電子ディスプレイにおける色むら感覚強度の学習

正員 浅野 敏郎 (広島工業大学)

正員 石丸 伊知郎 (香川大学)

Learning of color uniformity grade on electronic displays

Toshio Asano, Member (Hiroshima Institute of Technology)

Ichirou Ishimaru, Member (Kagawa University)

This paper presents a method for classifying the color uniformity on electronic displays. The radial basis function (RBF) network is used to evaluate the color uniformity. The 960 color uniformity defect samples generated by a computer were displayed on a color monitor. Each sample was evaluated into six grades by an inspection expert. Seven image quality parameters, which were calculated by the shape data of the defects, were used as the input parameters of the networks. They are luminance, saturation, hue, edge strength and so on. The grades by an inspection expert are used as the teacher data of the neural networks. The RBF network learns the relation between input parameters and the grades as the weight values of the network. The estimation ability of the grades was tested using new sample data. As the result, the success rate of the evaluation by RBF network was 95.4%, and this was 22% superior to that of the three layered neural networks which we used in the previous work.

キーワード: 色むら、画質、ディスプレイ、ニューラルネット、RBF

Key words: color uniformity, image quality, display, neural networks, RBF

1. はじめに

生産現場の最終工程では、人間の感覚をセンサーとした官能検査が行われている^{(1)~(3)}。このなかでも、電子ディスプレイは画質が最重要の製品性能になるため、熟練検査員による目視官能検査がおこなわれているが、その安定性や個人差についてはいつも問題となっており、定量評価技術の開発が望まれている⁽⁴⁾。

現在の電子ディスプレイとしては、カラーCRTと液晶を用いたものがほとんどであるが、どの原理のディスプレイをとっても画面には色むらがあり、特に、高精細大画面になるほど、色むらの少ないディスプレイを製造することは難しい。この色むらは、色、形、場所などが、ディス

プレイ1台ごとに異なるため、定量的な検査規格を定めることが難しく、熟練検査員が感覚的な強度として色むらグレードを総合評価し、製品の信頼性を確保している。

図1に本研究が目的とする、色むら自動検査装置の構成を示す。電子ディスプレイに白色画面を映出し、カラーTVカメラで画面を撮像する。撮像した画像から色むら部を抽出し、色むらグレードを決定するのに必要な画質パラメータを計算する。これを、あらかじめ色むらグレードとの関係を学習させたRBF(ラディアル基底関数)ネットワークに入力し、色むらグレードを求める。求めた色むらグレードから、製品の良/不良を決定する。本論文は、上記構想のなかで最も困難だと考えられる画質パラメータから色むらグレードを算出する部分に関するものである。

図1 色むら自動検査装置の構成

Fig.1 The automatic color uniformity inspection system.

色は、色相、彩度、輝度の 3 属性で表現することができる。色相は色み（赤、青、黄など）であり、彩度は色の鮮やかさを、輝度は明るさを表す。色相と彩度を合わせて色度と呼ぶ。基準となる色に対する色度の差と輝度の差から色差が計算され、本論文では、基準となる色は白である。

一般に色むらと呼ばれているものは、色度に起因する色度むらと、輝度に起因する輝度むらとに分けることができる。これまでに、ディスプレイの色度むらや輝度むらを定量評価しようという試みや^{(5)~(9)}、色彩感覚特性の研究⁽¹⁰⁾が行われている。色度むらは、色差で、輝度むらは、エッジ強度で知覚されるという報告は注目に値する⁽¹¹⁾。しかしながら、実際の色むらは、色度むらと輝度むらの混合であり、特に、総合的な判定をどのように行えばよいかは、不明である。

色むらの色度と輝度とを総合して評価する方法としては、著者らの行った階層型ニューラルネットを使う方法や、重回帰分析手法を用いる研究報告がある⁽¹²⁾。しかし、どちらの方法も入力パラメータに色相を加えると、目視評価との一致率が極端に低下し、実用的には色相毎にニューラルネットを構成せざるを得なかった。

本論文では、色相毎にニューラルネットを構成することなく、色相を含めて人間の色むらに対する感性をラディアル基底関数 (RBF) ネットの重み係数として学習させる方法を提案する。多様な色むらを学習させる必要があるため、楕円を基準とした色むらをコンピュータ上で生成し、TV モニタに表示して目視評価を行う。色むら生成データからネットワークの入力パラメータを計算し、目視評価値を教師信号とする。最後に RBF で色むら学習実験結果が階層形ニューラルネットより大幅に優れていることを示す⁽¹³⁾。

2. 色むらの生成と目視評価

〈2・1〉 色むらパターンの発生 色むらとそれを見たときの感覚強度との関連を検討するためには、多くのサンプルが必要であるが、本物の不良品を各種集めることには、限界がある。パソコンと画像ボードを用いて、TV モニタ上に各種の色むらが発生させた。TV モニタを用いたのは、パソコンモニタは、高精細 CRT を使っているため、それ自体に色むらがあり、TV 用 CRT は、解像度が低いため色むらも少ないためである。

色むらの形状は不定形であるが、本論文では楕円を基本形状とした。楕円であれば、画面コーナで扇形に発生する色むらも楕円の中心位置を画面コーナに設定することで作成することができる。細長くすることにより、すじ状の色むらも表現できる。また、複数の楕円を組み合わせることにより、必要であれば複雑な形状も作成できる。さらに、楕円を 2 重にして内円と外円にし、それぞれの形状を独立に指定することにより、エッジが目立つ色むらも緩やかに変化する色むらも自由に作成することができる。

色むら生成パラメータを以下に示す。

- 1) 色むらの形状（外側楕円の長軸・短軸長、内側楕円の長軸・短軸長）
- 2) 色むらの位置 (X, Y)
- 3) 内側楕円の色と背景色との差 (ΔR , ΔG , ΔB)
- 4) 背景色 (R, G, B 各 256 階調)
- 5) 回転角度 (ϕ)

図2 色むらの形状パラメータ

Fig.2 Shape parameters of a color uniformity defect.

表示される色むらは、図 2 のように二重の楕円で構成されている。内側楕円の内部の色は一律に $R + \Delta R$, $G + \Delta G$, $B + \Delta B$ であり、外側楕円と内側楕円の間は、背景色 (R, G, B) から内側楕円内部の色まで、一定の傾きで変化している。楕円の回転角度 ϕ は、長軸と水平軸とのなす角度である。最大 7 個まで、同時に表示できるようにソフトを作ったが、今回は、1 画面に 1 個の色むらで実験した。

〈2・2〉 色むらの目視評価 色むらの感覚強度 (グレード) は、0~5 の 6 段階とし、それぞれのグレードの定義は、表 1 の通りとした。色むらサンプルは、480 種もしくは 960 種の多数あるので、評価を安定させるため、同種の TV モニタを 2 台並べ、片一方には、標準刺激として、グレード 3 の赤色円形の色むらを表示し、判定に迷ったときは、この標準刺激を参照してグレード付けを行った。

被験者は、1 人であり、どのパターンもランダムに 3 回提示し、3 回の中央値を目視評価値とした。無彩色 (輝度むら) と 6 色 (R, G, B, シアン、黄、マゼンタ) のむらが、それぞれほぼ同数あるが、途中の色相も存在する。表示位置とむらの回転角度は今回は一定とした。960 種のとき、目視評価値のばらつきは、3 回とも同じであったサンプル数と、

1 グレード異なるサンプル数が、ほぼ同数であり、目視評価値の標準偏差（6）は、±0.45 グレードであった。

表1 色むらグレードの定義
Table1 1. Definition of color uniformity grades

グレード	説明	データ数
0	見えない	137
1	かろうじて見える	184
2	見えるが気にならない	185
3	気になるが邪魔にならない。	137
4	邪魔になる	203
5	非常に邪魔になる	114
計		960

3. ネットワークの構成

＜3・1＞ 入力パラメータの検討 ネットワークへ入力するパラメータとしては、大きく分けて、2 種類考えられる。一つめは、色むら生成のときに用いた形状パラメータを用いることである。第 2 は、形状パラメータから計算される彩度やエッジの強さなどの画質パラメータを用いることである。ここでは、色むらを自動抽出するときのことを考え、かつ目視評価値との関連がわかりやすい 7 個の画質パラメータを用いることにした。

- 1) 輝度 $\Delta Y = 0.3 \Delta R + 0.6 \Delta G + 0.1 \Delta B$
- 2) 彩度 $S = ((\Delta R - \Delta Y)^2 + (\Delta B - \Delta Y)^2)^{1/2}$
- 3) 色相 $\theta = \tan^{-1}(\Delta R - \Delta Y) / (\Delta B - \Delta Y)$

ここで、彩度、色相は、x 軸に $\Delta B - \Delta Y$ 、y 軸に $\Delta R - \Delta Y$ をとった平面上のベクトルの動径および偏角に相当する。しかしながら、色相は、このままでは、0~360 度までの角度であり、0 度と 360 度は、同じ色相なのに数字が異なってしまう。また、無彩色に対応する色相角がない。これらのことから、色相は、表 2 のようにクラス分けをして、クラス番号を入力パラメータとした。

表 2 色相のクラス分け
Table 2. Hue classification.

クラス	色相名	角度 (θ)
0	無彩色	—
1	マゼンタ	20~80
2	赤	80~145
3	黄	145~200
4	緑	200~260
5	シアン	260~325
6	青	325~20

- 4) 色エッジ S_edge
 $= \max\{ |S / \text{長軸差}|, |S / \text{短軸差}| \}$

ここで、長軸差は、外側楕円の長軸と内側楕円の長軸との差であり、短軸差は、外側楕円の短軸と内側楕円の短軸との差である。

- 5) 輝度エッジ Y_edge
 $= \max\{ |\Delta Y / \text{長軸差}|, |\Delta Y / \text{短軸差}| \}$

- 6) 面積 $A = ((\text{外側楕円の長軸} + \text{内側楕円の長軸}) / 2) \cdot ((\text{外側楕円の短軸} + \text{内側楕円の短軸}) / 2)$
- 7) 細長さ $T = (\text{外側楕円の長軸} + \text{内側楕円の長軸}) / (\text{外側楕円の短軸} + \text{内側楕円の短軸})$
色エッジ、輝度エッジは、色むらの輪郭部分の彩度、および輝度の変化割合を示している。

＜3・2＞ RBF ネットワーク RBF (Radial Basis Function) ネットワークは、非線形関数を円形の等高線をもつ基底関数で展開する方法であり、関数近似やパターン識別に利用できる。中間層数が M のときの構成を図 3 に示す。3 層ニューラルネットとよく似た構成であるが、入力と中間層の間の重みがなく、中間層の出力関数がガウス関数であり、出力層の出力関数が線形和となっている。図 3 において x は入力ベクトルであり、各中間層ユニットでは、あらかじめ定義されている $c_i (i=1, \dots, M)$ との差を求め、ノルム $\|x - c_i\|$ を計算する。各ユニットは $\|x - c_i\|$ を引数とする単調減少関数 $\phi(\|x - c_i\|)$ の値を出力し、それに重み a_i をかけたものを加えあわせて、ネットワークの出力 $y(x)$ とする。

$$y(x) = \sum_{i=1}^M a_i \cdot \phi(\|x - c_i\|) \dots\dots\dots (1)$$

単調減少関数はガウス関数を用いた。

$$\phi(r) = \exp(-r^2 / \sigma^2) \dots\dots\dots (2)$$

r はノルム、 σ は標準偏差である。

上記モデルに基づき、下記評価関数を減少させる方向にパラメータ a_i, c_i, σ_i を修正することにより、学習を行う。評価関数は、

$$E(k) = \frac{1}{2} (y(k) - \hat{y}(k))^2 \dots\dots\dots (3)$$

RBF モデルは、

$$\phi_i = \exp\left\{-\frac{\|x(k) - c_i\|}{\sigma_i^2}\right\} \dots\dots\dots (4)$$

モデル出力は、

$$\hat{y}(k) = \sum_{i=1}^M a_i \phi_i(k) \dots\dots\dots (5)$$

となる。 $y(k)$ は目視評価値である。
学習は、2 乗誤差の勾配に基づく下記の式により行うものとする。 $\lambda_a, \lambda_c, \lambda_\sigma$ は、収束の状況を決定する比例係数である。

$$a_i(k+1) = a_i(k) - \lambda_a \frac{\partial E(k)}{\partial a_i} \dots\dots\dots (6)$$

$$c_i(k+1) = c_i(k) - \lambda_c \frac{\partial E(k)}{\partial c_i} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\sigma_i(k+1) = \sigma_i(k) - \lambda_\sigma \frac{\partial E(k)}{\partial \sigma_i} \quad \dots\dots\dots (8)$$

図3 RBFネットワーク
Fig.3 RBF network.

4. 評価実験

<4・1> 実験方法 図4に本論文における実験方法を説明する。960個の色むらデータを、画像出力装置を用いた色むら発生装置で、色むら提示用モニタに表示する。観測者は、モニタに生成される色むらをみて、表1の基準に従い目視色むらグレード（0～5）を付与する。色むら生成データは、RBFネットワークにも入力し、学習時には目視グレードが教師信号となってネットワークの重みを計算する。テスト時には、テスト用色むら生成データを入力し、学習時の重みを用いてグレード値を計算する。これを目視グレードと比較して、ネットワークの性能を評価する。

<4・2> RBFネットワーク実験

(1) 学習手順

1) 入力データの正規化

対数処理を用いて、最大値 x_{max} 、最小値 x_{min} のデータ x を、0～1に正規化する。

$$x' = \frac{\log(x - x_{min})}{\log(x_{max} - x_{min})}$$

図4. 実験方法
Fig.4 Experiment system.

- 2) 入力データのポテンシャルを計算し、ポテンシャルの高いものからデータを順次選択する（チュウの方法⁽¹⁴⁾）。
- 3) 選ばれた入力データを初期値として、K-平均法により、クラスタの中心 c_i を求める。
- 4) c_i の最近傍のクラスタ中心 c_j を探索し、2個のクラスタ間のノルムを標準偏差 σ_i の初期値とする。 i はユニット番号である。

$$\sigma_i = \|c_i - c_j\|$$

- 5) a_i, c_i, σ_i の学習を行う。まず学習に最も効果のある a_i を学習させる。次に c_i, σ_i を学習させる。

中間層ユニット数 M が 10、20、100、200、300 の場合について実験した。誤差関数の和を図5に示す。中間層の数は、多いほど誤差が少なくなるが、200以上ではほとんど変わらないので、200とした。 a_i の比例係数については、0.09が最適であった。

図5. RBFネットワークでの中間層数の検討
Fig.5 Discussion of unit number of the RBF hidden layer.

(2) テスト結果

目視評価を行った色むらデータ 960 個のうち、620 個を学習データとして使用し、340 個をテストデータとした。 a_i の学習回数は、1,000,000 回、 ci, σ_i の学習回数はそれぞれ 30 回である。学習に要する時間は、1 時間程度であった。

図 6 に目視評価値別の R B F ネットワークの出力を示す。一致率 (± 1 グレードまで許す) は 95.6% (完全一致率は 59.4%)、となり、大変良い結果となった。内訳を見ると、グレード 0 は 88%、グレード 1 は 98%、グレード 2 は 97%、グレード 3 は 98%、グレード 4 は 99%、グレード 5 は 95% である。階層形ニューラルネットでは、色相別にしないときは、74% の一致率だったので、22% もの大幅な向上となった。色相別に階層形ニューラルネットを構成しても 85% 程度だったので、やはり大幅な性能向上である⁽¹²⁾。このことは、色相データのような強い非線形データを含むとき、RBF ネットは、上手に近似してくれると考えられる。グレード 0 と 5 で一致率が若干低いのは、0 や 5 では、極端なむらデータが入っており、クラスの幅が広いためであると考えている。

目視評価の再現性は、 $\pm 2\sigma$ (95.4%) が 0.9 グレードなので、 ± 1 グレードまで許したときの一致率 95.6% は、ほぼ、人間と同程度のばらつきということになる。

5. むすび

電子ディスプレイの色むらの感覚的強度を、R B F (ラディアル基底関数) ネットを利用して学習させる方法を提案し、実験検討を行った。ネットワークへの入力パラメータは、色むらの形状パラメータから計算される輝度、彩度、エッジ強度など 7 種の色むら画質パラメータとした。階層

型ニューラルネットでは、色相別にネットワークを分けないときは、一致率 (± 1 グレード以内) 74% だったのに、R B F ネットワークでは、色相別に分けることなしで、一致率 95.4% が得られ、大幅な性能向上が図れた。この一致率は、目視評価自体のばらつきと同程度であり、色むら評価における R B F ネットワークの有効性が確認できた。

今後の課題は、画面に複数の色むらがある場合への拡張と、図 1 に示す自動検査装置の構想において、カメラで撮像した画像から色むら部を抽出し、RBF ネットワークに入力する画質パラメータを自動算出することである。

最後に、本研究のご指導を頂いた大阪市立大学志水英二教授、ならびに研究推進の便宜を図って頂いた (株) 日立製作所ディスプレイグループ吉田弘之氏、谷口正夫氏に感謝致します。

(平成 12 年 11 月 28 日受付、平成 13 年 3 月 26 日再受付)

文 献

- (1) 谷内田正彦ほか：「10 年間の発展とこれからの課題」、映像情報インダストリアル、Vol.31, No.3, pp.18-51 (1999)
- (2) Toshio Asano: 「Progress on 'Kansei' measurement technology and its application to visual inspection」Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol.32, No.2, pp.85-89 (1998)
- (3) 馬淵健宏、相原恒博：「フラクタル次元を用いたシームパッカリングの自動評価」、電気学会論文誌、Vol.119-C, No.4, pp.523-528 (1999)
- (4) 浅野敏郎：「画質官能検査の自動化技術」、ファクトリーオートメーション、Vol.12, No.11 pp.30-34 (1994)
- (5) 浅野敏郎、望月淳、川目啓介、福原信雄：「カラー CRT ディスプレイの白色均一性定量評価」、電子情報通信学会論文誌 D

図 6. RBF ネットワークのテスト結果

Fig.6 Results of the RBF network for color uniformity evaluation.

II、Vol.J73-DII, No.6, pp.830-839 (1990)

- (6) 浅野敏郎、吉田敦志、望月淳：「液晶ディスプレイの中間調画質評価」、電子情報通信学会 情報・システムソサイエティ大会、p.242 (1996)
- (7) 糊澤信、鈴木俊彦、下蘭裕明：「液晶表示素子の表示むら評価技術の開発」、精密工学会誌、Vol.66, No.1, pp.152-156 (2000)
- (8) 斎藤文彦：「多重解像度画像を用いた液晶ディスプレイ輝度むら欠陥検出」、精密工学会誌、Vol.63, No.5, pp.647-651 (1997)
- (9) 斎藤文彦：「群化要因に基づくGAによるLCD輝度むら境界線検出」、電気学会論文誌、Vol.119-E, No.2, pp.308-312 (1999)
- (10) 秦清治、宮下義弘、花房秀行：「色彩感覚特性の外観検査への取り込み」、第8回外観検査の自動化ワークショップ、pp.12-17 (1996)
- (11) 奥田泰生、貴志宗紀、安富文夫、松浦英文、人見正明、大隅正人：「色むら定量化のための色彩感覚特性評価」、第3回画像センシングシンポジウム講演論文集、pp.85-88 (1997)
- (12) Mauridhi Hery Purnomo, Toshio Asano, Eiji Shimizu：「Identification of color uniformity defect on the electronic displays by learning the human perception records」, T.IEE Japan, Vol.118-C, No.7/8, pp.1164-1169 (1998)
- (13) 浅野敏郎：「電子ディスプレイの感覚的検査技術」平成12年電気学会電子・情報・システム部門大会、pp.125-126 (2000)
- (14) 阿部重夫：ニューラルネットワークとファジィシステム、近代科学社、pp.154-156 (1995)

浅野 敏郎

(正員) 1974年大阪市立大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年(株)日立製作所入社。同社生産技術研究所において、工業用画像認識、ディスプレイ画質の自動評価、知識情報処理の研究に従事。2000年より広島工業大学工学部教授。画像応用技術の研究に従事。工学博士。電子情報通信学会、精密工学会などの会員。

石丸 伊知郎

(正員) 1987年大阪大学産業機械工学科卒業。同年(株)日立製作所入社。同社生産技術研究所において、熟練官能作業の自動化装置の研究開発に従事。2000年より香川大学工学部助手。2001年同助教授。光熱変換分光法など、レーザを用いた精密計測技術の研究に従事。博士(工学)。精密工学会、日本ファジィ学会、IEEE会員。