づく手法を用いた推定を行った. Masking モデル、GOG モデル、S-curve モデル、多項式近 似についてはトレーニングデータ数を4段階に分け、推 定精度の変動を調べた.

 $\boxtimes 2$ Masking

☑ 3 Color tracking before(left) and after(right) black correction (SHARP LL-T180A)

表 1 List of measured display

Model	Type
SHARP LL-T180A	18.1" TFT LCD Monitor
iiyama AS4635U	18.1" a-Si TFT LCD Monitor
SONY PCG-C1MR/BP	8.9" Ultra-Wide TFT LCD (Laptop)

表 2 Channel interaction test result

	I(140, 140, 140)	$I_{R}(140) + I_{G}(140)$	Error
		$+I_B(140) - 2I_0$	
	XYZ	XYZ	$\Delta X \Delta Y \Delta Z$
SHARP	32.3, 33.0, 35.1	22.1, 22.5, 24.2	10.2, 10.5, 10.9
iiyama	30.1, 31.9, 23.1	29.6, 31.4, 22.6	0.5, 0.5, 0.5
VAIO	46.7, 46.4, 66.9	52.3,52.1,74.2	-5.6, -5.7, -7.3

4.1 実験条件

表1にXYZ 推定実験に用いたディスプレイを表す. CIE XYZ 三刺激値の計測には分光放射輝度計 (Minolta CS1000)を用いてディスプレイ中央部,2度視野領域の 分光放射輝度を測定し,XYZ に変換を行った.分光放射 輝度計とディスプレイの距離は 30cm,カラー表示はディ スプレイ全画面に対し行った.また測定開始前に4時間 のウォームアップを行った.測定は暗室で行った.

4.2 チャネル間相互作用

測定に用いられたディスプレイにおけるチャネル間相 互作用を表2に示す.チャネル間相互作用のためグレイ のXYZはRGBを単独で表示した場合のXYZの総和と 異なることが分かる.

4.3 実験方法

GOG モデル, S-curve モデル, 多項式近似を用いた推 定では RGB 各チャネルについて 0~255 を等間隔で 5, 9, 18, 32 ステップで表示色を変え, XYZ を測定した. Masking モデルでは RGBCMYGr 各チャネルについて 0~255 を等間隔で 5, 9, 18, 32 ステップで表示, 計測を 行った. 行列演算に基づく手法では IEC TC100 PT61966 Part4 の規定に従い, RGB チャネルについては 32 ステッ プ, 32 色のカラー (混色)を表示, 計測を行った. LUT で は 9×9×9 点の XYZ を測定した. 各モデルについて上記 のトレーニングデータを元にパラメータを計算し, ラン ダムに生成された 100 個の RGB 値に対し XYZ の推定 を行った.

4.4 実験結果と考察

表3に各モデルによる推定値と実測値の CIE Δ*E*^{*4} 色 差をの平均値を表す.また図4にトレーニングデータ数 に対する平均色差を表す.なお LUT についてはトレー ニングデータ数に対し推定精度が低いため図からは省略 した.LUT によって十分な推定精度を実現するにはよ り多くのトレーニングデータが必要であることが分か る.図4から全体的な傾向として,トレーニングデータ として用いる測定値の数が増加するに伴い推定精度が向 上していることが分かる.GOG モデルは本来 CRT の キャラクタライゼーションのため用いられるべきである が LCD に対しても同じ構造を持つ S-curve モデルや多

表 3 Performance result of the characterization model						
Average ΔE_{94}^*		SHARP	iiyama	SONY		
Masking	5step	3.77	1.66	5.79		
Masking	9step	3.52	0.50	4.95		
Masking	18 step	3.43	0.59	4.52		
Masking	32 step	3.49	0.37	4.33		
S-curve	5step	17.05	3.33	10.26		
S-curve	9step	6.73	1.19	6.22		
S-curve	18 step	6.70	1.93	5.35		
S-curve	32 step	6.86	1.05	4.29		
Polynomial	5step	7.34	4.08	4.45		
Polynomial	9step	7.10	2.47	4.43		
Polynomial	18 step	7.05	2.91	4.40		
Polynomial	32 step	7.10	2.48	4.43		
GOG	5step	7.05	0.76	4.16		
GOG	9step	6.86	0.87	4.35		
GOG	$18 \mathrm{step}$	6.76	1.35	4.11		
GOG	32 step	6.81	0.75	4.16		
LUT		15.20	14.36	13.92		
Matrix		3.78	0.99	2.80		

項式近似に比べ推定精度が高く,測定回数に対しても推 定精度が安定していることが理解される. これは測定に 用いた LCD の階調特性が LUT などを用いてガンマカー ブを近似しているためであると考えられる. S-curve モ デルは測定回数の減少に対し推定精度が急激に落ちる事 が確認された. S-curve モデルには未知であるパラメー タが 27 個存在するため推定精度の急落はこの自由度の 高さに起因すると考えられる. 行列演算に基づく手法は すべてのディスプレイにおいて推定精度が高い. これは チャネル間相互作用を考慮しているためであると考えら れるが、XYZ から RGB への逆変換が困難であるため実 用的ではない. 提案手法である Masking モデルは SONY PCG-C1MR/BP 以外の LCD では非常に高い推定精度 を持つことが理解される.また、本手法では補間を用いる ためトレーニングデータ数による推定精度の変動も緩や かであり、S-curve モデルのような急激な変動はない. 唯 -, SONY PCG-C1MR/BP では GOG モデルや多項式 近似と同程度の推定精度に留まっている. これは次の事 実による.図5にSONY PCG-C1MR/BPのRチャネ ル0~255の入力レベルに対する XYZ の軌跡を示す.式 (1)の構造を持つモデルではR チャネルの XYZ 変動は ブラックの XYZ と R255 の XYZ を結んだ直線上の点で 近似されることになる、つまり色度が異なるだけでなく、 本来の輝度よりも低輝度に推定されてしまう.一方で表 2から SONY PCG-C1MR/BP におけるチャネル間相互 作用は輝度を低くするように働くため、前者の曲線を直 線で近似する誤差がちょうどチャネル相互作用による低 輝度化の役割を果たす結果となり、ランダムに生成され るため必然的に混色の多い、すなわちチャネル相互作用 の大きいテストデータに対し良好な推定結果をもたらす ことになる.

5. ま と め

本論文では Masking モデルを用いた液晶ディスプレ

 \boxtimes 4 Number fo training data vs Average $\Delta E^*_{94}({\rm a}){\rm SHARP}$ (b)iiyama (c)SONY

☑ 5 Tracking of XYZ in R channel(SONY PCG-C1MR/BP) イのキャリブレーション手法を提案した.本手法は液晶 ディスプレイのキャラクタライゼーションにおいて従来 法の精度低下の原因であったチャネル間相互作用をマス キングの概念により解決し,高精度な色再現特性の推定 を可能にした.またプライマリカラー色度の変動に起因 する誤差を主成分分析の導入により緩和した.本手法は 補間に基づく手法であるためデバイス依存性が非常に少 なく,液晶ディスプレイのみならず弱い非線形性を持つ システムに対し効果的である.

付 録

A. XYZ から RGB 信号値への変換

本節では実用上重要な XYZ から RGB 信号値への変 換方法を述べる. 一次色の指標を i(i=R,G,B), 二次色の 指標を j(j=C,M,Y) とすると式 (6), (7) から

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \{C_i(d_i) - C_i(d_j)\}\mathbf{P}_i + \{C_j(d_j) - C_j(d_{Gr})\}\mathbf{P}_j + C_{Gr}(d_{Gr})\mathbf{P}_{Gr} + \mathbf{I}_0$$
(付 · 1)

ここで \mathbf{P}_i は式 (8) によって定義されるチャネル i の主成 分ベクトルである. 式 (付・1) を変形して

$$\begin{bmatrix} C_i(d_i) - C_i(d_j) \\ C_j(d_j) - C_j(d_{Gr}) \\ C_{Gr}(d_{Gr}) \end{bmatrix} = A^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \mathbf{I_0} \right\} \quad (\pounds \cdot 2)$$
where $A = [\mathbf{P}_i \ \mathbf{P}_j \ \mathbf{P}_{Gr}]$

を得る. 式 (付・2) の第三行目から C_{Gr} の特性は機 知であるため d_{Gr} を求めることができる.次に第二 行目から d_{Gr} 及び C_j の特性から d_j を得る. 同様に して d_i を求める. ここで i,j の組み合わせとしては (R,M),(R,Y),(G,Y),(G,C),(B,C),(B,M) の六通りの可能 性が考えられるが,全ての組み合わせについて計算を行 い次の条件を満たす (i,j) を選択する.

$$\begin{cases} d_{Gr} \leq d_j \leq d_i \\ 0 \leq d_{Gr}, d_j, d_i \leq 255 \end{cases}$$
 (ff·3)

(i,j) の組み合わせに基づき *d*_{*Gr*}, *d*_{*i*}, *d*_{*j*} から *d*_{*R*}, *d*_{*G*}, *d*_{*B*} を 求める.

〔文 献〕

- Roy S. Berns, et al : "CRT Colorimetry", COLOR research and application, vol. 18, no.5, pp299-325(1993)
- 2) Youngshin Kwak, et al: "Accurate Prediction of Colours on Liquid Crystal Displays", Proceedings the Ninth Color Imaging Conference, pp355-359(2001)
- 3) IEC 61966-4: Multimedia system and equipment Colour measurement and management - Part 4: Equipment using liquid crystal display panels
- 4) Jason E. Gibson, et al: "Colorimetric Characterization of Three Computer Displays", Munsell Color Sci. Lab. Technical Report(2000)
- 5) Nobuhiko Tamura, et al: "Calibration of LCD Colorimetry Based on Principal Component Analysis", pp1545-1548, proc. Asia Display / IDW'01 (2001)

6) Nobuhiko Tamura, et al: Evaluation of image quality on reflective-type LCD - Calibration based on PCA - , proc. IS&T 2001 PICS Conference 2001;368-371

7) 三宅洋一: "ディジタルカラー画像の解析評価", 東京大学出版会 (2000)

- 8) 大田登: "色再現工学の基礎", コロナ社 (1997)
- 9)小林駿介:"次世代液晶ディスプレイ", 共立出版 (2000)

