

ハ - フト - ンカラ - 画像のノイズ評価法

Noise Evaluation Method for Halftone Color Image

今河 進* 日野 真* 鎰谷 賢治*

Susumu IMAKAWA Makoto HINO Kenji KAGITANI

要 旨

ハ - ドコピ - 画像におけるノイズ(粒状)は画像品質,特にカラ - ハ - フト - ン画像品質を決定する重要な因子であると言われている。モノクロ画像のノイズ評価には,濃度変動のフ - リエ変換として得られるノイズウィ - ナ - スペクトラムを用いる方法など多くの方法が提案されている。しかし,それらの方法をそのままカラ - 画像の評価へ適用することは難しい。明度変動と色度変動の空間周波数成分に視覚の空間周波数特性による補正と平均明度に応じた補正を加えることで主観評価と高い相関の得られる評価法を開発した。本評価法における評価値と主観評価値との相関係数は0.95と非常に高いものであった。

ABSTRACT

The image noise(graininess) is one of the important factors for the image quality, especially for the color halftone image. A great many of evaluation method for monochrome image noise, such as Noise Wiener Spectrum obtained by Fourier transform of density fluctuations, has been already used generally. These methods, however, cannot apply to the noise evaluation of color halftone image directly. A new method for noise evaluation of color halftone image is developed using the frequency domain analysis for the fluctuations of colorimetric value. Estimation of the subjective evaluated value of noise on the halftone color image is performed using the human visual transfer function(VTF) and the mean metric lightness. The correlation between the subjective evaluated values and this estimated values shows good agreement as 0.95.

1. 背景と目的

一般に,カラ - 画像の画質を決定する要因は,1)鮮鋭性,2)ノイズ特性,3)階調性,4)色再現性と言われている。

電子写真方式の出力装置は,銀塩方式の出力装置やオフセット印刷に比べ,特にノイズ特性の面で劣っていると言われる。これは,電子写真画像を形成するトナ - 粒子が銀塩方式における銀粒子やオフセット印刷におけるインク粒子よりもはるかに大きいことや,静電転写等

によるドット形状の乱れの大きさに起因しているためと考えられる。近年では,作像プロセスや中間調処理法の改良により,このようなノイズはかなり低減はされた。しかし,現在でもノイズの低減は電子写真方式の出力装置における画質上の大きな技術課題である。

トナ - 粒子の飛散による局在やドット形状の乱れは,空間的にはランダムな場合が多く,これを肉眼で見るとざらついた印象を与える。このようなノイズは粒状と呼ばれ,粒状の主観的な評価値は粒状性(graininess),客観的な評価値は粒状度(granularity)と定義されている。

銀塩写真の粒状度測定には,一般に濃度分布 D_i の標準偏差であるRMS粒状度 σ_D が用いられ,その測定条件は,ANSI PH-2.40-1985「root mean square (rms) granularity of film」に規定されている。

* 研究開発本部 中央研究所
Research and Development Center,
Research and Development Group

$$\delta_D = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_i - \bar{D})^2} \quad \dots(1)$$

ここで \bar{D} は平均濃度である。

Selwynは面積 A の走査アパ - チャ内の銀粒子が十分多い場合には $\delta_D \cdot A^{1/2} =$ 一定であることを見出し、Selwyn粒状度(G)¹⁾を提案した。

$$G = \sqrt{2A} \cdot \delta_D \quad \dots(2)$$

また、画像の鮮鋭性の評価に空間周波数の関数であるMTFが導入されたのと同様に、濃度変動のパワ - スペクトラムであるウィナ - スペクトラム(Wiener Spectrum)を用いた粒状度の測定も提案されている。XeroxのDooleyとShaw²⁾は、電子写真画像の粒状性測定にウィナ - スペクトラムを適用し、視覚の空間周波数特性(Visual Transfer Function:VTF)とカスケ - ドした後、積分した値を粒状性(GS)とした。

$$GS = \exp(1.8\bar{D}) \int \sqrt{WS(u)} \cdot VTF(u) du \dots(3)$$

ここで u は空間周波数、 $WS(u)$ はウィナ - スペクトラム、 $VTF(u)$ は視覚の空間周波数特性である。 $\exp(-1.8)\bar{D}$ の項は濃度と人の知覚する明るさの差を補正するための、平均濃度 \bar{D} を変数とした関数である。

また、Dooleyらの粒状性測定法をベ - スにデジタル画像の粒状性測定へのウィナ - スペクトラムの適用例も報告されている。スクリーン角のある網点画像にも対応するよう2次元でのウィナ - スペクトラムを一次元化する広瀬らの報告³⁾、キャリア周波数である網点周波数成分をフィルタリングによりウィナ - スペクトラムから除去するBoukらの報告⁴⁾などがある。

しかし、カラ - ハ - ドコピー - 画像のノイズ特性、粒状度測定に関する報告は、広瀬の画像ノイズ知覚特性に関する報告⁵⁾、青山らのカラ - 画像のノイズ評価法に関する報告⁶⁾がある程度で非常に少ない。

本論文で述べるカラ - 粒状度の評価法は、ウィナ - スペクトラムとVTFを用いたDooleyらの評価式(3)を基本とし、カラ - 画像への応用展開を図ったものである。

2. 評価サンプル画像の作成

2-1 サンプル画像

今回の評価法開発に使用した画像サンプルの仕様および出力条件をTable1に示す。

Table 1 Specification of Samples

Printing Method	Laser Dye Sublimation Transfer
Resolution	1800dpi
Area Coverage	10%,20%,40%,60%,80%*
Color of Samples	Cyan,Magenta,Green,Black,Process-Black
Sample Size	18X18mm
Color of Noise Componets	Cyan noise on Cyan and Process-Black samples Magenta noise on Magenta and Process-Black samples Green noise on Green and Process-Black samples Black noise on Black samples
Noise Level	0,3,6,9,12,15,18,21,24,27(Standard Deviation)
Screen Shape	Round dot,170lpi
Screen Angle	0 degree

*Black Sample only

2-1-1 ノイズの付加

ノイズの付加は、4色分解した各色8bitデータに対し空間的にランダムで、ノイズレベルの分布がガウス分布を有するノイズを与えた。この画像データを網点展開することにより、出力画像におけるノイズは網点面積率の変動(ドットサイズの変動)となる。ノイズの量は8bitの画像データに対して標準偏差で0~27まで3おきに作成した。以下、ノイズ量の異なる各サンプルをN0~N27と記す。

2-1-2 出力パッチ色

出力パッチ色としてCyan、Magenta、単色Black、Green、CMY-Black(プロセスブラック)を選んだ理由は以下の通りである。

(1)Cyan、Magenta、単色Black、Green

電子写真のノイズ(粒状)は空間的にランダムであり、色重ねによる平均化がおこなわれない11次色が最も粒状が目立ちやすいためである。ただし、Yellowはノイズを加えても知覚できず、心理評価ができないので採用せず、Greenを用いた。

(2)CMY-Black

人間の色の知覚が無彩色軸付近で敏感であるため、他の色と異なった特性を示すことが考えられるため用いた。

3. 心理評価実験

各サンプルの心理評価値の導出は、2つの心理評価実験によりおこなった。両評価とも画像処理に携わる被験者5名により2回の試行をおこなった。観察距離は350mm、光源はD50を用い、サンプル面の照度は900luxとした。

3-1 心理評価実験1

評価対象とするサンプルは単色Blackの面積率10%のパッチである。評価の概念図をFig.1に示す。評価用サンプルのうち基準となるN0とN18を一定距離、離して配置する。パネルは他のサンプルN3~N15を感じた粒状性に応じた位置(基準サンプルからの距離)に置く。このときの基準サンプルN0のからの距離を正規化した値を心理評価値(粒状性)とする。

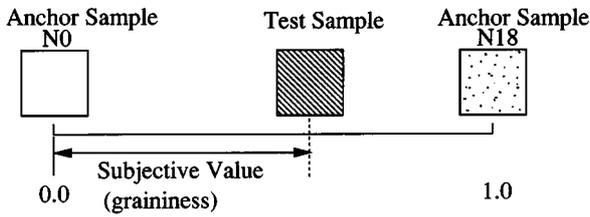


Fig.1 Experiment1

3-2 心理評価実験2

評価対象とするサンプルは心理評価1に使用したサンプル以外のものである。評価実験の概念図をFig.2に示す。心理評価実験1で値付けられた単色Blackの面積率10%のN3~N15のサンプルの1枚を基準サンプルとし、評価対象のうち同一色、同一面積率でノイズ付加量の異なる10枚のサンプル群と比較させ、同じ粒状性と感じるサンプルナンバ0~9を選択させる。これをN0~N18のサンプルに対し、繰り返しおこなった。この際、評価サンプルの中間であると判断される場合は、4.6といった値を選択することも許した。

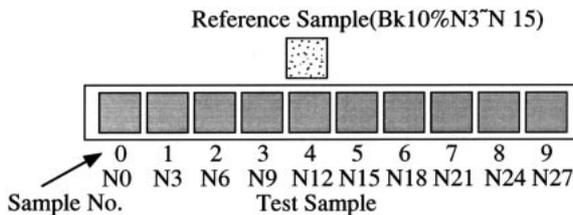


Fig.2 Experiment2

3-3 粒状性の算出

心理評価実験1より求めた単色Blackの面積率10%サンプルの粒状性と、心理評価実験2におけるサンプルナンバより単色Blackの面積率10%以外のサンプルの粒状性を2次多項式で回帰し、算出した。このような方法で全290サンプルのうち、単色Blackの面積率10%のN0からN18の粒状性の範囲内にある156サンプルの粒状性を算出した。

4. 物理評価方法

4-1 カラ - 粒状度評価式

粒状性を定量化したカラ - 粒状度(CG)は、以下の式で表される。

$$CG = h(\bar{B}) \cdot p_b \int \sqrt{WS_b(u)} \cdot VTF_b(u) du + p_{c1} \int \sqrt{WS_{c1}(u)} \cdot VTF_{c1}(u) du + p_{c2} \int \sqrt{WS_{c2}(u)} \cdot VTF_{c2}(u) du \quad (4)$$

この式はDooleyらの評価式(3)を色度成分にも適用し、明度成分との線形和をとったものである。

ここで、 $WS_b(u)$ 、 $WS_{c1}(u)$ 、 $WS_{c2}(u)$ は明度成分および色度成分のウィナ - スペクトラム、 $VTF_b(u)$ 、 $VTF_{c1}(u)$ 、 $VTF_{c2}(u)$ は明度成分および色度成分に対する視覚的空間周波数特性(VTF)である。 $h(\bar{B})$ は平均明度 \bar{B} を変数とする関数であり、Dooleyらの評価式における平均濃度に対する補正関数と同様に平均明度が異なる場合でも(4)式が成り立つよう補正するための関数である。また、 p_b 、 p_{c1} 、 p_{c2} は各成分(明度と2つの色度)の粒状性への寄与を表す重み、 C は定数である。

4-2 粒状度の算出

物理評価のプロ - をFig.3に示す。カラ - 画像を高速に入力できるようドラムスキャナを用いている点と、ドラムスキャナの出力信号RGBから明度成分と色度成分を求めるための色変換処理をおこなう点がモノクロの場合と異なる。その手順を以下に記す。

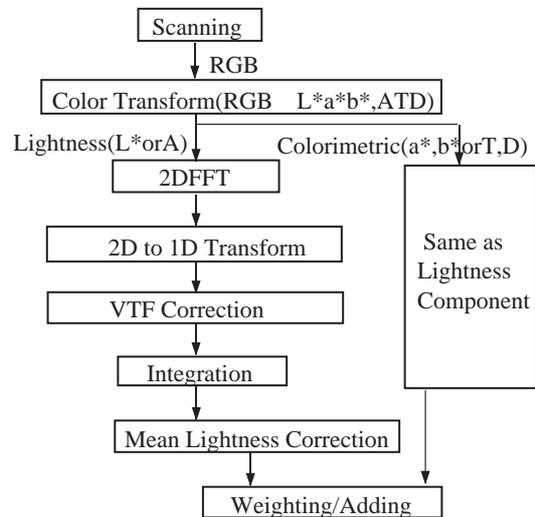


Fig.3 Block diagram of physical evaluation

4-2-1 画像入力

ドラムスキャナによる入力条件をTable2に示す。

Table 2 Input Condition

Input Device	Color Drum Scanner
Resolution	1000dpi
Output Signals	R,G,B
Signal Depth	24bit(8bit per signal)
Sampling Area	256X256 pixels(6.5X6.5mm)
Density Range	<1.8D

4-2-2 色変換

ドラムスキャナより出力された測定点のRGB信号は、明度成分、色度成分に変換される。今回は2種の表色系のL*a*b*表色系とATD表色系に変換した。

ATD表色系^{7), 8)}はGuthが視覚モデルをベ - スとして提案したもので、Aは明度成分、Tは赤 - 緑(r-g)、Dは黄 - 青(y-b)方向の反対色(色度)成分である。ATD表色系を選択した理由は偏差楕円がMacAdamの楕円と非常に近似している点と、視覚モデルをベ - スとして提案された表色系であるため、粒状度算出の際の視覚のMTF補正に用いる反対色応答の視覚の空間周波数特性がそのまま使用できという利点を持つためである。

各表色系への変換には、評価サンプルと同一の出力機で出力した10%ステップのY, M, C, K, R, G, Bのパッチの測色データと、スキャナ - 出力のRGB信号の関係から回帰した変換式を用いた。RGBからL*a*b*への変換は、2次の変換式により直接変換した。RGBからATDへの変換は2次の変換式によりXYZ表色系へ変換後、マトリクス演算により錐状体の応答R, G, B、さらに、明るさ応答Aと反対色応答T, Dに変換した。XYZからATDへの変換についての具体的な説明は、ここでは省略する。

4-2-3 ウィナ - スペクトラムの計算

色変換式で明度成分(L*またはA)と色度成分(a*, b*またはT, D)に変換された各測定点のデータを2次元フーリエ変換(FFT)にすることにより、明度成分と色度成分ウィナ - スペクトラムを求める。2次元 - 1次元変換は以後の計算の簡略化のためおこなわれる。これは視覚の空間周波数特性が方向によって大きくは異なることを前提としている。この変換は広瀬らが報告したアルゴリズム⁹⁾と同様なのでここでの説明は省略する。

4-2-4 視覚の空間周波数特性(VTF: Visual Transfer Function)

画像の物理評価において物理評価値と心理評価値の相関を向上させるために、視覚特性を考慮した重みを物理評価値に加えることがよくおこなわれる。本評価法においても、明度、色度成分の変動の振幅(ウィナ - スペクトラムの平方根)に対し、視覚の空間周波数特性(以下VTFと記す)を乗ずることで明度、色度変動の周波数に応じた重み付けをおこなった。

VTFに関しては多くの報告があるが、今回はDooleyらの用いた明度変動のVTF1と、坂田ら⁹⁾の報告した明度成分と反対色(赤-緑成分, yellow-blue)別のVTF2の2種類のVTFカーブを用いた。DooleyらのVTF(VTF1)を使用する場合には、色度成分に対しても同一のVTFを使用した観察距離を350mmとした場合の各VTFカーブをFig.4に示す。

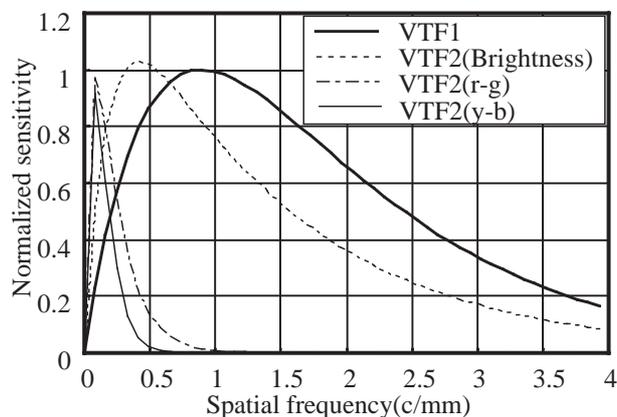


Fig.4 Visual transfer function

4-2-5 カラ - 粒状度算出

VTFにより空間周波数に応じ重み付けされた明度成分と色度成分の変動をそれぞれ積分し、明度成分と色度成分の粒状度を求めた後、明度成分の粒状度に平均明度を変数とする関数を乗じ、色度成分との線形和をとり、カラ - 粒状度を算出する。

5. 解析

解析は心理評価値と相関の高い物理評価値が得られるよう、カラ - 粒状度の式(4)の中のTable3に示すパラメータを決定することである。

Table 3 Parameters

Color Space	L*a*b*, ATD
VTF Curve	VTF1(Dooley), VTF(Sakata)
Function for Mean Lightness	
Correction	h(B)
Weight	P_B, P_{C1}, P_{C2}
Constant	C

解析の手順を以下に記す。

(1) ノイズによる粒状がほとんど明度成分である単色Blackの心理・物理評価値により、平均明度(明度)に対する補正関数を導出する。

(2) 次に全サンプル評価結果に対する重回帰分析により、表色系VTFの選定、明度・色度粒状度に対する重みを決定する。

5-1 平均明度(明度)に対する補正関数の導出

カラ - 粒状度の式(4)において、単色Blackの場合、色度の変動はほとんど無く、第1項の重みを除いた部分のみを考える。平均明度に対する補正の関数h(B)としては、単調減少の関数が適していることが以前のモノクロ画像の粒状性評価法の研究¹⁰⁾において確認されており、今回は指数関数のモデル(5)式を選択し、(4)式と単色black

の心理評価による粒状性の評価値とのNonlinear Fittingにより、パラメ - タ t_1, t_2 を決定した。

$$h(\bar{B}) = \exp(t_1 \cdot \bar{B} + t_2) \quad (5)$$

Nonlinear Fittingにより求めたパラメ - タ t_1, t_2 をTable4に、そのパラメ - タを用いたときの粒状度と心理評価値との相関の例をFig.5(a) ~ (b)に示す。心理評価値との相関は表色系、VTFカ - プによらず高く、相関係数は0.97 ~ 0.98であった。

Table 4 Estimated Parameter for Lightness Correction

Color Space	VTF	t1	t2	Correlation Coefficient
L*a*b*	VTF1	0.0104	0.8978	0.98
	VTF2	0.0098	1.1728	0.975
ATD	VTF1	-0.0074	1.7564	0.972
	VTF2	-0.0082	2.0184	0.965

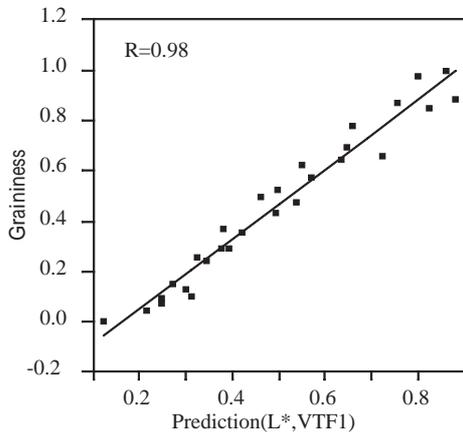


Fig.5(a) Prediction of lightness graininess (L*,VTF1)

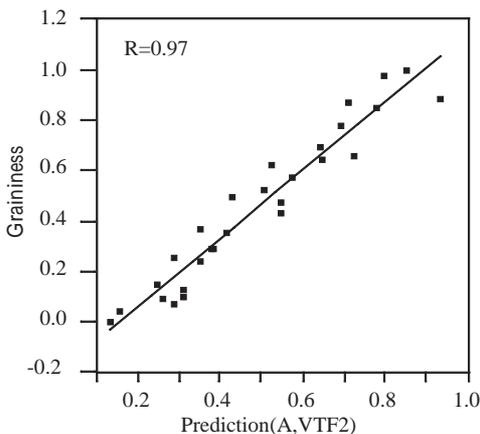


Fig.5(b) Prediction of lightness graininess (A,VTF2)

今回、求めた平均明度に対する補正関数(L*a*b*表色系、VTF1の場合)とDooleyとShawの平均濃度に対する補正関数関数を明度に変換し、平均明度に対してプロットしたグラフをFig.6に示す。平均明度に対する補正関

数は、Dooleyらの平均濃度に対する補正関数とほぼ一致していることがわかる。

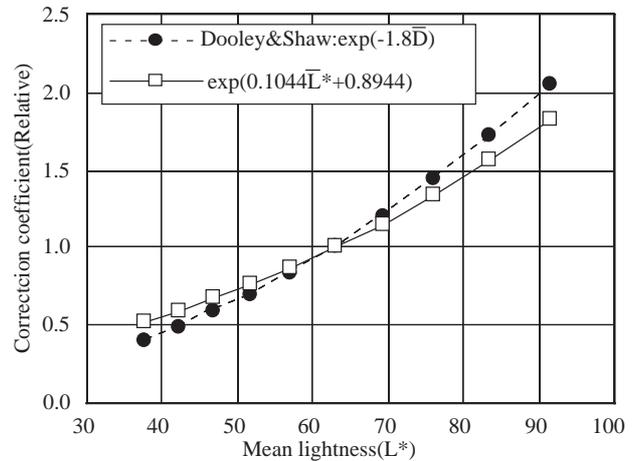


Fig.6 Mean lightness correction

5.2 各成分粒状度に対する重みの導出

前節で求められた平均明度の補正パラメ - タを代入した明度粒状度と2つの色度成分の粒状度((4)式の第2, 3項)を説明変数として、全サンプルの心理評価値に対して重回帰分析することにより、明度、色度に対する重み p_B, p_{C1}, p_{C2} を求めた。

重回帰分析により求めた明度、色度に対する重み係数、相関係数をTable5に示す。心理評価値とカラ - 粒状度の相関は、0.92 ~ 0.95と非常によい。表色系、VTFカ - プの違いによる差はあまりないが、L*a*b*表色系とVTF1を用いた場合が最も相関が高かった。このときのカラ - 粒状度と心理評価値との相関をFig.7に示す。

Table 5 Estimated Parameter

Color Space	VTF	$h(B) \cdot p_B$	p_{C1}	p_{C2}	Correlation Coefficient
L*a*b*	VTF1	1.4052	1.1456	0.548	0.953
	VTF2	1.47	6.3366	3.5245	0.932
ATD	VTF1	1.3752	2.2507	19.3228	0.934
	VTF2	1.4475	12.079*		0.923

*Not significant

Fig.8はL*, a*, b*各成分の粒状度に対する最終的な重み係数(平均明度補正項を含む)を平均明度に対してプロットしたグラフである。L*成分に対する重みはa*成分、b*成分に対する重みの4 ~ 8倍、8 ~ 16倍と大きく、カラ - 画像の粒状性においては明度変動が支配的であることがわかる。また、Fig.9はL*成分のみから全サンプルの心理評価値を予測したものであり、相関係数は0.91であった。

ATD表色系において明度、色度別のVTF2を用いた場合はD成分の心理評価値への影響は統計上有意ではなく、A成分、T成分のみでカラ - 粒状性が説明できた。

6.ハ - ドコピ - 評価例

今回、開発した粒状性評価法によるハ - ドコピ - 画像の実際の評価例を示す。評価式は表色系として $L^*a^*b^*$ 、VTFはDooleyらの明度に対するVTFを用いた場合である。

Fig.10は銀塩プリンタ、オフセット印刷、インクジェットプリンタ(720dpi)および電子写真方式のカラー - 複写機(200lpi, 400lpi)におけるグレ - パッチの粒状度を評価したものである。インクジェットプリンタは2値記録ではあるが、グレ - をCMYで記録することにより、多値記録である電子写真と同等の粒状度を達成している点や電子写真方式では200線の万線スクリーンを用いることでハイライト部の粒状度が改善されていることがわかる。

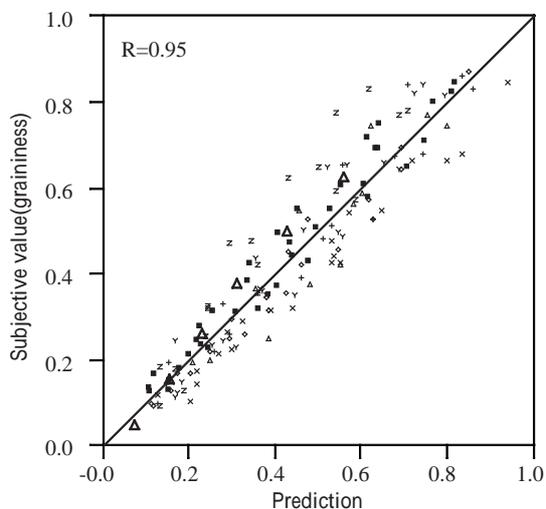


Fig.7 prediction of color graininess ($L^*a^*b^*$,VTF1)

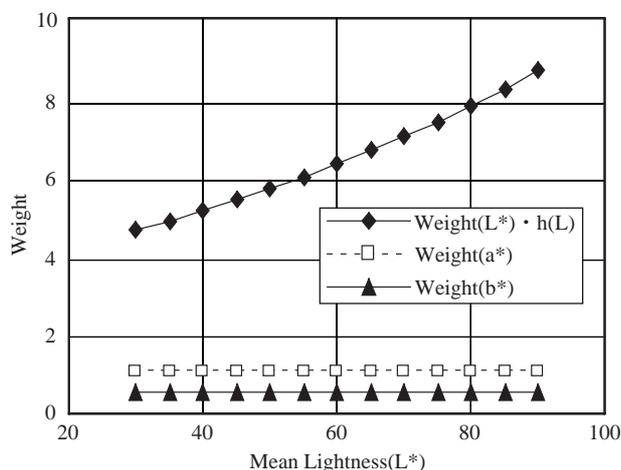


Fig.8 Value of weight functions in the case of using VTF1

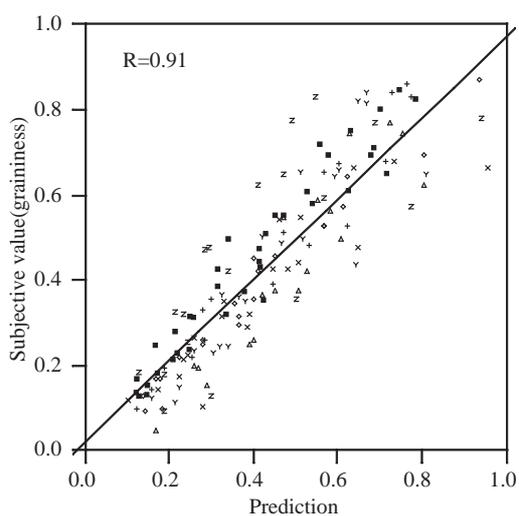


Fig.9 Prediction of magnitude of graininess using metric lightness component only

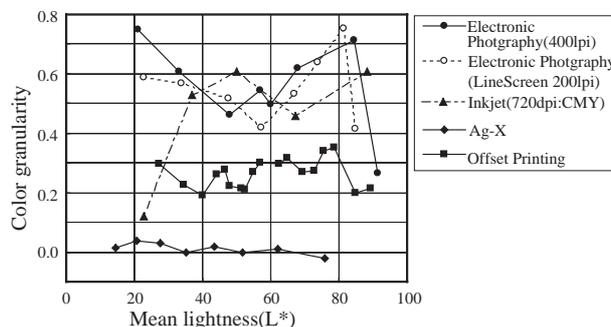


Fig.10 Color granularity vs. Mean lightness

また、Fig.11は電子写真、インクジェット、昇華型熱転写、銀塩方式の各種プリンタ17機種により、同一画像を出力し、画像内の4箇所(SKY:淡い空色, MOUNT:無彩色にちかい山陰, BLUE:濃い空色, GREEN:Greenベタ)の粒状度を測定した例である。GREEN以外は自然画像のため、画像データ自体のノイズも含んでいるが、各方式による粒状度の差は顕著である。

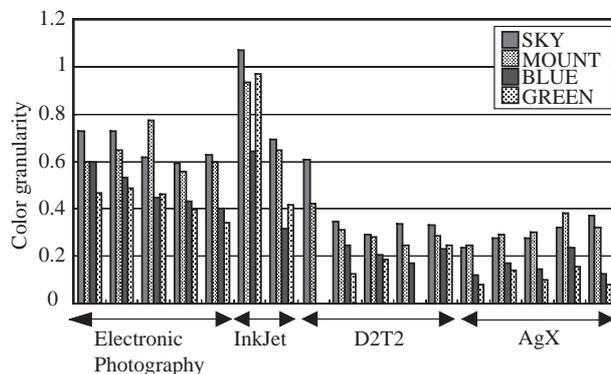


Fig.11 Color granularities of various printer

7. 結論

(1)モノクロ画像の粒状性評価に用いる明度成分のノイズに加え、色度成分のノイズも考慮し、かつ、平均明度による補正項を加えることでカラ - 画像の粒状性を精度良く予測する事が可能になった。心理評価値と最も相関の高かったのは、 $L^*a^*b^*$ 表色系と明度、色度成分に共通のVTFを用いた場合で、心理評価値との相関係数は0.95であった。

(2)明度のVTFに加え、反対色応答のVTFを用いた評価式は、明度、色度成分に共通のVTFを用いた評価式と比較して優位差は見られなかった。

(3)カラ - 画像における粒状性に対しては、明度変動が支配的であり、簡易的には明度の測定だけでもカラ - 画像の粒状性を評価することが可能であろう。

8. 今後の展開

筆者らが提案した画像の粒状性(ノイズ)評価法について説明してきた。しかしながら、従来の評価法と同様にこの評価法にもまだ問題点は多く、その内容を以下に記す。

(1)測定器の問題

一般に、画像ノイズの評価には、入力装置としてマイクロデンシトメータを用いることが多いが、カラ - 画像(フィルタ交換をおこない13回走査)の2次元の入力には非常に長時間を有する。ドラムスキャナ、カラ - CCDは高速入力が可能であるが、通常、RGB各8bitの出力信号であり、精度的な不安がある。特に、カラ - CCDは暗電流によりS/Nが悪い。ドラムスキャナは受光素子としてフォトマルを使用し、一般に、8bit出力であるが、内部では10~12bitの処理をおこなっているためカラ - CCDよりはS/N的に有利であろう。

また、どの入力装置においても、照明の形態によりフレア、光沢ムラ、照明ムラなどの測定上の劣化要因を有する。

(2)VTFの問題

現在、報告されているVTF(とくに反対色応答のVTF)は、CRT上に表示された画像を評価することにより求められたものがほとんどで、ハ - ドコピ - 画像へ適用した場合、適合性が悪いことは広瀬⁵⁾も報告している。今回の筆者らの実験でも、反対色応答のVTFを用いた評価式は、明度、色度成分に共通のVTFを用いた評価式よりも心理評価との相関が悪いことやy-b方向のノイズが心理評価値に寄与していないといった結果が見られた。

(3)デジタル画像への適用性

VTFにより網点周波数成分が抑圧されるような高線

数の網点画像では問題ないが、100線以下の低線数の網点では、今回のような評価法では心理評価との相関が低いという報⁴⁾があり、筆者らも同様の経験をしている。また、網点のように周期的ではないが、ランダムノイズとも言えない誤差拡散のテクスチャ(Worm Noise)画像における心理評価との相関の低さも経験的に感じられる。

(4)自然画像との対応

同一の粒状度であっても、対象画像によって知覚される粒状性は異なり、人の肌と空、壁などでは受ける印象は全く異なる。

これらの問題点は筆者らの評価法に限らず、他の粒状(ノイズ)性評価法にも内在するものである。心理評価に頼っていた画像ノイズを物理的に定量化することは、各種出力機の画質向上に大きく寄与するものであり、今後のさらなる研究が期待される。

参考文献

- 1) E.W.H.Selwyn: Phot.J., 79 (1939), pp.513.
- 2) R.P.Dooley, R.Shaw: Noise Perception in Electrophotography, J.Appl.Photogr.Eng., 5, 4 (1979), pp.190-196.
- 3) Y.Hirose, T.Inagaki et.al.: Image Noise Evaluation Method for Xerographic Prints of Digitized Image, Japan Hardcopy '88, (1988), pp.189-192.
- 4) T.Bouk, N.Burningham: Measurement of Graininess for Halftone Electrophotography, IS&T's 8th International Congress on Advanced in Non-Impact Printing Technologies, (1992), pp.506-509.
- 5) 広瀬: カラ - ハ - ドコピ - における画像ノイズ知覚特性, 富士ゼロックステクニカル レポ - ト, No.8, (1993), pp.21-28.
- 6) 青山, 榎本, 洪: 異種画像出力機器のノイズ評価方法, 日本写真学会誌, 57, 6 (1994), pp.392-398.
- 7) S.L.Guth, R.W.Massof, T.Benzschawel: Vector Model for normal and Dichromatic Color Vision, J.Opt.Soc.Am., 70, (1980), pp.197-212.
- 8) 太田: 色彩工学, 東京電機大学出版局, pp.192-198
- 9) H.Sakata, H.Isono: Chromatic Spatial Frequency Characteristics of Human Visual System, J.I.T.E of Japan, 31, 1 (1979), pp.29-35.
- 10) 日野, 鎰谷, 小嶋, 今河: 粒状性評価方法, Japan Hardcopy '95, (1995), pp.155-158.