

Mcalibrator: MATLAB 言語を用いたディスプレイ校正のための
統合型 GUI ソフトウェアの開発

—ディスプレイ特性に依存しない新しい色校正手法の提案とその有効性の検証—

番 浩 志^{*,**}・山 本 洋 紀^{*}・江 島 義 道^{***}

* 京都大学, ** 日本学術振興会, *** 京都工芸繊維大学

Mcalibrator: MATLAB integrated GUI software
for display calibration—A proposal of a new color calibration procedure applicable to a wide range
of display devices and evaluation of its efficiency—Hiroshi BAN,^{*,**} Hiroki YAMAMOTO,^{*} and Yoshimichi EJIMA^{***}*Kyoto University*, Society for the Promotion of Science**
and Kyoto Institute of Technology****

The calibration of color monitors is an essential step for psychological experiments on color perception. For CRT displays, a procedure was established and standardized as the two-stage method of gamma correction, followed by linear color transformation. However, the standard method may not be appropriate for non-CRT displays. The present study has demonstrated that indeed the standard method was not applicable to some LCD (Liquid Crystal Display) and DLP (Digital Light Processing) display devices, which are now increasingly used in psychological or brain-imaging experiments. We therefore propose a new display calibration procedure which is based on least-square estimations. This method has a much broader range of applicability because it assumes only a piecewise linearity of the system and does not require any presumed model of the display properties. The proposed procedure, together with customizable gamma corrections, was integrated into a GUI-based calibration software which was written with MATLAB and called 'Mcalibrator'. The applicability and efficiency of our software to a wide range of displays, including LCD and DLP devices, was confirmed by comparing the calibration accuracy of our procedure with that of the standard two-stage method.

Key words: photometry, colorimetry, display characterization, vision research software

はじめに

色覚の心理実験においてディスプレイ装置の色校正は必須であり、実験間の条件を統制するためにも、実験者の負担を軽減するためにも、標準的な手続きを確立する

必要がある。

視覚刺激を呈示する際に従来から一般的に用いられてきた CRT (Cathode Ray Tube, 陰極管) ディスプレイに関しては、必要とする色を正確に呈示するための標準的な色校正手法が確立されている (Berns, 1996; Brainard, Pelli & Robson 2001)。それは 2 段階からなり、赤と緑と青 (以下 RGB) の各チャンネルの独立性と全入力域での色度の恒常性を仮定した上で、CRT の内部特性に基づいて RGB 各チャンネルの入出力関係に見られる非線形性を線形に補正 (ガンマ補正) した後に、色変換行

* Department of Human Coexistence, Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University Yoshida-nihonmatsu-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501

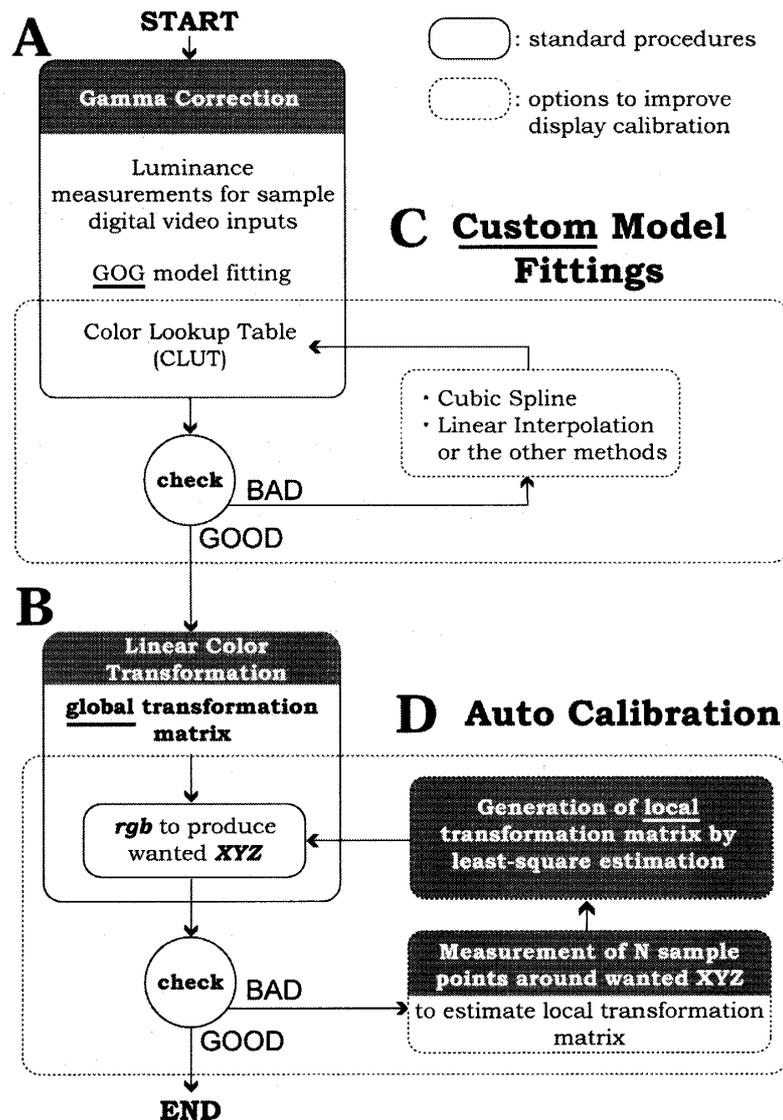


Figure 1. Flowchart of display characterization & chromaticity calibration

Display calibration procedure was standardized as the two-stage model of gamma correction (stage A) followed by linear color transformation (stage B). A new calibration procedures we propose consists of 'custom model fitting' to improve the accuracy of gamma correction (stage C), and 'auto calibration' based on least-square estimations for calculating accurate RGB digital video inputs to produce wanted XYZ values (stage D).

列を用いた線形計算によって色を校正するものである。

しかし、近年の心理学研究や脳イメージング研究で盛んに使用されるようになったCRT以外のディスプレイ装置、例えばLCD (Liquid Crystal Display) やDLP (Digital Light Processing) 方式のディスプレイやプロジェクタの中には、RGBチャンネル間の相互作用などCRTとは異なる入出力特性・色再現特性を有するものが存在する (Fairchild & Wyble 1998)。このようなディスプレイ装置に対してCRTの内部特性に基づいて提案された標準的な2段階の色校正手法を適用しても十分な精度が得られるとは考えられず、新たな校正手法の確

立が望まれている。

こうした現状を踏まえ、本研究では標準的な色校正手続きが適用できないCRT以外のディスプレイ装置に対しても、高い精度で色校正が行える新しい手法を提案する。その手続きは区分線形的手法を色空間へ応用したものである。必要な色の近傍の局所的な空間で最小2乗推定と実測および補正を繰り返しながら色を校正する。この手法は、システム全体の線形性やディスプレイ・ガンマのモデルを一切仮定しないため、応用範囲の広い色校正手続きを提供するものである。また、その実用性を検証するため、標準的な色校正手続きと我々が提案する新しい

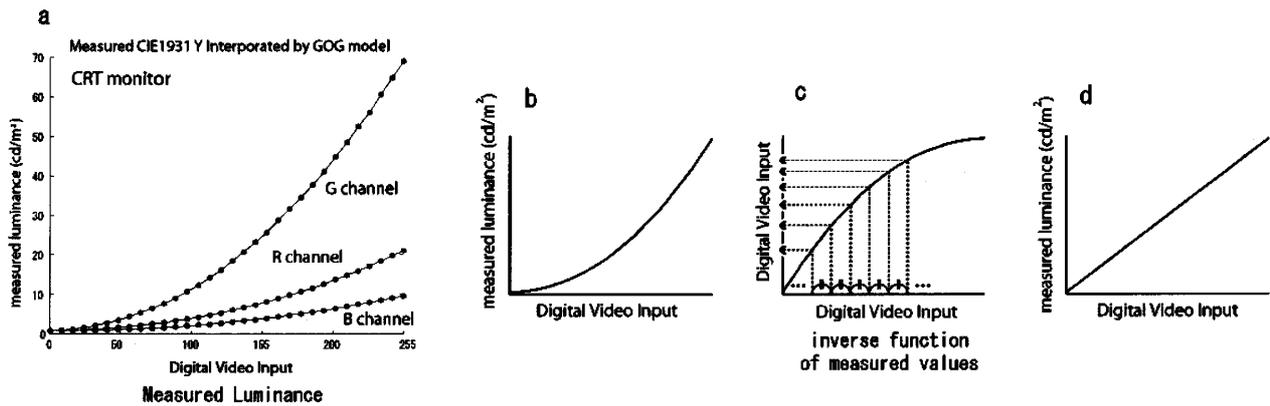


Figure 2. Gamma correction by GOG model

- The plot shows the gamma functions for a typical CRT monitor.
- Interpolating the measured values based on the GOG model. For most CRT monitors, measured gamma functions are well fit by the GOG.
- GOG model fitting has an advantage that it is easily inverted to determine digital video input values to generate wanted chromaticity.
- The plot shows linearized relationship between digital video inputs and measured luminance.

手続きとを CRT, LCD, DLP の各ディスプレイ装置に適用した場合に、較正結果にどの程度の誤差が生じるかを定量的に評価した。

また、我々が提案する色較正手法は、標準的な 2 段階の手法とともに、統合ソフトウェア Mcalibrator として実装された。Mcalibrator は、カスタマイズ可能なガンマ補正と上述の区分線形的な色較正手法を組み合わせることで、適用範囲の広い手続きを提供する。プログラムは OS に依存しない MATLAB 言語 (Mathworks 社) を用いて記述されており、統一的な GUI (Graphical User Interface) による高い操作性を備えている。

方 法

Figure 1 に、CRT で確立された標準的な 2 段階の色較正手続きと、我々が本論文で提案する色較正手続きの概略を示した。図中、A-B の流れが標準的な 2 段階の色較正手法を示したものである。また、C-D は我々が提案する手法で、2 段階の色較正の各段階における較正精度が不十分である場合にそれを改善するオプションとして実装される。本節では、まず標準的な色較正手法の概略を述べた後、我々が提案する色較正手法のアルゴリズムについて詳述し、最後に開発したソフトウェア Mcalibrator への実装について述べる。

標準的な 2 段階色較正手法

1. ガンマ補正 (Figure 1 の A)

Figure 2 にガンマ補正処理の流れを示す。まず、ディスプレイの RGB 各チャンネルについて、いくつかの入力

値に対する輝度を計測する。Figure 2a に示すように、両者の関係は非線形となることが知られている。次に、この測定データにモデル関数をフィットする。標準的には、CRT の内部特性を定式化した GOG (Gain-Offset-Gamma) 関数

$$f(x) = \begin{cases} \left(gain \times \frac{x-x_0}{1-x_0} + offset \right)^\gamma & x \geq x_0 \\ 0 & x < x_0 \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

が採用される (Berns, 1996; Day, 2002) (Figure 2b)。ここで、 $gain$, $offset$ は定数、 x はチャンネル入力値 ($0 \leq x \leq 1$ の離散値)、 x_0 は輝度が 0 以上となるチャンネル入力値、 γ は指数である。この逆関数 $x=f^{-1}(y)$ を用いれば、任意の輝度を生成するために必要な入力値を計算できるので (Figure 2c)、線形に増加する輝度値 y_i ($i=0, 1, \dots, n$) を生成する入力値 x_i を f^{-1} より求める。求めた入出力の組 (x_i, y_i) をカラー・ルックアップテーブル (CLUT) と呼ばれる表にまとめ、これを介して映像を出力すれば各チャンネルの入出力関係が線形化される (Figure 2d)。

2. 色の線形変換 (Figure 1B)

希望の色は、RGB チャンネルが線形独立 (チャンネルの独立性) で、各チャンネルの色度が輝度に依存しない (プライマリカラーの恒常性) ならば、簡単な線形計算で求めることができる。まず、RGB 各チャンネルの最大入力時の 3 刺激値 $rXYZ$, $gXYZ$, $bXYZ$ を測定し、それらを各列に並べた行列

$$pXYZ = [rXYZ \ gXYZ \ bXYZ] \dots\dots\dots (2)$$

を作成する。ここで、 $pXYZ$ は色変換行列と呼ばれるも

のである。この $pXYZ$ を用いて、入力値 rgb に対して出力される色の3刺激値 XYZ は各チャンネルの線形和

$$XYZ = pXYZ \cdot rgb \quad \dots\dots\dots(3)$$

となる。これより、希望の色 XYZ を生成するために必要な RGB 入力 rgb は逆行列 $pXYZ^{-1}$ から

$$rgb = pXYZ^{-1} \cdot XYZ \quad \dots\dots\dots(4)$$

として計算できる。もし、チャンネル入力値がゼロのときの残光が無視できない場合には、残光分をあらかじめ差し引いておけばよい。

本研究で提案する色較正手法

ディスプレイ装置によっては、CRT と異なる入出力特性・色再現特性を有するために上述の2段階の手順では適切な較正ができない場合がある。そこで、Figure 1 の流れ図の点線で囲まれた2つの手法(C&D), Custom Model Fitting と Auto Calibration を提案し、較正精度の向上を試みた。その詳細は以下のとおりである。

1. Custom Model Fitting (Figure 1C)

GOG モデルに基づくガンマ補正で精度が不十分な場合には、指数関数にこだわらず、それ以外の補間方法を用いることで対処できる。ディスプレイの特性に合わせてキュービック・スプライン補間法、高次多項式近似法、探索法、直線補間法、S字関数のフィッティングから最適なものを選択することで、RGB チャンネルの入出力関係をより正確に記述可能である。これらの代替法のうち、特にキュービック・スプライン補間法は、最近の測定装置の精度向上ともあいまって、後述の検証結果が示すように種々のディスプレイ装置の入出力特性を記述する際に GOG モデル以上に有効に機能することが示された(検証参照)。

2. Auto Calibration (Figure 1D)

標準的な CRT ディスプレイ以外のデバイスでは、RGB チャンネルが独立ではない(チャンネル間相互作用)、チャンネル入力値によって色度に変化する(プライマリカラーの非恒常性)という性質を有するものが存在する(Fairchild & Wyble 1998)。このようなディスプレイ装置に対しては、各チャンネルの独立性および全入力域での色度の恒常性を仮定した標準的な2段階の色較正手順では十分な精度が得られないと考えられる。本研究では、このような場合でも正確な色較正を行える手法を開発した。

開発した手法は、独立性・線形性を全入力域に対してではなく、必要とする色の近傍でのみ仮定するもので、区分線形的手法を色空間に応用したものである。そのアルゴリズムは下記に示すとおり、3刺激値 XYZ と RGB

チャンネル入力値 rgb の関係をよく説明する色変換行列を色空間の局所領域内で繰返し最小2乗推定するものである。

自動色較正アルゴリズム

繰返し数 i 回目 ($i=1, 2, \dots, N$) の色変換行列の逆行列を T_i とする。

ステップ 0

$i=1$ とする。

初回の T_1 を、標準的な手続きで得られた式(2)のグローバルな色変換行列の逆行列 $pXYZ^{-1}$ とする。

ステップ 1

T_i を用いて必要とする色 $wXYZ$ を生成するために必要な RGB 入力値 rgb を計算した後、実際にその色を呈示・測光し、理想値 $wXYZ$ との誤差 $eXYZ$ を計算する。

ステップ 2

XYZ 空間において $wXYZ$ を中心とする半径 $(2-(i-1)/(N-1)) \cdot \|eXYZ\|$ の範囲で18個の色をランダムに生成し、ステップ1と同様に実際に色を呈示・測光する。この18点の測光値をもとにローカルな色変換行列 T_{i+1} を下記の式(最小2乗推定)で計算する。

$$T_{i+1} = [sXYZ \cdot sXYZT]^{-1} \cdot sXYZ \cdot sRGBT \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 $sXYZ$ はランダムに生成された18個の色の各実測値 XYZ を列に並べたもの、 $sRGB$ は $sXYZ$ を得るために必要な RGB チャンネル入力値 rgb である。

ステップ 3

推定された T_{i+1} を用いて再び $wXYZ$ を生成するのに必要な RGB チャンネル入力値 rgb を計算した後、実際にその色を呈示・測光する。

ステップ 4

CIE1931xyY 空間で RMS 誤差を計算し、所定の精度が得られたら終了する。そうでなければ $i=i+1$ としてステップ1に戻る。

Figure 3 に MATLAB 言語のサンプルコードを示した。

Mcalibrator への実装

標準的な2段階の色較正手法と本研究で提案した Custom Model Fitting および Auto Calibration の手法を実装するソフトウェア Mcalibrator を開発した(Figure 4)。記述には MATLAB 言語を用いた。その特徴は以下のとおりである。

1. GUI ベースで色較正が可能

GUI (Graphical User Interface) を採用し、ディスプレイ特性の測定から色の線形変換までの色較正手順を視覚的に確認しながら行える、利用者が使いやすい環境を整えた(Figure 4)。実験用途以外にも学生を対象にした

```

pXYZO=[RedX GreenX BlueX
        RedY GreenY BlueY
        RedZ GreenZ BlueZ]; % phospher XYZ

T0=inv(pXYZO); % initial Transformation Matrix
wxyY=[your_x your_y your_Y]'; % wanted xyY
wXYZ=(transform xyY->XYZ); % wanted XYZ

% search space
ss0=2.0;
ss1=1.0;

for i=1:iteration % iteration
    [R G B]'=T0*wXYZ; % transform from XYZ to RGB
    xyY0=Measure([R G B]'); % Measure
    XYZ0=(transform xyY->XYZ);
    eXYZ=abs(XYZ0-wXYZ); % error in XYZ space

    % set search space: from 2*error to 1*error
    ss=ss0+(i-1)*(ss1-ss0)/(iteration-1);
    % set random sample points
    for j=1:samples % samples > 18
        sXYZ(:,j)=wXYZ+unifrnd(-ss*eXYZ, ss*eXYZ);
        sRGB(:,j)=T0*sXYZ(:,j);

        (sRGB<0 -> 0, sRGB>1 ->1) % correct outliers

        msXYZ=Measure(sRGB(:,j));
    end % samples

    % Estimate New Transformation Matrix
    % by Least-Squares
    T1=inv(msXYZ*msXYZ')*msXYZ*sRGB'; % estimation by least-square
    T1=T1';

    % new required RGB
    RGB1=T1*wXYZ;
    xyY1=Measure(RGB1);
    T0=T1;

    % evaluate error
    e=(xyY1-wxyY)./wxyY*100 % [%] error
    rms=sqrt((e.*e)/3);

    (write result to log file) % log result

    if rms < rmserr
        break;
    end % rms
end % iteration

```

Step 0

Step 1

Step 2

Step 3

Step 4

Figure 3. Sample MATLAB code for automated chromaticity calibration procedure.

Here, Measure (A) in Steps 1-3 mean user-defined MATLAB (or external) function to measure CIE1931 *xyY* or *XYZ* values for *A* (*rgb* values). See the text for details of the algorithm.

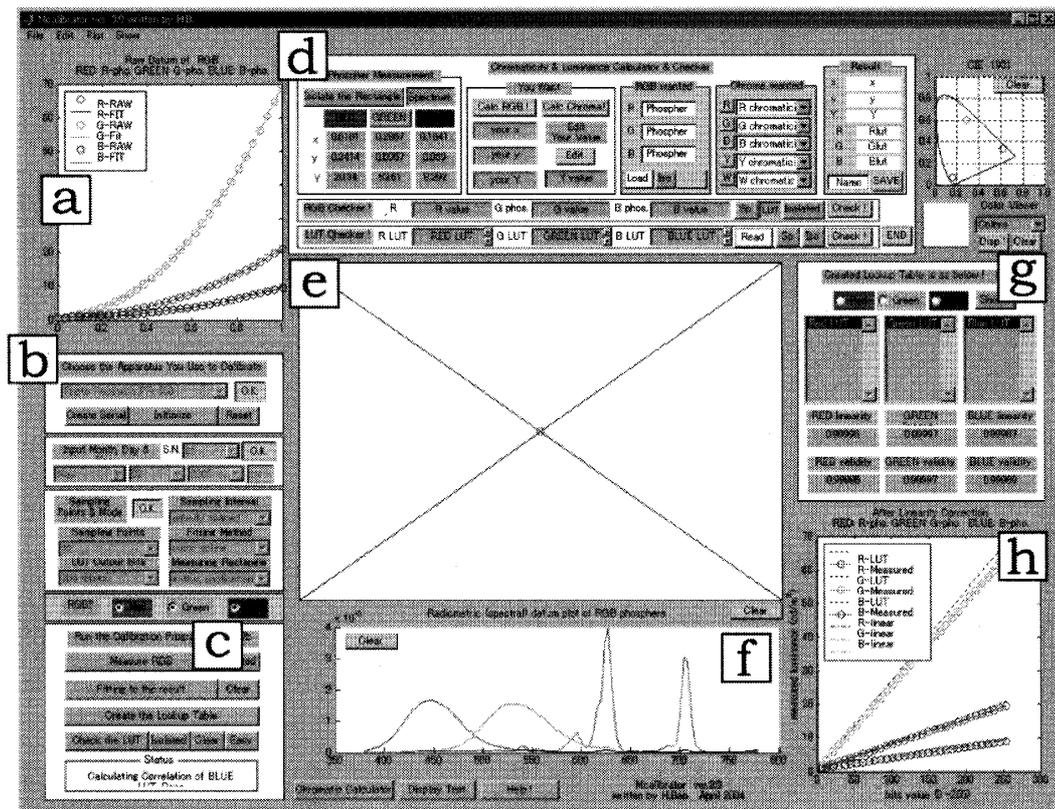


Figure 4. Mcalibrator GUI display

Mcalibrator system enables standard and customized display calibration easily and graphically through integrated GUI interface.

- Raw plots of digital video inputs and luminance values interpolated by some fitting functions.
- Input window of basic information such as date, fitting parameters, etc.
- Buttons for measurement, fitting, creating color lookup table, and checking the validity
- Buttons for color calculation and auto calibration
- Color display window, in which target chromaticity to measure is presented (separated and full-screen windows are also available).
- Spectra of RGB phosphors
- Created color lookup tables are displayed here
- Relations between digital video inputs and measured luminance after linear-correction

心理学実習などの講義でも利用可能である。

2. さまざまな刺激呈示ソフトウェアとの連携

本ソフトウェアの線形補正の結果は、テキスト形式のカラーlookupアップテーブル (CLUT) として出力されるので、CLUTを読み込むことでMATLAB以外の言語で記述された他の刺激呈示ソフトとの連携も可能である。また、測定対象となる色刺激の呈示には、外部プログラムを用いることもできる。

3. さまざまな測光装置への対応

シリアル通信機能を持つ装置であれば、簡単に本ソフトウェアとの連携が可能である。このためには、ハードウェア特有の短い制御プログラムを作成するだけでよい。現在のところ、分光放射輝度計: Photo Research社 PR-650, および色彩輝度計: Konica Minolta社 CS-100

Aの2機種に対応している。

検 証

本論文で提唱する自動色較正手法の精度を検証するため、標準的な2段階の色較正手法との較正精度の比較を行った。検証にはMcalibratorを用い、4種類の異なる特性を持つディスプレイ装置の色較正精度を比較した。また、入出力関係の線形補正に関しては、一般的なGOGモデルに基づく手法とキュービックスプライン補間法の2通りを行い、両者の精度、汎用性を比較検討した。

検証条件

使用したディスプレイは、CRTディスプレイ: SONY MultiScan 17SEII (以下CRT), LCDディスプレイ: EIZO FlexScan L360 (以下LCD1), LCDディスプレ

Table 1

Target XYZ values

We used 5 XYZ values listed above for testing the validity of standard and our calibration procedure.

| | RED | GREEN | BLUE | YELLOW | WHITE |
|---|-------|-------|-------|--------|-------|
| X | 37.10 | 27.78 | 35.84 | 23.13 | 29.43 |
| Y | 30.00 | 30.00 | 30.00 | 30.00 | 30.00 |
| Z | 35.61 | 35.36 | 65.73 | 5.78 | 35.51 |

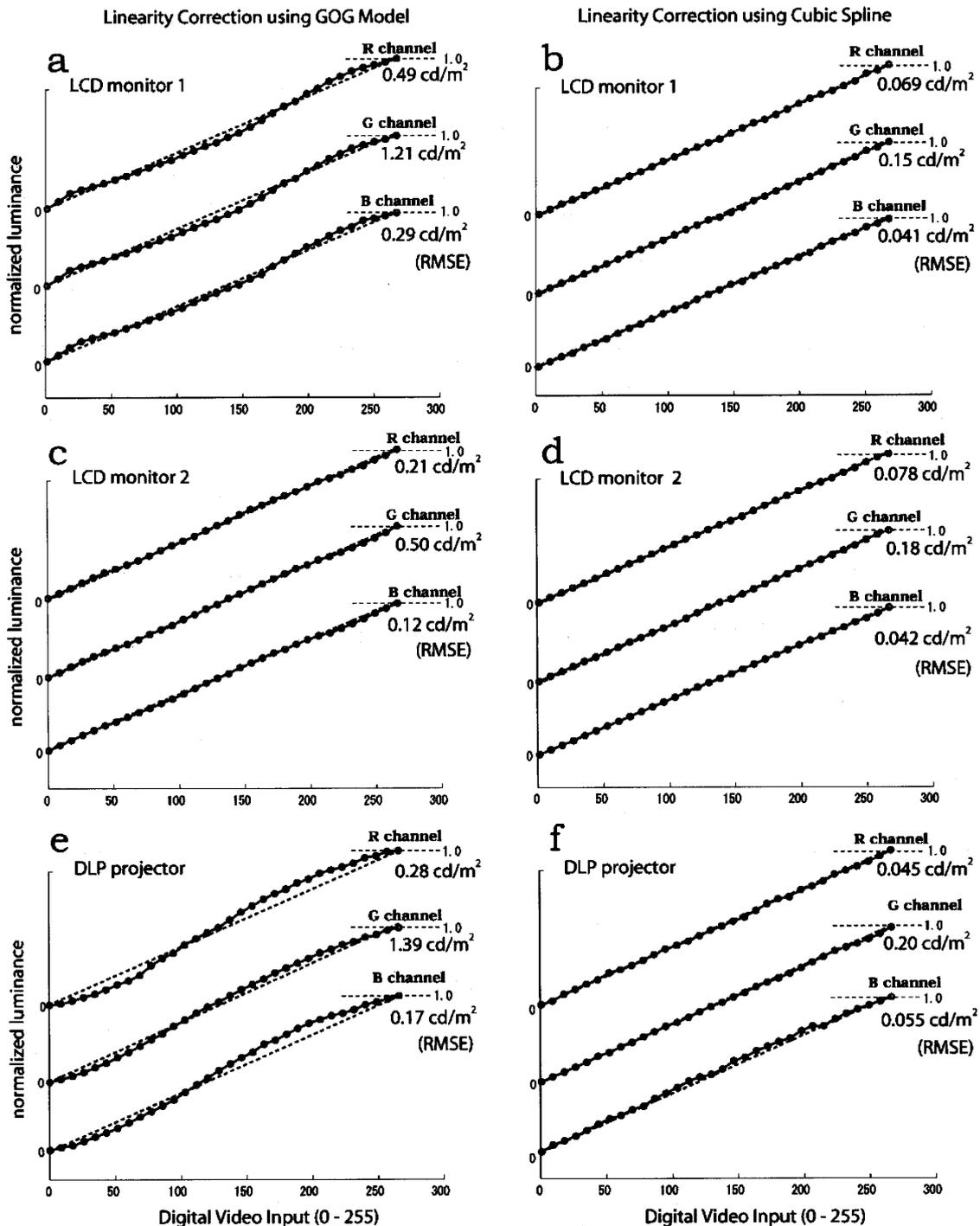


Figure 5. Linear correction of RGB digital video inputs and output luminance

GOG model was not applicable to some LCD or DLP display devices. Cubic spline interpolation realized complete linear correction between digital inputs and output luminance.

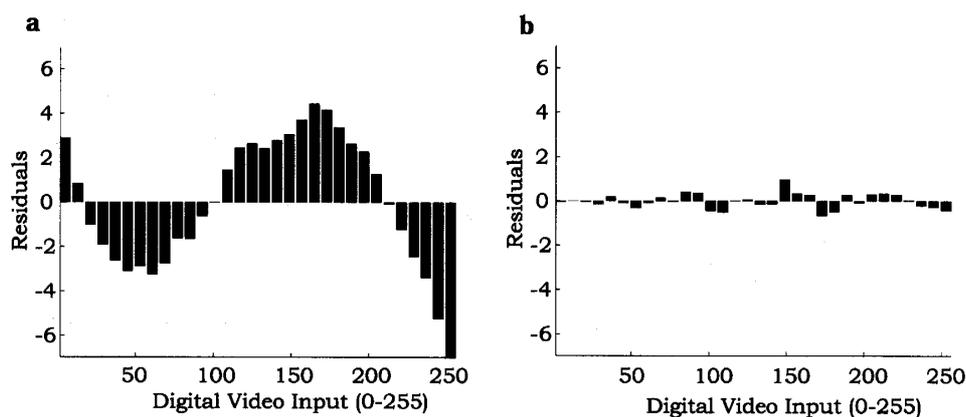


Figure 6. Residuals between measured and estimated luminance in each bin of video input values—an example of a DLP projector

- a. Residuals between real and estimated values after fitting traditional GOG model
 b. Residuals between real and estimated values after cubic spline method

イ: Iiyama AS4635U (以下 LCD2), DLP プロジェクタ: PLUS digital projector X-2000 (以下 DLP) の 4 種であった。DLP については, ND フィルタで減光して, 半透過スクリーンに映像を投射した際の透過光を測定した。各呈示装置は最低 30 分間のウォームアップを行った。3 刺激値 XYZ の計測には分光放射輝度計 (Photo Research 社 PR-650) を用いた。ソフトウェアはノート PC (IBM 製 ThinkPad A31p, OS: Windows2000, グラフィックカード: ATI Mobility FireGL 7800) で動作させた。色の表示は MATLAB ソフトウェアの描画機能を用いて, ディスプレイ中央, 全画面の約 1/3 に対して True Color モードで行った。分光放射輝度計からディスプレイまでの距離は 40 cm であった。ディスプレイと分光放射輝度計は暗幕で覆われた。

検証方法

RGB 各チャネルについて, 等間隔に 32 点の入力サンプル値をとり, 3 刺激値 XYZ を測定した。この実測値に GOG モデル, およびキュービックスプライン補間モデルをフィッティングしてチャネルの入出力関係を推定し, 入出力関係の線形化を行った。このとき, ゼロレベルにおける残光の影響は予め除去した。次に, 各チャネルについて, 推定に用いた点とは異なるサンプル点に対する 3 刺激値 XYZ を再計測し, 両モデルによる線形補正が妥当であるかを確かめた。さらに, Table 1 に示す 5 色の 3 刺激値 XYZ を得るために必要な RGB 値の推定を行い, その精度を XYZ 空間内で評価した。これらの色は, 筆者らの所属する研究室で行ったメタコントラストマスキングの脳機能イメージング (fMRI) 実験 (前田・福永・中越・山本・松野・田中・恵飛須・梅田・江島, 2003) および心理実験 (山城・前田・高田・山本・

江島, 2004) の予備実験で用いられたものである。自動色較正の検証では, 局所的な色変換行列の推定の最大繰返し数は 10 回とし, RMS 誤差が 1%未満になった際に終了するように設定した。誤差が 1%以上の場合でも繰返し数 10 回を超えた場合には較正を終了した。このとき, カラーlookupアップテーブル (CLUT) はキュービックスプライン補間モデルによって生成されたものを使用した。

検証結果と考察

入出力関係の線形化

Figure 5 は, GOG モデルおよびキュービックスプラインを用いて LCD1, LCD2, DLP の各ディスプレイ装置に対する入出力関係の線形補正を行った結果を示したものである。

GOG モデルの場合, CRT (図は掲載せず), LCD2 に対しては補正の精度は高かったが, LCD1, DLP に対する精度は低かった (Figure 5 左列)。これらの呈示装置では低入力値および高入力値で輝度が実際よりも高くなり, 中間の入力値においては低くなる傾向が見られた。これは, 先行研究 (Fairchild & Wyble 1998) や本研究で示された (図は掲載せず) ように LCD1 や DLP ではチャネル入出力関数が S 字曲線を描き, GOG モデルで仮定する指数関数には適合しないためである。これに対して, キュービックスプライン補間法を用いた場合には, どのディスプレイ装置においてもほぼ完全な線形補正が実現した (Figure 5 右列)。

両フィッティング条件で特に顕著な差が観察された DLP について, 線形補正の残差を比較したものが Figure 6 である。GOG モデルのフィッティングでは, 残差

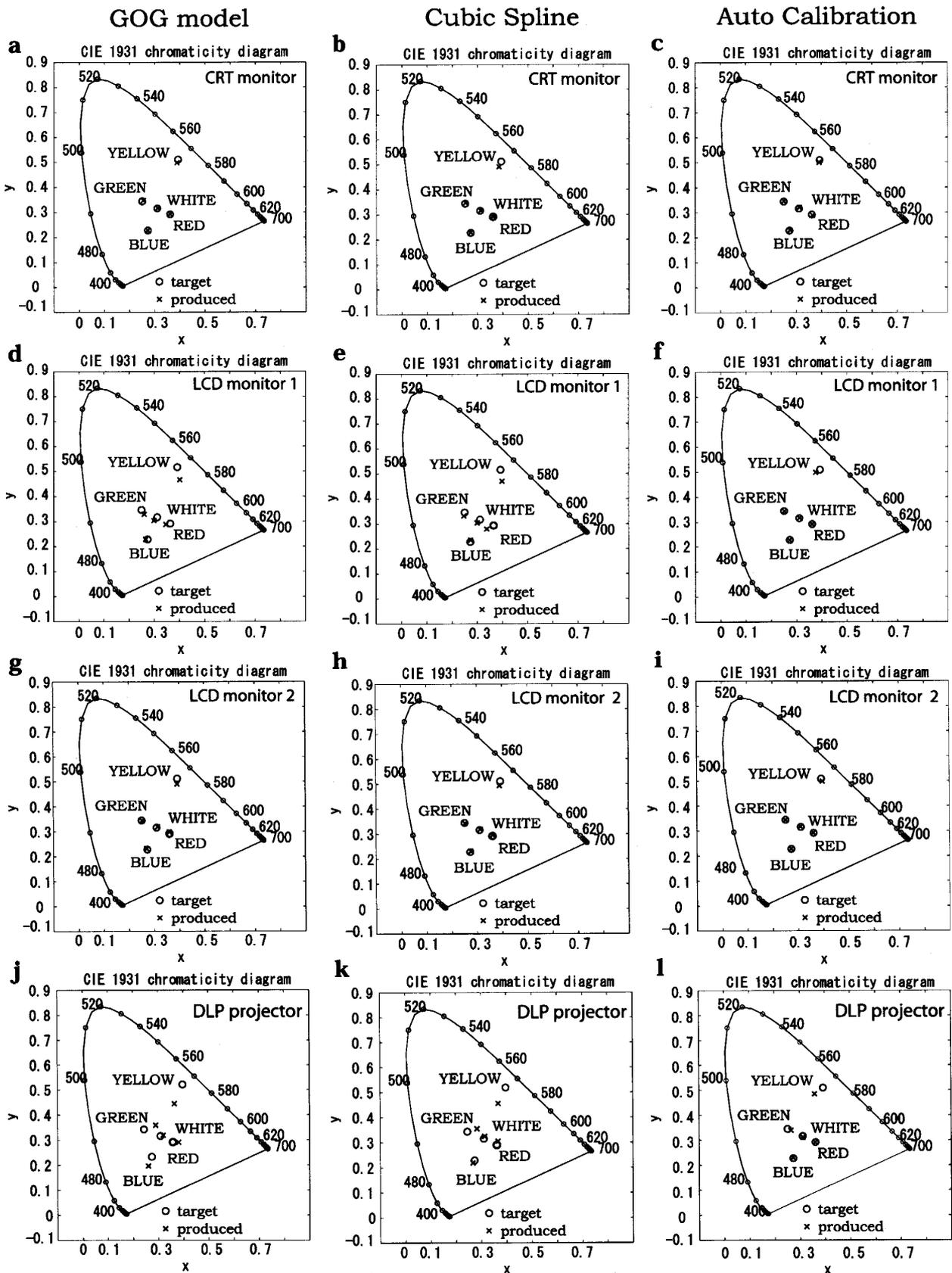


Figure 7. Target and produced CIE1931 x, y values for each display device

The circles represent target 5 CIE1931 x, y values listed on Table 1 as XYZ values. The 'x' represents measured values produced by GOG method, Cubic spline, or least-square method.

Left column: GOG model, middle column: Cubic spline, right column: least-square estimation.

From upper to lower: CRT, LCD1, LCD2, and DLP

Table 2

Errors (RMSE) between estimated and measured XYZ values

In this table, 'min' indicates the smallest RMSE value in five XYZ estimations, 'max' indicates the greatest RMSE value, and 'mean' indicates the mean of five RMSE values. Automated least-square estimation procedure (Auto Calibration) drastically improved the accuracy of chromaticity estimations for LCD and DLP display devices.

| | | CRT | LCD1 | LCD2 | DLP |
|------------------|------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| GOG | min | 0.28 | 1.96 | 0.52 | 1.45 |
| | max | 1.03 | 14.80 | 1.19 | 10.60 |
| | mean | 0.51 | 9.44 | 0.72 | 5.50 |
| Cubic spline | min | 0.19 | 3.34 | 0.73 | 3.54 |
| | max | 0.44 | 13.97 | 1.33 | 8.92 |
| | mean | 0.28 | 11.10 | 0.91 | 4.98 |
| Auto calibration | min | 0.26 | 0.16 | 0.28 | 0.19 |
| | max | 1.10 | 2.82 | 0.67 | 1.88 |
| | mean | 0.65 | 0.77 | 0.33 | 1.39 |

(RMS error)

の分布がランダムではなかった。これに対してキュービックスプラインの場合は、残差が小さく、その分布に規則性は観察されなかった。これは、サンプル数が適切であれば、実測値を滑らかに内挿するスプライン補間でS字形の入出力関係を十分に記述することができるからである。スプライン補間には実測値に少数の異常値が含まれるだけでも内挿曲線が大きく変化してしまうという欠点はあるものの、十分な精度で測光できる装置があれば問題にはならない。むしろ特性の異なるさまざまなディスプレイ装置を状況に応じて使い分けなければならない昨今の心理学や脳イメージングの実験環境においては、装置の内部特性をモデル化しない補間に基づく較正手法の方がデバイスへの依存性が少なく、汎用的かつ効果的であろう。

色の生成

Figure 7は4つのディスプレイ装置(各行)についてGOGモデル(左列)、キュービックスプライン補間法(中央列)、自動色較正法(右列)による5色(図中○)の較正結果(図中×)をCIE1931xy色度座標上に示したものである。また、Table 2は推定された色度と実測値とのXYZ空間におけるRMS誤差を示す。この表において、minは最も較正精度が高かった色に対するRMS誤差、maxは最も精度が低かった色に対するRMS誤差、meanは5色の色較正に対するRMS誤差の平均である。

色較正の精度はディスプレイの種類に大きく依存した。GOGモデルで色較正を行った場合、CRT、LCD2ではRMS誤差が1%未満となり高い精度で色較正が可能であったが、LCD1、DLPではRMS誤差に5%以上の誤

差が生じた(Table 2)。LCD2およびDLPで色較正精度が低かったのは、第一段階の処理である入出力関係の線形補正が不十分であったことが要因の一つであろう。しかし、Table 2に示されたキュービックスプライン補間の結果を見ると、線形補正は高い精度で実現しているにもかかわらず、精度の改善はほとんど見られなかった。

したがって、色較正に誤差が生じる原因は、単に入出力関係の線形化の精度に起因するのではなく、チャンネル間相互作用やプライマリカラーの非恒常性といった、CRTには見られないLCDやDLPの特性によるものであると予想される。そこで、適切な色較正ができたCRTと不十分であったDLPに対して、プライマリカラーの恒常性の度合いを比較した。Figure 8がその結果で、各チャンネル入力値を0から最大値まで32段階で増加させたときの色度変化をCIE1931xy色度座標上で示したものである。両呈示機器ともFigure 8のa, bに示したようにチャンネル入力値の増加に伴い、色度がCIE色度図中心からRGB各方向へ遷移した。この変化は、CRTでは特に低い輝度範囲で顕著であることから、ゼロレベルでの残光の影響も考えられる。しかし、DLPにおいては中・高輝度においても色度の段階的な変化が確認されたことから、残光だけでは色変化の説明は難しい。以上を確認するために、残光の補正を行い、Figure 8のc, dにその結果を示した。本検証においても、残光の影響はあらかじめ除去しているため、Figure 8のc, dが実際の検証に用いられた両ディスプレイ装置のプライマリカラーの恒常性を示していることになる。この図から明らかな通り、ゼロレベル補正によってCRTではチャンネル入力値に依存した色度変化は消滅しており、色度の恒常

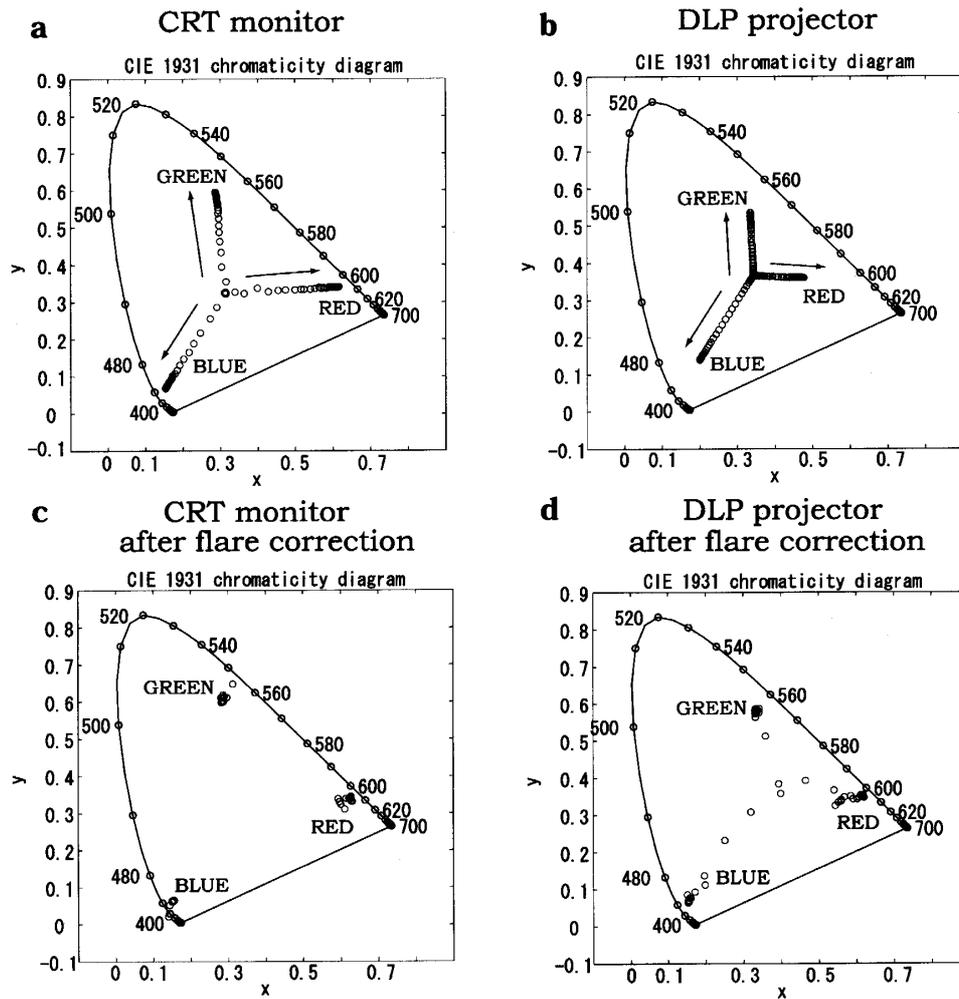


Figure 8. Measured chromaticities of red, green, and blue phosphors

a. CRT monitor, b. DLP projector, c. CRT monitor after flare correction, d. DLP projector after flare correction. Arrows shown in panels a and b indicate increases of digital video inputs of RGB channels from 0.0 to 1.0. Chromaticities gradually changed depending on digital video inputs for both CRT and DLP before flare correction (a and b). For DLP projector, chromaticity constancy of primaries was not realized even after flare correction (d).

性が確認できるが、DLPではある程度 (RMS 誤差で 50%弱) の改善は確認されたものの依然として大きな色度変化が見られた。

このように今回使用した DLP はプライマリカラーが恒常ではないため、恒常性を仮定する標準的な色較正手法を適用した場合には 5%以上の誤差 (RMS 誤差) が生じた (Table 2 右列上段)。このようなディスプレイ装置に対しても、本研究で提案した必要な色のごく近傍でのみ恒常性・線形性を仮定する区分線形的な色較正手法を適用することで適切な補正が可能であった。実際にこの手法を適用して Table 1 の 5 色の較正を行った結果が Figure 7 の右列である。また、Table 2 の 3 段目にこの手法を用いて 5 色の較正を行った際の RMS 誤差を示す。ここで、自動色較正は RMS 誤差が 1%未満になる

か、最小 2 乗推定の繰返し数が 10 回に達した時点で終了するように設定した結果であり、CRT は 1 回目ですべてのディスプレイ装置において標準的な GOG モデルに比べて大幅な精度の改善が確認された。特に、RMS 誤差で評価すると (Table 2)、LCD1 に対しては約 14 倍、DLP については約 4 倍の較正精度の改善が見られた。CIE1931 xy 色度座標および輝度に換算すると、全ディスプレイ装置に対する色度の平均誤差はおおよそ 0.0036、輝度については平均 1%の誤差であった。この精度は、今回検証に用い

られた5色以外の色についてもほぼ認められた(図は掲載せず)。

また、LCD1とLCD2に対する較正結果の比較から(Figure 5, Figure 7, Table 2), LCDの場合は同じ表示方式といってもディスプレイによってチャンネル入出力特性および色再現特性がかなり異なることが分かる。よって、LCDディスプレイの特性をCRTに対するGOGモデルのような一般化で記述することは容易ではないが、キュービックスプライン補間による入出力関係の推定と最小2乗推定による色較正手法によって、両者ともRMS誤差1%未満での色較正が可能であった。これらの結果からも提案する手法の有効性が確認できる。

自動色較正の所要時間に関しては、分光放射輝度計PR-650を用いた今回の検証では、LCD1, LCD2に関しては1色あたり約3分を要し、この間に18個のサンプル点の取得および各々につき1回1~3秒の測光を4サイクル繰り返した(全72回の測定)。DLPでは1色あたり約3分から5分を要し、この間にあらかじめ設定した10回の繰返し回数(サンプル点の測光は全部で90回)内に所定の精度を達成できない場合もあった(1色)。

他研究との関連

プライマリカラーの非恒常性やチャンネル間相互作用の影響を克服する色較正手法として、行列演算モデル(IEC 61966-4, 2000)やマスキングモデル(田村・津村・三宅, 1997)などが提案されている。これらモデルアプローチは非恒常性や相互作用をモデルによって明示的に組み込み、それを測定・計算することで、すべての色を再現できる変換行列を決定するものである。これに対して、我々が今回提案した手法はモデルを仮定しないので、想定外の未知の特性を有するディスプレイ装置に対しても適用できる可能性が高いと考えられる。一方で、無限の色を瞬時に計算することはできず、オンラインで新たな色を次々と生成する必要がある実験では使用できない。しかしながら本アプローチは、比較的少数の色しか使用しない実験においては、短時間でほぼ自動的な色較正が可能で、非常に実用的な手法である。

また近年、特にカラーデザイン系の分野でICC(International Color Consortium)プロファイルと呼ばれる色較正手法が盛んに用いられるようになった。これは、ディスプレイ入出力関数とプライマリカラーの色度値に関する情報がメーカーから提供されるという点を除けば、標準的な2段階の色較正手法と本質的には変わらない。ガンマ補正などの手間が軽減されるという利点はあるものの、本論文で示したような標準的な手法が抱える

問題点を有している。また、ディスプレイ特性の経年的な変化への対応も難しい。少なくとも現時点では心理実験の要求に耐えうる精度は期待できないと考えられる。

まとめと今後の展望

本研究では、CRTに対して確立された標準的な2段階の色較正手法をLCDやDLPに適用した場合、どの程度の誤差が生じるのかを検証した。その結果、LCDやDLPの中には従来の較正手法では十分な精度が得られないものが存在することが定量的に示された。この場合でも我々が提案した区分線形的手法を応用した色較正手続きを適用することで、良好な色較正が可能であることを実証した。ここで提案した自動色較正手法は、現段階では求める色への収束を保証するようなアルゴリズムではなく、改善が望まれるが、汎用性を備えた十分に実用的なものであると考えている。また、我々が開発したソフトウェアMcalibratorは、この区分線形的な色較正手法を実装し、測光装置や呈示装置およびソフトに依存しない汎用性を有し、すべての操作をGUIで制御できる。以上の機能は実験者の色較正にかかわる負担を大幅に軽減するものであると思われる。

備 考

Mcalibratorと市販あるいはフリーの刺激呈示ソフトウェアとの相性について

以下、本研究で開発したMcalibratorと他のソフトウェアとの相性について簡単に記述する。視覚の心理実験でよく用いられる刺激呈示装置VSG2/5(Cambridge Research Systems)とDLPプロジェクタの環境で色較正を行ったところ、VSGの提供するガンマ補正とMcalibratorの組み合わせで十分な精度で必要な色を呈示することが可能であった。Mcalibrator自体は標準でMATLABの描画機能を用いて色表示を行うが、描画をVSGに切り替える機能も有している。Psychtoolbox(Brainard, 1997)に関する(Windows版のみ検証)、自動的な色較正は可能であるが、検証はまだ不十分である。また、本システムはGUIで構築されているため、Psychtoolboxのプログラムの一部として組み込むことは現時点ではできない。汎用グラフィックスライブラリOpenGLあるいはOpenGL上位互換のVTK(Kitware, Inc.)を用いて作成した刺激をDLPプロジェクタで呈示した場合にも、本ソフトウェアは有効に機能した。

Mcalibratorの配布について

配布方法は確定しておりません。ご興味をお持ちになられた方は、筆者まで直接ご連絡ください。

謝 辞

本研究は、文部科学省 21 世紀 COE プログラム (京都大学, D-2), 総務省重点研究プロジェクト (J-2), 文部科学省科学研究補助金 (課題番号 15330155), 日本学術振興会 (17・02088) の援助を受けた。本研究に関して的確かつ有益な多くのアドバイスをくださった査読者の方, 編集委員の方に感謝いたします。

引用文献

- Brainard, D. H., Pelli, D. G., & Robson, T. 2001 Display Characterization. *Encyclopedia of Imaging Science and Technology*, In Wiley. Pp. 172-188.
- Brainard, D. H. 1997 The Psychophysics Toolbox. *Spatial Vision*, **10**, 433-436.
- Berns, R. S. 1996 Methods for Characterizing CRT Displays. *Displays*, **16**, 173-182.
- Day, E. A. 2002 Colorimetric Characterization of a Computer Controlled [SGI] CRT Display, A Joint Research Program of The National Gallery of Art (Washington), The Museum of Modern Art (New York), and Rochester Institute of Technology, Technical Report.
- Finlayson, G. D. & Drew, M. S. 1997 Constrained least-squares regression in color spaces. *Journal of Electronic Imaging*, **6**(4), 484-493.
- Fairchild, M. D. & Wyble, D. R. 1998 Colorimetric Characterization of the Apple Studio Display (Flat Panel LCD), Munsell Color Science Laboratory Technical Report.
- 前田青広・福永雅喜・中越明日香・山本洋紀・松野響・田中忠蔵・恵飛須俊彦・梅田雅宏・江島義道 2003 メタコントラスト事態におけるヒト視覚野の活動—fMRI 研究—. 電子情報通信学会技術研究報告, MBE2003-05, 35-40.
- 山城博幸・前田青広・高田まり・山本洋紀・江島義道 2005 等輝度色刺激を用いた視覚マスキング効果の解析. 電子情報通信学会技術研究報告, HIP2005-014, 7-12.
- Ikeda, H. & Kato, N. 2000 Multimendia systems and equipment—Colour measurement and management—Part 4: Equipment using liquid crystal display panels, IEC 61966-4 Ed.1
- Pelli, D. G. 1997 The VideoToolbox software for visual psychophysics: Transforming numbers into movies. *Spatial Vision*, **10**, 437-442.
- 田村信彦・津村徳道・三宅洋一 1997 チャン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. 映像情報メディア学会誌, **51**(10) 1-5
- Borse, G. J. 1997 Numerical Method with MATLAB, International Thomson Publishing Inc., 白田昭司ら訳 1998 MATLAB 数値解析, オーム社.
—2004. 10. 27 受稿, 2005. 12. 29 受理—