

色彩・視覚実験のための画像表示機器のキャリブレーション

須長 正治

九州大学 大学院芸術工学研究院
〒815-8540 福岡県福岡市南区塩原 4-9-1

1. はじめに

1980年代、コンピュータの技術発展によって、CRTディスプレイ(CRT)が刺激提示装置として使用されるようになり、さらに、その後のグラフィックシステムの技術開発によって、かなり複雑な刺激の提示も可能になった。そして、グラフィックシステムが成熟した現在では、画像表示機器の目まぐるしい転換期にある。具体的には、CRTディスプレイの生産がほぼ終了し、液晶ディスプレイ(LCD)、プラズマディスプレイ(PDP)、有機ELディスプレイ(OLED)、DLPプロジェクタ(DLP)などに移行し、表示方式も多様になっている。そこで、本報では、画像表示機器を視覚実験に用いるための考慮すべき特性のうち、主に色特性について述べる。

2. 画像表示機器を視覚実験に用いるために

画像表示機器を視覚実験に用いるためには、キャリブレーションが必要になる。キャリブレーションというのは、被験者に提示したい刺激の物理特性、または心理物理特性を確実に提示できるようにすることである。

3原色の画像機器に表示される刺激は h, v, R, G, B, t の5つの自由度を持つと見做すことができる。 h, v は画面での画素の水平、垂直位置、 R, G, B は原色のレベル値、 t はフレームである。視覚刺激として、これらを考えると、 h, v は網膜位置、 R, G, B は輝度と色度、すなわち三刺激

値、 t は時間に相当する。画素の空間位置から網膜位置への変換とフレームから時間への変換は容易に行うことができるが、 R, G, B から三刺激値への変換は、その都度の三刺激値の測定またはキャリブレーションなしには変換することができない。また、この変換は、画面位置などにも依存することもある。この変換は、各画像表示機器での R, G, B のガンマ特性(レベルに対する輝度)とRGB色度から、以下の式(1)によって算出することができる。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_r}{y_r} & \frac{x_g}{y_g} & \frac{x_b}{y_b} \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{1-x_r-y_r}{y_r} & \frac{1-x_g-y_g}{y_g} & \frac{1-x_b-y_b}{y_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_r \\ Y_g \\ Y_b \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、右辺の $(x_r, y_r), (x_g, y_g), (x_b, y_b)$ は、RGB原色のCIE xy 色度、 Y_r, Y_g, Y_b はRGB原色のガンマ特性から得られる輝度であり、これらから、左辺の提示される色の三刺激値 XYZ が算出される。ただし、この式(1)が成立するためには、以下のふたつのことが必要となる。ひとつめは、RGB原色の色度 $(x_r, y_r), (x_g, y_g), (x_b, y_b)$ がRGBレベルにわたって、安定していること、ふたつめは、RGB原色が独立であり、RGB輝度における加法性が成り立つことである。さらに、この式を求める際に、 $(R, G, B) = (0, 0, 0)$ のときの輝度、すなわち黒の輝度がほ

ぼ暗黒であり、無視できる輝度であることを確認しておく必要がある。もし、無視でない輝度の場合は、黒のときの三刺激値をそれ以外のときの三刺激値から引き、その結果を用いて、式(1)の (x_r, y_r) , (x_g, y_g) , (x_b, y_b) を求める。そして、式(1)により算出された三刺激値 XYZ に黒の三刺激値を足したものが提示されている色の三刺激値となる。逆に、画面上に提示したい三刺激値から RGB レベルを求めるには、逆の過程を行えばよい。つまり、式(1)は

$$\begin{bmatrix} Y_r \\ Y_g \\ Y_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_r}{y_r} & \frac{x_g}{y_g} & \frac{x_b}{y_b} \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{1-x_r-y_r}{y_r} & \frac{1-x_g-y_g}{y_g} & \frac{1-x_b-y_b}{y_b} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

となり、この式から RGB 原色の輝度 Y_r, Y_g, Y_b を算出し、さらに、ガンマ特性を用いて、RGB レベルを求める。このような計算によって、RGB レベルから実際に提示されている色刺激の三刺激値を、そして、画像表示機器に提示したい三刺激値から、提示すべき RGB レベルを算出することができる。

次の3節では、式(1)が成り立つために必要な条件である RGB 原色の色度の安定性と輝度の加法性について、OLED (SONY PVM-2541), CRT (Mitsubishi RDF-193H), LCD (Eizo ColorEdgeCG241W) の特性を比較検討したので、その結果について述べる。さらに、4節では RGB 原色の色度および分光分布について述べる。

3. 実験装置として画像表示機器に必要な特性

3.1 原色色度の安定性

分光放射輝度計 (Konica Minolta CS2000) を用いて、暗室内にて OLED, CRT, LCD のガンマ

特性の測定を行った。画面中央に 150×150 ピクセル (もしくは、 200×200 ピクセル) で色刺激を提示し、その領域を測定した。OLED, CRT および LCD での黒のときの輝度は、それぞれ、 1.5×10^{-5} , 1.4×10^{-3} , 0.133 cd/m^2 であった。LCD では、各レベルの三刺激値より黒の三刺激値を差し引き、RGB 原色の色度を算出した。OLED および CRT では、黒の三刺激値がかなり小さかったため、それらを無視し、RGB 原色の色度を算出した。図1に RGB レベルが 50 以上のときの RGB 色度を示す。図中の矢印は RGB レベルの増加方向を示している。図1からわかるように、OLED の赤原色、CRT の赤原色、青原色は色度が安定しており、それ以外では系統的な色度の移行が観察された。OLED では、緑原色の x 座標および青原色の y 座標が 0.003 の幅で移行し、CRT では、緑原色の x が 0.005 の幅で移行していた。LCD では、原色の移行がこれらの中では最も大きく、特に、緑原色の x 座標が 0.007、青原色の y 座標が 0.008 と大きかった。CIE1931 xy 色度図にて MacAdam の楕円の大きさが緑領域では大きく、青領域で最も小さくなること考慮すると、緑原色や赤原色の色度の移行よりも青原色の移行の方が実験結果に及ぼす影響が大きくなる可能性があると言えるだろう。この点からいうと、CRT の青原色色度の安定性は実験装置に適した特性である。

3.2 原色輝度の加法性

式(1)が成立するための条件の二番目は、RGB 原色の三刺激値の加法性である。これは、RGB 原色の各ガンマ特性を足したものが、RGB を同時に発光させたときに測定した無彩色(W)のガンマ特性と一致するかを調べればよい。ガンマ特性は、三刺激値に対して得られるが、ここでは、 Y 、すなわち輝度の加法性を取り上げ、検討していく。

図2に RGB レベルが 50 以上のときの RGB の輝度の和と W の輝度の比を示す。縦軸の 1.0 は RGB の輝度の和と W の輝度が一致し、完全な加法性が成り立つことを示す。図2から OLED, CRT, LCD とも RGB レベルにわたって、

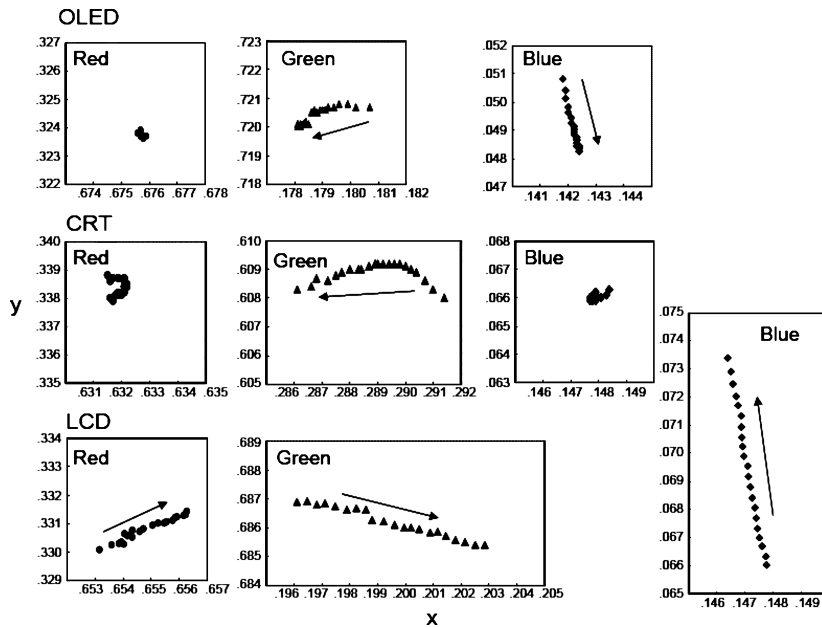


図1 原色色度の安定性.

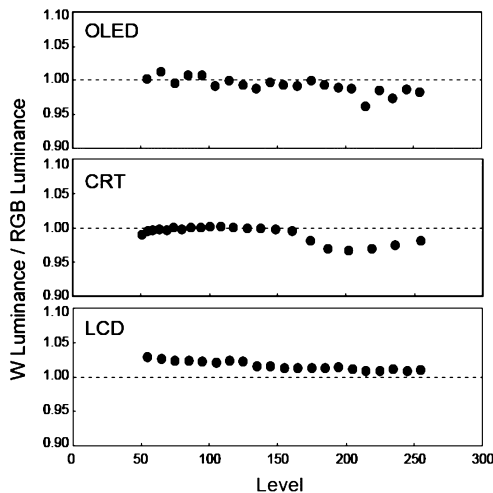


図2 原色輝度の加天性.

加天性は完全には成り立たないものの、その誤差は $\pm 3\%$ 以内に収まっている。これまでの経験から、この程度の誤差は、これまでキャリブレーションを行ってきた画像表示機器と同等程度あるいはそれ以下の誤差である。ただし、LCDに関しては、すべてのRGBレベルにわたって、Wの輝度がRGBの輝度の和を上回る結果であったため、実際に提示される色刺激は、常

に、計算値よりも高くなる可能性があることに注意しなければならない。

以上をまとめると、今回測定した3機種の画像表示機器はほぼ原色輝度の加天性は成立したが、OLED, CRT, LCDの順番で原色色度の安定性が低くなっていった。これらの原色色度の移行および $\pm 3\%$ の加天性の誤差が、実験結果にどの程度影響するかは、詳細な解析が必要であり、さらに、これらの誤差が無視できるものであるかどうかは、実験目的にも依存するため、その判断は実験者に任せたいと思う。

4. 原色の色度および分光分布

測定した OLED, CRT, LCD の RGB 原色を CIE1931 xy 色度図にて図3に示す。OLEDの色域が最も広い。特に、緑領域の色域が広がっている。この色域拡大より、これまで以上の高い色コントラストの刺激提示が可能となり、色彩実験にとっては、この色域拡大は利点である。

図4にRGBレベルがそれぞれ255のときの OLED, CRT, LCD の分光分布を示す。図4から、CRTおよびLCDの赤原色の分光分布は狭帯域であるが、OLEDの赤原色は他の原色と同程度

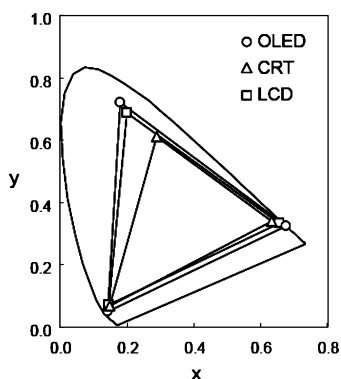


図3 原色の色度座標.

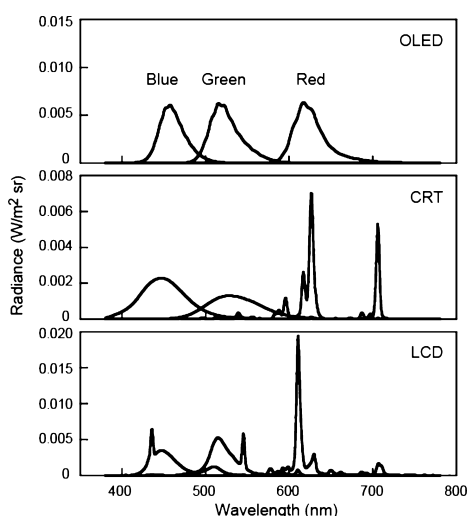


図4 原色の分光放射輝度分布.

の半値幅をもつ広帯域であった。原色が狭帯域から広帯域になることによって、等色関数の個人差に起因すると考えられる色の見えの個人差が小さくなるということが報告されている¹⁾。このことから、赤領域の色に関しては、OLEDでは、CRTやLCDよりも、色の見えにおける個人差が小さくなると推測できる。よって、RGBのすべての原色が広帯域であるOLEDは、高次色メカニズムの個人差に焦点をあてた研究などに適した実験装置であると言えるかもしれない。

5. おわりに

OLED, CRT, LCDの3種類の画像表示機器を視覚実験装置の観点から、特性を比較検討して

きた。ここでは、これらの画像表示装置をおののについて、簡単にまとめる。

最新の画像表示機器であるOLEDは、原色色度が安定しており、原色輝度の加法性もよい。さらに、色域も最も広い。これらの特性は、視覚実験用の刺激提示装置として好ましい特性である。しかしながら、本報では述べていないが、測定した機種(SONY PVM-2541)については、扱いにくい特性を持っている。それは、画面の面積の約40%以上を占める刺激を提示すると、輝度がおおよそ140 cd/m²で制限され、それ以上の輝度を提示することができなくなる。これは、この機種あるいはメーカー特有の特性であると思われるが、他の機種を測定していないため、はっきりしたことはわからない。さらに、HDMI入力しかないため、RGB 8bitsのデジタル入力に限定されてしまう。また、OLEDでは焼き付きが起りやすいとの注意書きがあり、長時間の使用には向いていないかもしれない。

CRTは、色彩・視覚実験装置として、80年代から最もよく使用されているが、個人的な経験として、RGB原色輝度の加法性などに、機種依存や個体差があり、さらに、解像度やフレームレイトによって加法性の特性が大きく変化するなど扱いにくい側面もあった。

LCDは、現在、もっとも流通している画像表示機器である。個人的に、これまで色彩実験装置としてLCDを用いたことはないが、図1に示されているように、緑原色と青原色の色度の変化が大きいため、一度、その影響を検討してみる必要があるだろう。

ここで述べた特性のほかにも、時間特性や画面の均一性など検討すべき特性はほかにもある。特に、LCDの時間特性に関しては、注意を払わなければならない。

キャリブレーションの測定結果の具体的な使用方法などに関しては、いくつか論文^{2,3)}があるので、そちらを参照していただきたい。また、画像表示機器の特定の機種に関する特性を報告した論文⁴⁾もいくつかある。そのような報告から、実験に使用する画像表示機器を選定するの

もひとつの方法であろう。

謝辞 OLED のキャリブレーションデータを提供していただいた九州大学大学院芸術工学府博士後期課程小川将樹氏，および OLED を貸与していただいた九州大学大学院芸術工学研究院伊藤裕之先生に感謝申し上げます。

文 献

- 1) R. Ramanath: Minimizing observer metamerism in display systems. *Color Research and Application*, **34**, 391–398, 2009.
- 2) W. B. Cowan: An inexpensive scheme for calibration of a colour monitor in terms of CIE standard coordinates. *Computer Graphics*, **17**, 315–321, 1983.
- 3) 須長正治：モニタを用いた色彩実験. 日本色彩学会誌, **33**, 328–335, 2009.
- 4) P. Wang and D. Nikolić: An LCD monitor with sufficiently precise timing for research in vision. *Frontiers in Human Neuroscience*, **5**, 85, 2011.