図形パターンの検出感度によるディスプレイ 表示文字の評価

正会員 米 山 恒 雄[†], 正会員 神 山 忠 信^{**}, 正会員 井 沢 孝 次^{**}

Legibility Evaluation of Displayed Characters Using a Measure of Detectability of Pictorial Pattern

Tsuneo Yoneyama[†], Tadanobu Kamiyama^{**} and Koji Izawa^{**}

Abstract This paper describes an analytical method to evaluate the legibility of displayed characters through detectability of pictorial patterns. In image pickup devices including eyes, shot noise is produced during the process of photoelectric conversion, and result in limited detection of intended pictures. Hence it can be considered that detectability of pictorial pattern is an important element for evaluation of the image quality. From this view point, an analysis is conducted on relationship between the resolution of display and the detectability of displayed Kanji patterns. This analysis is performed on the basis of Iijima's picture observation theory. The detectability of each displayed pattern is compared with the result of subjective evaluation of legibility. Consequently, it is shown that the deterioration of legibility of characters which resulted from the resolution of display confirms the change in detectability. By this means, validity evaluation conducted on the legibility of displayed characters through detectability is verified.

1. ま え が き

情報通信システムの発達につれて、ユーザインタフェースにおける表示装置の役割はますます大きくなりつつある。これらの表示装置では文字が対話の基本的な手段のひとつであり、文字の品質を高く保つことが重要である。しかし、一般にハードコピーに比べて表示装置の解像度は低く、低ドット密度で文字を表現し

なければならないので、文字の品質は低くなりがちである。特に近年ではマルチウィンドウシステムが普及し、同時に複数の画面を表示するために画像を縮小変換して表示することも多くなり、文字あたりドット数はさらに低下する。従来、文字は2値パターンとして表示されるのが通例であり、主観評価結果によれば、特に低ドット密度域での品質劣化は著しい¹⁾。

しかし、文字を2値ではなく階調を持ったパターン

キーワード：画質評価，表示装置，検出感度

1984年4月，電子通信学会全国大会で一部発表

1996年1月22日受付，1996年7月24日再受付

[†] 城西国際大学（〒283 東金市求名1，TEL 0475-55-8837）

^{**} 株式会社東芝 マルチメディア技術研究所（〒210 川崎市幸区柳町70，TEL 044-548-5355）

[†] Jousai International University (1, Gumyuu, Tougan-shi, Chiba 283, Japan)

^{**} Multi-Media Engineering Laboratories, Toshiba Corporation (70, Yanagichou, Saiwai-ku, Kawasaki 210, Japan)

として表示すれば品質を改善できることが、経験的に明らかになってきた。英数字のフォントに階調を持たせると、同じドット数でも2値の場合より読み易くなる²⁾。また、ファクシミリにおいては、同じ走査線密度でも階調のあるアナログ方式の方がデジタル方式より文字の了解度が高い³⁾。筆者らは、2値パターンを階調のあるぼけた縮小パターンに変換して表示する方式を提案し、縮小率の如何に関わらず2値表現より品質が向上することを示した⁴⁾⁵⁾。これらの事実から、表示文字のぼけが文字の読み易さに与える影響は比較的小さいことがわかる。ただ、その仕組みはまだ明らかになっていない。表示システムの設計を見通し良く進めるには、表示装置による文字のぼけと読み易さの関係に関する理論的な検討が必要である。

ところで、目を含むあらゆる図形観測機構においては、光電変換に伴う散弾雑音が図形の弁別限界を与えることに注目すると、図形の差の弁別感度が定義できる。この点に着眼し、パターン認識における図形観測理論⁶⁾を光電変換像に適用して図形の弁別感度を定式化した結果、目の空間周波数特性等の視覚特性や像のぼけに関係する基本的な画質要因である鮮鋭度が、図形と背景との弁別感度、すなわち図形の検出感度から導かれることが、これまでに明らかになっている⁷⁾⁸⁾。読み易い文字の第一の条件も、背景との区別が明確にできて、安定した像が獲得できることであると考えられる。その観点に立つと、検出感度は文字の読み易さに深く関係しているものと考えられ、その関係を検討すれば、文字認識という目的に沿った形でぼけの効果を理論的に評価できる可能性がある。

本論文では、以上の観点から観測図形の検出感度による表示文字の品質評価を試み、有効性を検討する。まず、2章で図形の検出感度と表示装置の解像度との関係を定式化し、3章で代表的な文字の検出感度の解像度による変化について解析する。4章ではその結果と読み易さの主観評価結果との対応性を検証する。

2. 表示図形の検出感度⁷⁾⁸⁾

2.1 図形パターンの検出感度

図形は一般に、光学系とそれに続く光電変換系からなる撮像装置を用いて観測されるが、その光電変換過程では散弾雑音が生成し、図形の検出限界を与える要因となる。図形パターンの検出感度はこのことに注目し、光電変換像に図形観測理論⁶⁾を適用して散弾雑音の存在下での図形パターンの検出し易さを次のように定式化したものである。すなわち光電面上の座標ベクトルを $\mathbf{r}(x, y)$ とし、各座標の反射率を表す図形 $f(\mathbf{r})$

がその面に投影されているものとして、その光電変換像を視点 $\mathbf{r}_0$ 、視野 τ_0 、ぼけ τ の3つの観測パラメータの下で観測したときの図形パターンの検出感度 s は

$$s = 10 \log \left(\|g(\mathbf{r}, \tau)\|^2 \frac{\tau}{K} \right) \quad (1)$$

$$\|g(\mathbf{r}, \tau)\|^2 = \int_s G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0, \tau_0 - \tau) g^2(\mathbf{r}, \tau) d\mathbf{r} \quad (2)$$

で定義される⁷⁾⁸⁾。ただし $g(\mathbf{r}, \tau)$ は正準図形と呼ばれ

$$g(\mathbf{r}, \tau) = f(\mathbf{r}, \tau) - K \quad (3)$$

$$f(\mathbf{r}, \tau) = \int_s G(\mathbf{r} - \mathbf{r}', \tau) f(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (4)$$

$$K = \int_s G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0, \tau_0 - \tau) f(\mathbf{r}, \tau) d\mathbf{r} \quad (5)$$

で与えられ、積分記号は2次元全平面にわたる定積分を表し、 G は

$$G(\mathbf{r}, \tau) = \frac{1}{4\pi\tau} \exp \left(-\frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}}{4\tau} \right) \quad (6)$$

で定義される点広がり関数である。なお、視野のパラメータ τ_0 やぼけのパラメータ τ は、この関数の広がりそれぞれ σ_0, σ としたとき

$$\tau_0 = \frac{\sigma_0^2}{2}, \quad \tau = \frac{\sigma^2}{2} \quad (7)$$

である。(1)式のノルムの自乗 $\|g(\mathbf{r}, \tau)\|^2$ は図形の強度、 K/τ は雑音のノルムの分散の大きさを代表しており⁷⁾、検出感度 s はその比すなわち雑音による図形の揺らぎの度合いをひとつの感覚刺激と見なしたときの感覚量に相当する⁸⁾。

2.2 観測機構の最適解像度

この検出感度 s は、観測機構で与えられるぼけ τ によって変化するが、あらゆる図形についてその値が最大になるぼけの最適値が必ず存在することが明らかになっている⁷⁾。すなわち、散弾雑音の存在下で図形を安定して検出するには、観測機構の解像度をそれぞれの図形ごとに最適値に設定することが望ましい。そのぼけの値を τ_m とすると、図形の検出感度の最大値 s_m が求められ

$$s_m = 10 \log \left(\|g(\mathbf{r}, \tau_m)\|^2 \frac{\tau_m}{K} \right) \quad (8)$$

となる。正弦波格子パターンおよび矩形波格子パターンの各周波数についてぼけの最適値 τ_m を求め、検出感度 s_m を計算すると、視覚のコントラスト弁別感度特性と同様の特性を示すことが明らかになっている⁷⁾。したがって、この値は目で観測している場合の図形パターンの検出感度をよく表していると考えられる。

2.3 表示システムの解像度による感度低下

ディスプレイに表示された図形を観測するとき、ディスプレイの解像度が限られていることにより、光電面上の図形はぼける。そのぼけを τ_d と表すと光電面

上の図形は $f(\mathbf{r}, \tau_d)$ と表される．この図形を光電変換した像にぼけ $\tau_m - \tau_d$ を付加し，ディスプレイによるぼけ τ_d と合わせて τ_m になるようにすれば観測図形は τ_d の値に関わらず $f(\mathbf{r}, \tau_m)$ となる．しかし，散弾雑音に与えられるぼけは光電変換以降に与えられる $\tau_m - \tau_d$ のみであり，その場合の雑音のノルムの分散の大きさを，観測機構の光学系の焦点調節誤差によるぼけの効果の場合⁷⁾と同様にして求めると $K/(\tau_m - \tau_d)$ となる．したがって，その場合の検出感度 s は(1)式の τ のかわりに $\tau_m - \tau_d$ と置き，(8)式を参照することにより

$$s = 10 \log \left\{ \frac{\|g(\mathbf{r}, \tau_m)\|^2 \tau_m - \tau_d}{K} \right\} \\ = s_m + 10 \log \left(1 - \frac{\tau_d}{\tau_m} \right) \quad (9)$$

と表される．すなわち，ディスプレイの解像度の低下による検出感度の最大値 s_m からの低下分 Δs は

$$\Delta s = 10 \log \left(1 - \frac{\tau_d}{\tau_m} \right) \quad (10)$$

となる．

3. 文字パターンの検出感度

3.1 観測条件

この章では，表示装置の解像度による文字パターンの検出感度の変化を計算した結果を述べる．対象図形は 24 ドット $\times$ 24 ドットの各種の 2 値の標本パターン

$$f(\mathbf{r}) = 1 - \sum_{ij} a_{ij} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{ij}) \\ \mathbf{r}_{ij} = (il, jl) \quad (11)$$

とし，実際にはディスプレイの解像度によってその原図形にぼけ τ_d が与えられた像が観測されるものとした．ただし δ はディラックのデルタ関数であり， a_{ij} は白画素で 0，黒画素で 1 とする．また，1 はドット間隔である．図 1 はその標本パターンの例である．

観測条件としては，視点を文字の中心，視野の広がり σ_0 ($= (2\tau_0)^{1/2}$) を 0.067° に選んだ．この視野の広がり は正弦波格子パターンの検出感度が視覚の空間周

図 1 文字パターンの例
Samples of character pattern.

波数特性の形に最も近くなるように選んだ値⁸⁾である．また，文字のサイズを文字がこの視野からあまり大きくはみ出さない範囲で，できるだけ大きくなるように 0.44° (約 $6.6\sigma_0$) になるように設定した．これは 10.5 ポイントの文字を視距離 480 mm，8 ポイントの文字を視距離 370 mm で見ている場合に相当する．また，ぼけの値は文字あたり解像本数の形で表した方が直感的に把握し易いので，ぼけによる応答が $e^{1/2}$ になる周波数を文字幅あたり解像本数で表した．すなわちぼけ τ , τ_m , τ_d にそれぞれ対応する文字幅あたり解像本数 ν , ν_m , ν_d は

$$\nu = \frac{W}{\pi\sigma} = \frac{W}{\pi\sqrt{2}\tau} \quad (12)$$

$$\nu_m = \frac{W}{\pi\sigma_m} = \frac{W}{\pi\sqrt{2}\tau_m} \quad (13)$$

$$\nu_d = \frac{W}{\pi\sigma_d} = \frac{W}{\pi\sqrt{2}\tau_d} \quad (14)$$

で与えられている．ただし W は文字の幅であり，上に述べたように視角にして 0.44° である．なお，ぼけ τ , τ_m , τ_d など はすべて等方的なものとし， ν , ν_m , ν_d など は縦横が同じ値とする．

3.2 観測機構の最適解像度

図 2 は，漢字パターン「右」「殊」「量」について(1)式の検出感度 s と観測機構の光電変換系の解像度との関係を示したものである．ただし，検出感度はそれぞれの最大値 s_m で正規化して表している．この図から明らかなように，文字パターンにはそれぞれぼけの最適値があり，文字幅あたり解像本数 ν_m で表すと「右」では 4.8 本/文字幅，「殊」では 5.6 本/文字幅，「量」では 6.7 本/文字幅である．図 2 に例示したもの

図 2 観測機構の解像度によるノルム/雑音比の変化
Resolution of image pickup system vs. norm/noise ratio.

図3 文字幅あたり解像本数による文字の検出感度の変化
Dot density vs. detectability of character pattern.

以外の文字のぼけの最適値は「圧」,「本」などで「右」と同じ4.8本/文字幅,「供」,「岸」,「草」などで「殊」と同じ5.6本/文字幅である。また,「御」,「曇」,「議」などでは8.4本/文字幅であった。これらの結果から明らかなように, ν_m は画数の多い複雑な文字ほど大きくなるが, かなり複雑な文字でも10本/文字幅以下である。

3.3 ディスプレイの解像度による文字の検出感度の変化

(10)式の検出感度の変化 Δs を(13), (14)式を用いて書き直し

$$\Delta s = 10 \log \left(1 - \frac{\nu_m^2}{\nu_d^2} \right) \quad (15)$$

とし, 前節で最適解像度 ν_m を求めた図形について, ディスプレイの解像度による検出感度の変化を求めると図3が得られる。図に示すように, どの文字でもディスプレイの文字幅あたり解像本数 ν_d の低下と共に検出感度は低下する。前節で見たように, 観測機構の最適解像度 ν_m がかなり低いため, 検出感度の低下は比較的緩やかに進行し, ν_d が ν_m に近づくにつれて急激に低下するようになる。また, ぼけの最適値が小さい (ν_m が大きい) 複雑な図形ほど劣化が著しい。これらの傾向は, ディスプレイ上の文字を目で観測したとき通常経験されることに一致しており, (15)式は目の感覚をよく表しているものと見ることができる。

4. 主観評価実験との比較

4.1 実験方法

以上の理論検討結果と, ディスプレイの解像度と文

字の読み易さとの関係に関する主観評価実験結果との比較を行った。

主観評価実験にあたって, 解像度を自由に変えられるディスプレイを用意することは実際には困難である。そこで, 一定の解像度のディスプレイに縮小変換回路によって様々な倍率で変換した図形を表示し, 倍率に応じて視距離を変え, 網膜上の文字が一定のサイズになるようにして評価する方法を採った。すなわちディスプレイに表示する際の倍率を μ としたとき, 視距離を変化させてサイズが $1/\mu$ 倍になるようにすれば, 網膜に写る文字の像はサイズが元のサイズでぼけ τ_d が $1/\mu^2$ 倍の像になる。

ディスプレイに表示される図形は, 実際には走査線密度と同じドット密度で標本化したドットパターンであり, 解像度の上限はドット密度で規定される。そこで, ここでは便宜上文字幅あたり解像本数の近似値として文字幅あたりドット密度で解像度を表すことにした。この場合, 標本化による折り返し雑音を抑制するために, 縮小変換出力を帯域制限してぼけを与える必要がある。ただディスプレイ面で更にぼけが加わるので, あまり大きなぼけを与えると, 実際の解像度がドット密度より低くなりすぎる。それらの点を考慮して縮小変換回路では走査線密度を N_d としたとき, その周波数のパターンの応答が $e^{1/2}$ となるぼけの値の $1/2$

$$\tau_{dN} = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\pi N_d} \right)^2 \quad (16)$$

を与えるようにした。

実験に用いた原画は, 10.5ポイントの5~6画の漢字を並べたパターン, 7~9画の漢字を並べたパターンの2種類 of 原稿を8本/mmの走査線密度(約30ドット/文字)で走査した2値パターンとした。それらのパターンを様々な倍率で縮小した図形を2レベル, 4レベル, 8レベルに量子化し, 12インチの一般的なモノクロCRTモニタに映した。そして文字の大きさが倍率に関係なく視覚にして 0.44° になるように視距離を調節して評価するようにした。

評価実験は被験者成人男子5名で行った。量子化レベル数2, 4, 8の画面それぞれについて縮小倍率1(30ドット/文字), $1/1.5$ (20ドット/文字), $1/2$ (15ドット/文字), $1/2.5$ (12ドット/文字), $1/3$ (10ドット/文字)の順に表示し, 読み易さを5段階評価させた。

4.2 表示文字の読み易さと検出感度

5~6画文字, 7~9画文字についての5名の被験者の平均評点を図4, 図5に示す。図に示されているように, 2値パターンではドット密度の減少と共に画質

図 4 ドット密度による文字の読み易さの変化 (5~6 画)
Dot density vs. legibility of character (5~6 strokes).

図 5 ドット密度による文字の読み易さの変化 (7~9 画)
Dot density vs. legibility of character (7~9 strokes).

が急速に劣化するが、量子化レベル数を増すに従って劣化は緩やかになる。すなわち文字の読み易さに関しては、ぼけの影響は比較的少ないが、量子化誤差は大きく影響する。また、5~6 画文字と 7~9 画文字とを比べると、量子化レベル数に関わらず画数の多い複雑な文字の方が画質劣化が大きい。特に 2 値パターンでは劣化の程度が大きい。したがって、ディスプレイの解像度が限られている場合、特に複雑な形の文字が多い漢字を表示するには、量子化レベル数を増やしてぼけた図形にすることが効果的である。写真 1 は画像電子学会ファクシミリテストチャート、写真 2 は新聞の画面を 8 本/mm のドット密度で走査し、入力した画面の一部を 1/4.5 に縮小変換し、4 ビット 16 レベル(a)、1 ビット 2 レベル(b)に量子化して表示した像である。いずれも低解像度表示においては、量子化

(a) 4 ビット

(b) 1 ビット

写真 1 表示パターンの例 (漢字)
Sample of displayed pattern (Kanji).
(a) 4 bit gray levels, (b) Binary levels.

レベル数を増やすことによって文字がかなり読み易くなることを示している。

以上の主観評価結果と前章で求めた文字パターンの検出感度の低下との比較を図 6、図 7 に示す。図 6 は「右」「庄」「本」等の検出感度と 5~6 画の文字の読み易さの主観評価結果との比較であり、図 7 は「殊」「供」「岸」等の検出感度と 7~9 画の主観評価結果の比較である。ただし、検出感度は文字あたりドット数 30 における値を基準にして、その値からの劣化を示した。また、読み易さの評価値は 1 評価段階の差を 0.4 dB に換算した。これらの図からわかるように、

(a) 4ビット

(b) 1ビット

写真 2 表示パターンの例 (新聞)

Sample of displayed pattern (News paper).

(a) 4 bit gray levels, (b) Binary levels.

量子化レベル数が多い場合、読み易さの主題評価値は検出感度にかなりよく一致する。また、文字の複雑さに応じて劣化の曲線が異なることも一致する。

以上のことから、表示装置の解像度による文字の読み易さの低下は、それぞれの図形の検出感度の変化によく対応していることがわかった。したがって、検出感度は文字の読み易さを決める重要な要素であると思われることができる。

図 6 文字の読み易さと検出感度の比較 (単純パターン)
Comparison of legibility and detectability of character (simple pattern).

図 7 文字の読み易さと検出感度の比較 (複雑パターン)
Comparison of legibility and detectability of character (complex pattern).

5. む す び

図形パターンの検出感度を用いたディスプレイ表示文字の読み易さの評価を試み、有効性を検証した。

まず、検出感度と対象図形のぼけの関係を理論的に検討した。その結果、ディスプレイの解像度による検出感度の低下は、ディスプレイによるぼけと、その図形の検出感度が最大になるように観測機構側で与えられるぼけの最適値との比によって定まることが明らかになった。

代表的な漢字パターンについて、そのぼけの最適値を求めた結果、ぼけの最適値は複雑な文字ほど小さく

なるが、かなり複雑な文字でも文字あたり解像度にして10以下の比較的大きなぼけであることがわかった。したがって、ディスプレイの解像度による検出感度の低下は、全般に比較的緩やかであるが、複雑な文字ほど急速に低下することになる。この検討結果と表示文字の読み易さの主観評価実験の結果を比較した結果、ディスプレイの解像度による検出感度の変化は、文字の読み易さの変化にほぼ一致することがわかった。

また以上の結果は、図形パターンのぼけは図形認識の障害になりにくいことを示している。その性質を利用して同じドット数で文字を表示するとき、従来の2値パターン表示の代りに量子化レベル数を多くしてぼけた多値パターンとして表示する方法をとれば読み易くなることが、理論的にも実験的にも確かめられた。

図形パターンの検出感度については、これまで目の空間周波数特性や焦点調節誤差を理論的に説明できる測度であること、鮮鋭度に近い性質を持っていることを明らかにしてきた。以上の検討から、表示文字の読み易さの評価にも応用できることがわかったので、広く画像一般の評価に利用できる可能性がある。ただ、検出感度そのものは視野の限られた領域について求められる値であり、画像全体の評価に適用するために画面全体と部分画像の関係をどう評価するかが今後の課題である。

[参 考 文 献]

- 1) 鯨沢, 井上: “CRT ディスプレイ上のドット文字表示におけ

るドットマトリクス次数と文字品質の関係”, テレビ誌, 38, 3, pp. 237-244 (1984)

- 2) J. E. Warnock: “The Display of Characters Using Gray Level Sampling Arrays”, Computer Graphics, 14, 3, pp. 302-307 (1980)
- 3) 嶋田, 柚山, 小林: “走査線密度と文字品質の検討”, 画電学誌, 7, 4, pp. 255-263 (1978)
- 4) 神山, 井沢, 岡村: “二値画像の多値縮小表示”, 1981 年テレビ全大 16-1
- 5) 神山, 井沢, 米山: “文書画像の多値縮小表示における表示レベル数の効果”, 昭 59 信学総全大, 1296
- 6) 飯島泰蔵: “パターン認識”, コロナ社 (1973)
- 7) 米山恒雄: “撮像過程の雑音による図形の弁別限界と最適解像度”, 信学論 (D 2), J 77-D-2, 10, pp. 2011-2018 (1994)
- 9) 米山恒雄: “散弾雑音制限下での図形パターンの検出感度”, テレビ誌, 49, 5, pp. 665-672 (1995)

よねやま つねお
米山 恒雄 1962 年, 東北大学工学部電子工学科卒業。同年, (株)東芝に入社。画像入出力装置, 文字・図形認識応用システム, 画像ファイル装置等の研究開発に従事。1994 年より城西国際大学に勤務。正会員。

かみやま ただのぶ
神山 忠信 1978 年, 東京工業大学大学院修士課程修了。同年, (株)東芝に入社。以来, オフィス文書処理システムの研究開発に従事。現在, 同社マルチメディア技術研究所に勤務。正会員。

いざわ こうじ
井沢 孝次 1973 年, 京都大学大学院修士課程修了。同年, (株)東芝に入社。以来, 画像処理, オフィス文書処理システムの研究開発に従事。現在, 同社マルチメディア技術研究所に勤務。正会員。