周波数解析によるディスプレイ画質むら検査*

石黒和之** 浅野敏郎*** 近藤孝洋† 劉 偉†

Inspection of Mura Image Quality by Using Frequency Analysis for Electronic Displays

Kazuyuki ISHIGURO, Toshio ASANO, Takahiro KONDOH and Wei LIU

A novel image quality inspection method that detects low contrast “mura” (non-uniform regions) has been developed by analyzing the Fourier spectrum of the images. The inspection images are transformed to Fourier frequency space, and the power spectrum is filtered using CSF(Contrast Sensitivity Function) to obtain the human eye sensitivity. The radial frequency and angular frequency histograms of the power spectrum are used to detect the image defects. A “mura” model experiments were executed to verify the novel method, and the experiments using 62 real samples showed good detection ability for the “mura” defect samples.

Key words : image quality, mura, CSF, Fourier spectrum, display

1. 結 言

電子ディスプレイの利用が拡大している。CRT 中心の時代から液晶などの平面形が主流になってから、今までの適用範囲を超えて、最近では車のフロントパネルにも使用されるようになった。また、曲面の有機 EL ディスプレイの開発も盛んで、今後さらなる広い分野への適用が期待されている。

現在の表示方式は液晶が主流であり、大型テレビ用からスマートホン用まで、高精細・大画面の各種ディスプレイがある。これらディスプレイパネルの生産において、点欠陥のように検出・評価の容易な欠陥においては自動検査が行われているが、「むら」欠陥においては人間の評価と一致する評価方法の開発が難しく、現在でも目視検査で行われている。

自動画質検査の必要性がクローズアップされたのは、1980年代にパソコンの端末表示装置として高精細の CRT が大量に使用されるようになってからである。高精細 CRT はドットピッチが小さいため、偏向ヨークとの組付調整が難しく、色むらの発生が大きかった。これに対し、色相・彩度、色むら面積、エッジ強度からなる評価方法が提案された¹⁾。さらに、液晶ディスプレイは CRT には少なかった輝度むらが多く、輝度むらの感性的評価が輝度の傾斜値と相間が高いことが報告された²⁾。2000 年になってからは、人間工学的立場から、コントラストと面積で評価する方法が提案され³⁾、SEMI スタンダードとして制定されたが⁴⁾、輝度傾斜の影響が考慮されていないこともあり、製造現場で広く使用されることはなかった。この後、視覚のコントラスト感度の詳細なモデルを利用する研究が盛んになり、幾つかの論文が発表されている^{5)~7)}。また、視覚の空間周波数特性に注目し、カメラで撮像した画像を空間周波数特性でフィルタリングして人間が脳で見ている画像に変換する必要性を明らかにした論文も発表された^{8)~10)}。さ

らに、人間工学的立場からむらの感性的強さを 4 種のパラメータを用いて重回帰分析で推定する研究が行われ¹¹⁾、規格としての提案を目指しているが¹²⁾、パラメータが視覚刺激に対して、どのような意味を持つのかに関する説明が不足しているように思われる。

以上、概観したように、むらの定量評価は、ディスプレイ業界の「願い」ではあるが、世界的に合意される方法は現在でも模索中である。その大きな原因は、むらの「多様性」にある。むらは形状、大きさ、コントラストとその変化状況、発生位置、色相・彩度など多種多様にわたる。

本論文は、液晶ディスプレイの輝度むらを実験検討したものであり、周波数領域で画質を解析することにより、むら形状の多様性による定量評価の難しさを解決することを狙ったものである。最初にむら形状とフーリエスペクトルとの関係を概観する。つぎに視覚の空間周波数でのフィルタリングについて述べ、フィルタリング後の画像（視覚感度画像）の周波数平面での解析方法について周波数ヒストグラムと角度ヒストグラムについて定義する。そのあと、むらの周波数特徴のモデル実験結果を示し、周波数特徴からむらが評価できることを示す。さらに実サンプルを用いた評価実験の結果を示し、最後に、むらに含まれる周波数成分について考察する。

2. むら形状とフーリエスペクトル

図 1 に各種むらとフーリエスペクトルとの関係を示す。画像例は円、エッジのぼけた円、斜め線、正方形の 4 種であり、むら部分のコントラストは 5% である。フーリエスペクトルを見ると、エッジの立った円は、高い周波数成分までスペクトルが確認できる。一方、ぼけた円では、低周波成分にエネルギーが集まっており、高周波成分はほとんど見られない。斜め線については、スペクトルは 90° 回転して、ほぼ 45° の斜め成分のみ見られる。正方形は、画像として、縦線と横線の成分を持つので、原画像の縦線はフーリエスペクトルとしては横線 (0°) として観測され、横線は縦 (90°) の線状スペクトルとして観測される。本例に示すようにむら形状とフーリエスペクトルに

* 原稿受付 平成 28 年 8 月 12 日

掲載決定 平成 28 年 11 月 15 日

** 正 会 員 広島工業大学工学部 (広島市佐伯区三宅 2-1-1)

*** 広島工業大学大学院工学系研究科

† 株式会社ファースト (神奈川県大和市下鶴間 2791-5)

Fig.1 Fourier spectra of typical “mura” (non-uniform regions) figures

Fig. 2 Visual Contrast Sensitivity Function (CSF). Measure conditions: Display area 150x200mm, Luminance 20cd/m², Distance 1m

は一定の関係があることが分かる。

3. 周波数解析方法

3.1 視覚の周波数特性

カメラで撮像した画像データと人間が知覚する画像とは異なっている⁹⁾。人間と同じ評価結果を得るためには、カメラから得た RGB 値に人間の視覚特性を作用させ、人間が見ている画像に変換する処理が必要となる。視覚特性としては各種のものがあるが、本研究では最も基本的である視覚の空間周波数特性 CSF (Contrast Sensitivity Function) を用いる。

視覚の空間周波数特性 CSF は、正弦波パターン of 各空間周波数において、パターンのコントラストを 0 から徐々に上げていき、パターンの縞が知覚できる最小のコントラスト閾値を測定することにより得られる。コントラスト閾値の逆数をコントラスト感度と呼び、各空間周波数 (cpd : cycle per degree 視角 1°

Fig. 3 Procedure to find visual sensitivity $v_s(x,y)$ from an original image $i(x,y)$. $CSF(f)$ is a contrast sensitivity function

あたりの縞の数) に対するコントラスト感度を表したものが空間周波数特性である¹³⁾。

空間周波数特性を図 2 に示す。測定器は視覚刺激作成装置 ViSaGe (Cambridge Research Systems 社製) を用いた。被験者は男性 (22 歳, 色覚正常, 視力 1.0 以上) であり, 0.1 から 20cpd まで, 5 回の測定の平均値である。コントラスト感度が最大になる空間周波数は個人差・年齢差があるが, 従来報告されている測定結果¹⁴⁾と近い結果であり, 本研究で使用するに十分な精度が得られていると判断している。

3.2 フーリエ変換

原画像に高速フーリエ変換 (FFT) を行い位置座標系から周波数領域に変換する。 $i(x,y)$ は原画像である。

$$I(u,v) = F[i(x,y)] \quad (1)$$

フーリエ変換画像 $I(u,v)$ を極座標系に変換する。空間周波数 r に対応する視角 θ は次式で計算する。

$$\theta = 2 \tan^{-1}(w/2lr) \quad (2)$$

ここで w はディスプレイの幅, l は視距離である。空間周波数 f は視角 θ の逆数として計算できる。

$$f = 1/\theta \quad (3)$$

次に視覚の空間周波数特性を有する CSF フィルタを適用することにより, 視覚特性を考慮したフーリエスペクトルが得られる。このフーリエスペクトルに対し, 次節で述べる周波数ヒストグラムと角度ヒストグラムを計算する。

CSF フィルタリングの処理結果を確認するため, 逆フーリエ変換を行い, 視覚感度画像 $Vs(x,y)$ を得る。

$$Vs(x,y) = F^{-1}[CSF(f) \cdot I(u,v)] \quad (4)$$

$CSF(f)$ は予めコントラスト感度の最大値が 1 になるように正規化しておく。図 3 に円形の擬似むらを使った処理画像例を示す。

3.3 周波数ヒストグラム

周波数ヒストグラム $p(r)$ は, 空間周波数毎のパワースペクトル値で, 以下の式によって計算する。

$$p(r) = \int_0^{2\pi} p(r, \theta) d\theta \quad (5)$$

図 4(a) に積分範囲を示す。 r は空間周波数であり, r の値が大きくなるにつれ周波数が高くなる。図 4(b) にむら不良品と良品の特性を示す。不良品の場合, 欠陥部があるため, 中間周波数でのパワースペクトル値は良品よりも大きくなる。

Fig. 4 Radial power distribution histogram

Fig. 5 Angular power distribution histogram

3.4 角度ヒストグラム

すじむらは、欠陥画素のコントラスト自体は大変小さく、それが直線的に並んでいるため、目に付き易くなる。このため、周波数領域での検出においてはフーリエスペクトルを特定角度で積算する角度ヒストグラムが有効である。

角度ヒストグラム $p(\theta)$ は各角度でのパワースペクトル積算値であり、以下の式によって計算する。

$$p(\theta) = \int_{r_1}^{r_2} p(r, \theta) dr \quad (6)$$

ここで p はパワースペクトルで、 r_1 は積分の最小角度、 r_2 は最大角度であり、図5(a)は積分範囲を示す。図5(b)は角度に対するスペクトルの強さを示す。欠陥の場合パワースペクトルヒストグラム $p(\theta)$ はピークを持っており、ピーク角 θ_0 から原画像における線欠陥の角度が計算できる。

4. むらの周波数特徴

むらの代表として、円むらおよび線(すじ)むらについて、モデル実験を行い、形状とパワースペクトルとの関係を検討する。画像サイズは512×512画素であり、本実験の目的上、CSFフィルタは使用していない。

4.1 円むら

円むらのコントラスト、エッジ強度を変化させて、形状とフーリエスペクトルとの関係を求めた。図6(a)にコントラストと周波数ヒストグラムとの関係を示す。コントラストは1~10%まで変化させた。円の直径は100画素である。図から、どの周波数においても、コントラストが高ければ、パワースペクトル値が大きくなることがわかる。

つぎに、エッジ強度を変化させて周波数ヒストグラムとの関係を求めた。図6(b)に結果を示す。エッジ強度は、平滑化処理回数で変化させた。円の直径は150画素であり、コントラストは5%である。平滑化により高周波成分が大幅に減少す

(a) Circular "mura" contrast variation. Parameters are contrasts

(b) Circular "mura" edge gradient variation. Parameters are edge gradients

(c) Linear "mura" angle variation. Parameters are line angles

(d) Linear "mura" length variation. Parameters are line length pixels

Fig. 6 Relation between "mura" shapes and power spectra

ることがわかる。平滑化回数は、1, 2, 4回と変化させた。

4.2 線むら

線の方法と長さを変化させて、角度ヒストグラムとの関係を調べた。線の方法は、0°(水平)、45°、90°(垂直)、135°の4種とした。長さは200画素、線幅は2画素である。図6(c)に結果を示す。0°の水平線は、フーリエスペクトルは90°(垂直)に現れる。原画像で45°の線は角度ヒストグラムでは、135°でピークを持つ。同様に、90°の線は0°、135°の線は角度ヒストグラムでは45°にピークを持つ。

図6(d)に線の方法が0°のときに線の長さを変化させたときの角度ヒストグラムを示す。線の長さは、512, 200, 50画素と変化させた。線の長さが短くなるとパワースペクトル値が小さくなることがわかる。

5. 実験

5.1 実験サンプル

製造工程の点灯検査で、パネル面に対し直角方向からカメラ (2752×2204 画素) でパネル全面を撮像した画像を使用する。撮像画像からパネル部分を 1920×1080 画素で切り取り、原画像として使用した。実験サンプル 62 枚は、すべて同一製品であり、アスペクト比 16:9 の 13.3 インチ (1920×1080 画素) のパネルである。

評価を行うのは良品 29 枚、不良品 33 枚の合計 62 枚であり、むらのコントラストは小さいもので 0.5% 程度である。欠陥の基本形状は図 7 に示す 3 種である。円形や楕円形のは各種サイズがある。すじむらは、太さと長さが各種あり、角度は垂直・水平のものと、角度が不定な斜めのものがある。

5.2 実験方法

図 8 に評価方法を示す。原画像はフーリエ変換し、CSF フィルタを適用して人間の見ている画像に変換する。つぎに周波数スペクトルを解析するため、周波数ヒストグラムと角度ヒストグラムを計算する。このあと、逆フーリエ変換により、原画像を CSF フィルタリングした画像 (視覚感度画像) に変換し、周波数ヒストグラムと角度ヒストグラムを用いて画質むら进行评估する。13.3 インチのパネルなので、50cm から観察すると視野角は 32.8° となる。画像データは 8bit であり、フーリエ変換は 4 の倍数サイズで高速変換が可能な $\text{fft}w^{15)}$ を用いた。図 9 にコントラスト 1% の斜めすじの原画像と視覚感度画像を示す。視覚感度原画像では原画像のシェーディングが除かれているため、欠陥が見やすくなっている。

Fig. 7 Sketches of "mura" sample

Fig. 8 Procedure of evaluation method

Fig. 9 Example of oblique line "mura" (contrast 1%)

5.3 実験結果

5.3.1 周波数ヒストグラムによる解析

図 10(a)に良品の周波数ヒストグラムを、(b)に不良品の周波数ヒストグラムを示す。良品の場合は特徴的なヒストグラムは示さず、周波数とともにパワースペクトル値は減少する。不良品は、不良の種類によりさまざまなスペクトル形状を示す。赤の破線は低周波域 $r=10$ (0.3cpd), 高周波域 $r=60$ (1.8cpd) の空間周波数を示す。

図 11 に $r=10$ (0.3cpd) でのパワースペクトル値を横軸に、 $r=60$ (1.8cpd) でのパワースペクトル値を縦軸とした図を示す。○が良品であり、×が不良品である。良品は $r=10$ の低周波数でも、 $r=60$ の高周波領域でも低いパワースペクトル値を示す必要がある。図 11 より良品は $r=10$ におけるパワースペクトルが 6000 以下、 $r=60$ でのパワースペクトルが 2300 以下となっている。良品・不良品の境界あたりにある矢印のサンプルが上記判定値を超えても良品と判定されている。このサンプルには薄く太い横線むらが認められるが、目視判定による良品限度と考えられる。以上の結果から、2 種の周波数を用いて、適切に良品/不良品が判断されていると考える。

5.3.2 角度ヒストグラムによる解析

図 12 に斜めすじの解析結果を示す。結果の角度ヒストグラムより 110° の点でピークがあるため、原画像においては 20° の斜めすじがあることが分かる。このサンプルのフーリエスペクトルを図 13 に示す。110° 付近でパワースペクトル値が大きくなっていることが分かる。

(a) Good samples

(b) Defect samples

Fig. 10 Radial power distribution histogram

Fig. 11 Radial power spectrum values at frequency $r=10$ and 60

Fig. 12 Angular frequency power histogram of oblique line "mura" sample

Fig. 13 Power spectrum $I(u,v)$ of oblique line "mura" sample Fig. 14 Power spectrum values at angle $\theta=0$ (vertical line "mura")

すじむらは各種の太さがあるが、水平・垂直の場合が多い。水平（横）すじは、角度ヒストグラムで 90° でのパワースペクトル値として観測でき、垂直（縦）すじは 0° でのパワースペクトル値として観測できる。図 14 に縦すじむら欠陥のパワースペクトル値を示す。良品と縦すじむら不良品 9 個との 0° でのパワースペクトル値の違いは明瞭である。

以上の実験により、62 個すべてのサンプルのむらが検出できた。

6. 結 言

電子ディスプレイの輝度むらを実空間画像ではなく、フーリエ変換により周波数領域に変換して評価する手法を提案した。

- (1) 評価対象のむら画像（円形、楕円形、すじ）をフーリエ変換により周波数領域に変換し、視覚の周波数特性 (CSF) でフィルタリングする。
- (2) フーリエスペクトルから周波数ヒストグラムと角度ヒストグラムを作成し、むらとそれぞれのヒストグラムとの関係をモデル実験により明らかにした。
- (3) 実サンプルを用いた評価実験により、周波数ヒストグラムにおいて 0.3 と 1.8cpd での 2 種類の周波数でのパワースペクトル値を使用することにより、良品と不良品を判別できることを示した。特に斜めすじ、縦・横すじは角度ヒストグラムをとることによっても検出できることを示した。

以上のように、むら形状が多様であっても評価する手法について研究を行い、むらの検査にフーリエ変換手法を適用できる可能性が示された。

今後の課題は、さらなる多くの実サンプルで実験することが挙げられる。また、不良品選別だけでなく、本方式を製品画質のグレード評価に使用できるかの検討を行うこと、さらに色むら評価への拡張をすることである。

参 考 文 献

- 1) 浅野敏郎, 川目啓介, 望月淳, 福原信雄: 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), **J73-D2**, 6 (1990) 830.
- 2) 棚澤信, 鈴木俊彦, 下藪裕明: 液晶表示素子の表示むら評価技術の開発, 精密工学会誌, **66**, 1 (2000) 152.
- 3) 森由美, 田村徹, 吉武良治, 森口喜代, 棚橋高成, 辻智: 認識限界コントラストに基づいた輝度ムラの定量評価手法, 映像情報メディア学会誌, **56**, 11 (2002) 1837.
- 4) SEMI, "Definition of Measurement Index (Semu) for Luminance Non-uniformity in FPD Image Quality Inspection," SEMI D31-1102 (2002).
- 5) A.B.Watson, "The Spatial Standard Observer: A human vision model for display inspection", SID 06 DIGEST **31.1** (2006) 1312.
- 6) 谷口和隆, 上田邦夫, 大西浩之, 辰巳昭治: 人間の感覚に基づいたムラ検出手法, 電気学会論文誌 D, **126-D**, 11 (2006) 1539.
- 7) 岸卓人, 阿久津実, 大谷哲也: 視覚系空間周波数特性に基づく輝度ムラ強度定量化手法, 映像情報メディア学会誌, **60**, 5 (2006) 789.
- 8) T. Asano, Y. Morimoto, and T. Ikeda, "Evaluation of FPD Mura Grade Using a Contrast Sensitivity Function Filter," IDW'08 (2008) 2119.
- 9) 森元祐一, 高木勇治, 浅野敏郎: 視覚特性に基づく電子ディスプレイの輝度むらグレード評価, 電気学会論文誌 C, **131-C**, 2 (2011) 411.
- 10) 近藤孝洋, 高木勇治, 前田俊二, 浅野敏郎: 視覚特性を考慮した電子ディスプレイの色むら定量評価, 精密工学会誌, **79**, 11 (2013) 1096.
- 11) Y. Masakura, T. Tamura, K. Nagamine, and S. Tomioka, "Subjective Evaluation for Indistinct Mura of LED back light," IDW'08, (2008) 1203.
- 12) K.Nagamine, S.Tomioka, T.Tamura and Y.Shimpuku, "A Qualitative Evaluation Method for Luminance and Color Uniformity of a Display Screen Based on Human Perceptions", IDW'11 (2011) 341.
- 13) J.P.Frisby and J.V. Stone: Seeing - The Computational Approach to Biological Vision, MIT Press (2010) 88.
- 14) 日本色彩学会: 新編色彩科学ハンドブック, 東京大学出版会(2003) 1022.
- 15) <http://www.fft.org/>