シミュレーション画像を用いた主観評価に基づく新規な階調評価指標の提案

Objective Evaluation Criterion of Grayscale Viewing Angle Characteristics by Subjective Evaluation Using Simulated Images

久武雄三[†], 小尾正樹[†], 伊藤秀樹[†], 竹林希佐子[†],
多胡千種[†], 川田靖[†], 村山昭夫[†]

Yuzo Hisatake[†], Masaki Obi[†], Hideki Ito[†], Kisako Takebayashi[†],
Chigusa Tago[†], Yasushi Kawata[†] and Akio Murayama[†]

Abstract The patience limit (PL) and just noticeable difference (JND) of various grayscale viewing angle characteristics were evaluated subjectively using simulated images. Ten test subjects evaluated four types of picture images. Each type consisted of eight different images; two kinds of reverse images, three kinds of black crushing images, and three kinds of white omission images. All the images had several grayscale difference levels. The results showed that the concerns depend not only on the kind of pictures but also significantly on the images. We propose a new evaluation criterion, criterion grayscale difference odiousness (CGDO) value, for evaluating grayscale viewing angle characteristics. The value is calculated integrating the gamma-curve shape and the difference in the grayscale level from the original one. In our results, the CGDO values at PL and JND are about 2.0 and 0.5, respectively. Therefore the CGDO values shall be 2.0 or less, and should be 0.5 or less for ideal TFT-LCD legibility.

キーワード: γ 特性, 視野角, 主観評価, GDO, CGDO

1. ま え が き

液晶表示素子 (LCD) は, コントラスト特性などの画質特性に視角依存性を有している. 近年, 視角特性は大幅に向上してきているが, その改善にあたって, 様々な画質特性に対する計測方法, 評価方法, 指標の提案がなされている. 例えば, 等コントラスト曲線や $\Delta u'v'$ 曲線のコントラスト, 色視角特性評価の一般的な指標として用いられており, これらの心理物理指標と画像品質の相関については主観評価に基づいた研究結果が報告されている¹⁾²⁾.

一方, 階調特性については, 視角依存性の心理物理量の評価, 報告はなされている^{3)~5)}が, 主観評価に基づく画像品質に対する評価結果や指標の報告はない. これらの指標は, 本来, 画像品質の要求値を明らかにするために必要なものである.

画像品質を主観評価するには, 実際の液晶パネルを用いて, 心理物理量の評価結果との相関を調べる方法が考えられる. しかしながら, LCDは階調特性以外の様々な特性に視角依存性を持っている. そこで我々は, 階調視角依存性のみを再現したシミュレーション画像を作成し, 様々な階調特性曲線形状に対する許容限と認知限の主観評価を行った. その結果より客観的な物理量との相関関係を求めて新規な階調評価指標 (CGDO) を提案した.

2. 主 観 評 価

2.1 方 法

階調特性が元画像からずれた場合, そのずれ方は明暗の順列が逆転する場合 (階調反転), 元画像よりも暗い表示側へずれる場合 (黒潰れ), 明るい表示側へずれる場合 (白抜け) に分類できる.

さらに階調反転は, その明度-階調レベル特性 (γ 特性) の極値が暗側にある場合と明側にある場合の二つに分類できる. 前者は相対的に暗く表示されるべきところが明るく表示される現象であり, 後者は相対的に明るく表示されるべきところが暗く表示される現象である.

また, 黒潰れや白抜けは元画像からのずれが暗側で生じ

2005 年 12 月, IDW/AD'05 で発表

2006 年 1 月 31 日受付, 2006 年 5 月 19 日再受付, 2006 年 6 月 20 日採録
† 東芝松下ディスプレイテクノロジー株式会社 先行技術商品開発センター
(〒 366-0032 埼玉県深谷市幡羅町 1-9-2 東芝深谷工場内, TEL 048-574-2774,
E-mail: yuuzo.hisatake@tmdisplay.com)

† Toshiba Matsushita Display Technology Co. Ltd. Research and Development Center
(1-9-2, Hatara-cho, Fukaya-shi, Saitama 366-0032, Japan)

図 1 評価画像とそれらの階調度数分布
Evaluated pictures and each histogram of grayscale level.

る場合と明側で生じる場合およびその中間で生じる場合の三つに分類できる。例えば、暗側で黒潰れが生じた場合、暗い階調を用いた画像の階調表現が損なわれ、ベタっぽい印象を与える。逆に明側で生じれば明るさ感が損なわれた印象を与える。我々は、画像シミュレーターソフトを用いて、8種類の γ 特性からなる画像を作成し、主観評価により、画像品質を評価した。

図 1 は評価に用いた四つの元画像と全画素の階調レベルの度数を階調レベルに対して、プロットした階調度数分布特性である。

階調レベルは明度が等間隔になるよう割り振ってある。カラー表示ドットマトリクスLCDに表示する画像は、写真や絵およびそれらの動画像などからなるグラフィック画像と、主に文字や線、図形から構成されたテキスト画像に大別さ

表 1 主観評価条件
The condition of subjectivity evaluation.

Evaluated Panel	17.0 inch SXGA high quality LCD
Evaluated Images	4 images ('Girl', 'Branch lappet cherry', 'E-mail', 'Internet')
Evaluated Image Resolution	XGA
Kind of Evaluated Gamma-curves	2 reversal images (dark level, bright level), 3 black crushing images, (dark level, middle level, bright level), 3 white omission images (dark level, middle level, bright level)
Grayscale levels	256 (0 to 255)
Difference of grayscale levels	0 (Original), 16, 32, 48, 64
Peak grayscale level in reversal images	In dark level reversal: 32, 64, 96, 128 In bright level reversal: 128, 159, 191, 223
Subjects	5 females and 5 males (average age: 38)
Visual acuity	≥ 1.0
Viewing distance	500 mm
Luminance	300 cd/m ²
Floor Illuminance	400 lx

(1) Reversal image gamma-curve shapes

(2) White omission image gamma-curve shapes

(3) Black crushing image gamma-curve shapes

図 2 評価階調特性曲線
Kinds of evaluated Gamma-curve shapes.

れる。これらグラフィック画像、テキスト画像の代表例として、人物（評価画像A：少女）、風景（評価画像B：枝垂れ桜）、メール画面（評価画像C：Eメール）、インターネット画面（評価画像D：インターネット）を用いた。

表 1 は主観評価の条件を纏めたものである。評価には対角 17 吋 (43cm) の SXGA-LCD を用い、画面中央に解像度 XGA(1024 × 768) の画像を背景を白および黒にして表示した。本比較によって、主観評価値の順応輝度依存性を確認した。なお、画面上の照度 400lx に対して白表示の輝度は 300cd/cm² に設定した。背景に白表示を用いた場合、ディザ階調と輝度階調の明るさを一対比較する 3 種の画像評価を行って、被験者が白背景の輝度に順応した状態であることを確認した。また、評価した画像は 256 階調で、視距離は 500mm、画面上の照度は 400lx、被験者は 20 代から 40 代の男女各 5 名で、評価視距離における視力は矯正者含め、1.0 以上である。

図 2 に評価した 8 種の γ 特性の階調特性曲線を示す。横軸は元画像の階調レベルであり、縦軸は出力階調レベルを示している。元画像の階調レベル、出力階調レベルとも、明度を 256 分割にし、1 レベルは L^* が 100/256 (%) に該当する。本研究では、階調特性のみの許容性を評価するため、コントラスト特性、色度特性は変化させていない。図 2 に示

図 3 シミュレーション画像の一例
Example of created picture by using picture software.

す曲線は理想的なコントラスト視角補償を行ったLCDの斜め視野での最大輝度に対する相対的明度に相当する。

図 3 はシミュレーション画像の一例である。評価画像 A において、図 2(1) に示す暗側の階調反転を極値:32 レベル、最大ズレ量:64 レベルとしている。このような特性は、従来のTN-LCDを下方向から観察したときに見受けられるものである。各々の γ 特性に対し、階調レベルのズレ量を0,16,32,48,64と変化させ、また、階調反転画像では、極値が暗側にある画像では0,32,64,96,128、明側にある画像では128,159,191,223と振った。

元画像からズレ量の低い順に順次画面に表示し、被験者に元画像との相違が識別できる最小のズレ量（認知限）と画像の品位を相対評価してもらった。品位は5段階のスケール（1：凄く気になる。2：気になる。3：少し気になる。4：僅かに気になる。5：全く気にならない若しくは元画像と相違がない。）で評価した。評価は3回行い、平均値をその被験者の評価値とした。また、評価値と被験者全員の評価値の平均値から階調レベルのズレ量との相関を信頼度が95%以上となる回帰線により求め、評価値が3.5となるズレ量を許容限と定義した。

表 2 許容限を得る階調ズレ量（平均値）
Difference of gray-level to Patience limit(White background/Black background).

			Girl	Brunch lappet cherry	E-mail	Internet
Reversal image	in dark level	PL32	4.0/4.0	5.0/4.5	24.0/24.0	48.0/48.0
		PL64	3.0/3.0	3.0/3.0	5.0/5.0	12.0/12.0
		PL96	2.0/2.0	3.0/3.0	8.0/8.0	32.0/32.0
		PL128	1.0/1.0	2.5/2.5	7.5/7.5	20.0/20.0
	in bright level	PL128	1.0/2.0	0.7/0.7	4.0/4.0	4.0/4.0
		PL159	1.3/2.3	1.0/1.0	3.0/3.0	3.0/3.0
		PL191	1.8/1.8	5.0/5.0	3.5/3.5	3.5/3.5
White omission	in middle	PL223	2.2/1.8	3.0/3.0	4.0/4.0	4.0/4.0
			60.0/60.0	71.0/71.0	52.0/52.0	88.0/88.0
			32.0/32.0	34.0/34.0	40.0/40.0	64.0/64.0
Black crushing	in dark level		16.0/15.5	18.0/14.0	66.0/66.0	23.0/23.0
			5.0/5.0	5.0/5.0	16.0/7.0	28.0/28.0
			50.0/50.0	47.0/47.0	64.0/68.0	64.0/88.0
	in dark level		15.0/15.0	18.0/18.0	40.0/32.0	22.0/22.0

図 4 中間調での「黒つぶれ」に対する評価結果
(階調ズレと評価スコアの相関)
Evaluation result of 'Black crushing in middle grayscale level(Correlation with evaluated score and difference grayscale level).

2.2 結果

図 4 は、背景白表示にて中間調での黒潰れに対する評価結果の一例である。横軸は階調ズレ量、縦軸は評価スコア、●は平均値、―は標準偏差を示す。いずれの評価画像に対しても、ズレ量が大きいくほどスコアが低下している。また画像 A（少女）と B（枝垂れ桜）は、C（電子メール）、D（インターネット）よりも低下の度合いが大きい。これは、図 1 に示す各々の画像の階調度数分布と相関がある。画像 A、B は黒潰れを生じさせた中間調領域の度数が C、D よりも高く、黒潰れを生じる領域が多い。このような相関関係は、他の γ 特性への評価結果、背景黒でも同様に見受けられた。

表 2 は白背景、黒背景それぞれに対し、各 γ 特性、画像に対する許容限（評価スコア 3.5 を得る階調ズレ量の平均値）を纏めたものである。白背景による評価結果と黒背景による評価結果は殆ど同じ値であった。2 者間の結果の差の標準偏差は 0.10 % であり、統計的に見て繰り返し性に問題のない値であるので、同条件の評価値と扱い、以降許容限、認知限の値は両者を合わせたデータから算出した。なお、いずれの γ 特性に対しても、画像 C の許容限は A、B よりも高く、D の許容限はさらに高い値となっている。また、概ね白抜け

表 3 認知限を得る階調ズレ量（平均値）
Difference of gray-level to Just Noticeable Difference (White background/ Black background).

			Girl	Brunch lappet cherry	E-mail	Internet
Reversal image	in dark level	PL32	2.0/2.0	2.5/2.5	2.4/2.4	6.4/6.4
		PL64	1.5/1.5	1.5/1.5	1.6/1.6	1.6/1.6
		PL96	1.0/1.0	1.5/1.5	4.0/4.0	3.0/3.0
		PL128	0.5/0.5	1.3/1.3	3.8/3.8	4.0/4.0
	in bright level	PL128	0.5/0.5	1.6/1.6	2.0/2.0	2.0/2.0
		PL159	0.7/0.7	1.6/1.6	1.5/1.5	1.5/1.5
		PL191	0.9/0.9	0.8/0.8	1.8/1.8	1.8/1.8
White omission	in middle	PL223	1.1/1.1	1.5/1.5	2.0/2.0	2.0/2.0
			17.6/17.6	24.0/24.0	16.0/16.0	14.4/14.4
			16.0/16.0	17.6/17.6	8.0/8.0	11.2/11.2
Black crushing	in dark level		8.0/8.0	9.0/9.0	32.0/32.0	16.0/16.0
			2.5/2.5	2.5/2.5	3.5/3.5	1.6/1.6
			22.4/22.4	20.8/20.8	21.4/21.4	35.2/35.2
	in dark level		7.5/7.5	9.0/9.0	17.6/17.6	14.4/14.4

の許容限は黒潰れよりも高く、階調反転の許容限はこれらよりも著しく低い。図5に階調反転、黒潰れ、白抜けの許容限の平均値と標準偏差を示した。各々の γ 特性、4種の画像に対する被験者全員の評価結果を纏めたもので、階調反転、黒潰れ、白抜けの間には、P値（有意確率、二つのデータ間の差が偶然に起こりえる確率、有意差の検定値） < 0.05 で有意な差が生じている。すなわち、元画像の特性（階調度数分布）、階調のズレ量だけでなく、階調特性曲線の形状も品位に影響していると言える。

また、表3は白背景、黒背景それぞれに対し、各 γ 特性、画像に対する認知限を纏めたものである。許容限の評価結果同様、白背景と黒背景の評価結果は殆ど同じ値だった。ちなみに、これらの結果は、評価スコア4.5を得る階調ズレ量の平均値とはほぼ一致していた。図6は表2に示す許容限と表3に示す認知限の相関を示したものである。横軸は認知限を得る階調ズレ量、縦軸は許容限を得る階調ズレ量である。細線は認知限の2倍となる許容限、実線は4倍となる許容限を示す。概ねいずれの γ 特性に対しても許容限は認知限の2倍以上であった。また、 $\spadesuit$ $\blacktriangle$ $\heartsuit$ $\blacklozenge$ で示す四つの群（例えばDにおける暗側の階調反転）は許容限が認知限の4倍あった。

次章では、これら許容限と認知限の相関の要因について考察し、階調視角特性の評価指標について検討した結果を述べる。

3. 客観評価指標

図7は、許容限が認知限の4倍であった画像：暗側で階調反転した評価画像Dの画像と階調度数分布を示したものである。図8は2種の階調反転における階調レベル間での階調ズレ量を示したもので、階調反転を伴う γ 特性は階調反転だけでなく、同時に黒潰れ、白抜けも生じさせていることを説明している。図8(1)に示すように、32レベルに極値を持つ階調反転の場合、0レベルから32レベルまでは、階調の序列が逆転しているが、32レベルから254レベルまでは黒潰れが生じている。同様に明側に極値を持つ階調反転（図8(2)）では白抜けが生じる。

許容限が認知限の4倍であった暗側で階調反転した評価画像Dは、図7に示すように階調反転が生じる階調レベル（0レベル～32レベル）の度数が低い。したがって、画像としては、階調特性がほぼリニアで、反転が目立たず、単にコントラストが高まったように視認され、品位はさほど低下しないと推測される。

これらの結果から、階調視角特性は画像の特性、 γ 特性の形状、階調のズレ量に依存していると考えられる。ここで、品位の主観特性の γ 特性形状依存は画像が持つ階調度数分布に応じたものとなる。したがって、品位は各々の因子を階調レベルで積分したものと相関があると推測した。我々は、 γ 特性の形状依存が評価スコアと線形な相関を持つと仮定し、すべての評価結果から γ 特性の形状依存係数を逆算し、

図5 許容限の階調特性曲線形状依存性
Patience Limit(PL) as a function of Gamma-curve shape.

図6 認知限と許容限の相関（各々の階調ズレ量平均値）
Comparison with Patience limit and Just Noticeable different limit.

図7 評価画像Dにおける低階調域での階調反転＜許容限が認知限の4倍であった階調特性の一例＞
Reversal Images in Dark-gray-level on Picture D.

種々の画像に対する階調視角特性の品位指標 GDO (階調特性ズレの気懸り度合: Grayscale Difference Odiousness value) を定義した。

$$GDO = \int_{L_0}^{L_{255}} |F(gl) \cdot C(gl) \cdot \Delta(gl)| dgl \cdots (1)$$

$F(gl)$, $C(gl)$, $\Delta(gl)$ は、それぞれ各階調レベルに対する度数, γ 特性の形状係数, 元画像に対する階調ズレ量である。 $C(gl)$ は図 8 に示す 3 種の γ 特性形状: 階調反転 Re, 黒潰れ Bl, 白抜け Wh に応じた定数のいずれかであり, 各階調レベルにおける階調のズレ方に依る。すべての評価結果に対し, GDO 値の分散が最も小さくなるように $C(gl)$ の値を算出した。図 9 に結果を示す。横軸は GDO, 縦軸は評価スコアとして, 全画像の評価スコアをプロットしている。 γ 特性の形状係数 $C(gl)$ は, 白抜け Wh を基準 (1.00) としたとき, 階調反転 Re が 3.12, 黒潰れ Bl が 2.08 であった。また, 評価スコアは GDO に対し, R^2 (回帰式の寄与率) が 97.4 % の負の線形相関となっている。

ドットマトリクス LCD は様々な画像を表示するため, 階調視角特性の評価はすべての階調レベルに対して, 階調のズレ方, ズレ量が反映される必要がある。そのため, 評価指標に用いる画像は, すべての階調レベルが均等に割り振られたもの (例えば, グレイスケールバー) となり, $F(gl)$ は定数 (256 階調の場合, $1/256$) となる。我々は, パネルの階調視角特性の評価指標として, CGDO (階調特性ズレの気懸り度合指標: Criterion Grayscale Difference Odiousness value) を定義した。

$$CGDO = \int_{L_0}^{L_{255}} |C(gl) \cdot \Delta(gl)| / 256 dgl \cdots (2)$$

この指標は GDO (式 (1)) における $F(gl)$ を定数とした評価指標である。我々の評価結果では, 平均評価スコア 3.5 を得る許容限は CGDO = 2.0, 平均評価スコア 4.5 を得る認知限は CGDO = 0.5 であった。

4. む す び

シミュレーション画像を用いて, 様々な γ 特性の画像を主観評価した結果, 品位に対する評価スコアは元画像の特性 (階調度数分布), 階調ズレ量, γ 特性形状に依存していることがわかった。品位に対する γ 特性形状の依存度が線形相関と仮定して係数 $C(gl)$ を求めた結果, 白抜け Wh を基準 (1.00) とした場合の係数は, 階調反転 Re が 3.12, 黒潰れ Bl が 2.08 であった。我々は, パネルの階調視角特性の評価指標として CGDO を提案した。この評価指標は, LCD に限らず, 他のドットマトリクスディスプレイの評価に用いることが可能である。

ユーザにとって見やすく負担のない画質を得るためには, 各々の用途において必要とされる視角範囲において, CGDO の値は許容限 2.0 以下, 理想的な視認性を得るには認

図 8 3 種の階調のズレ方
3 kinds of the difference of grayscale level to original grayscale level.

図 9 GDO と平均スコアの相関
Correlation with Evaluated score and GDO value.

知限 0.5 以下であるべきと考える。

最後に, 評価画像の作成, 評価結果の統計処理に協力頂いた当社の笹林貴氏, 藤山奈津子氏, 常木直子氏, 渡辺直子氏に感謝する。

〔文 献〕

- 1) Keiichi Miyazaki, Makoto Yamada, Yutaro Mitsumori, Isao Fujiwara and Masamitsu Ishida, "A New Viewing-Angle Evaluation Method for LCDs with Image Color Difference", SID'05 DIGEST paper, p-36, pp406-409(2005)
- 2) M.Sato, M.Ishikawa, Y.Hisatake and H.Hatoh, "Viewing-Angle Evaluation Method of Color Shift for LCDs with Gray-scale Image", SID'94 DIGEST, 22.2, pp333-336(1994)
- 3) J. Hirata, Y.Hisatake, M.Ishikawa, M.Shoji, Y.Tanaka and H.Hatoh, "Viewing-Angle Evaluation Method for LCDs with Gray-scale Image", SID'93 DIGEST paper, p-31, pp561-564 (1993)
- 4) Y.Nakayoshi, N.Kurahashi, J.Tanno, E.Nishimura, K.Ogawa and M.Suzuki, "High Transmittance Pixel Design of In-Plane Switching TFT-LCDs for TVs", SID'03 DIGEST, 34.5L, pp1100-1103 (2003)
- 5) H.Yoshida, T.Kamata, K.Ueda, R.Tanaka, Y.Koike and K.Okamoto, "Multi-domain Vertically Aligned LCDs with Super-wide Viewing Range for Gray-scale Images", IMID'04 DIGEST, 12-2, pp198-201(2004)