

局所的濃度ムラの視認性と 原稿画像特徴量の相関モデルに関する考察

Consideration on a Correlation Model between Visibility of Local Density Unevenness and Input Image Characteristics

峯 岸 なつ子*
Natsuko MINEGISHI

内 川 恵 二**
Keiji UCHIKAWA

要旨

印刷画像に発生する濃度ムラの目立ち易さは、原稿画像の内容によって異なることが知られている。本研究では、局所的な濃度ムラの視認性と相関のある特徴量を、濃度ムラ自体の特徴量と、原稿画像の明度分布から得る手段を検討した。結果、濃度ムラを成す明度分布の短手方向のエッジ間距離が視角2度未満である場合に限り、ムラ視認性と画像特徴量の関係を示す相関モデルを提案できた。原稿画像の特徴量を抽出する際には離散フーリエ変換を用いている。しかし相関モデルの精度向上や、モデルの適用範囲を前記エッジ間距離が視角2度を超える場合へ拡張するためには、離散フーリエ変換とは異なる代替手段を検討すべきであることが示唆された。

Abstract

It is known that visibility of density unevenness on printed images is varied depending on contents of original images. In this study, methods to extract characteristics, which was correlated with visibility of local density unevenness, have been suggested. The characteristics were obtained on each unevenness itself and luminance distribution on each original image. As a result, a correlation model between visibility of density unevenness and image characteristics has been suggested, when the target was the unevenness with narrower width below 2 degrees of visual angle. Although discrete Fourier transform (DFT) has been used to extract the characteristics, some alternatives different from DFT can improve accuracy of the model or expand the model for the unevenness with wider width over 2 degrees of visual angle.

* コニカミノルタ株式会社 情報機器開発本部 EP画像技術開発センター 第1プロセス開発部
** 神奈川工科大学 ヒューマンメディア研究センター

1 はじめに

ある明度コントラストの濃度ムラが発生する印刷機で出力する時、その目立ち易さは原稿画像の内容に依存していることが経験的に知られている。本研究では、電子写真で特に問題になり易い局所的に発生するもので且つ、直線状あるいは直径2, 3mm程度の円形の濃度ムラを対象にした。特に直線状の濃度ムラに着目し、原稿画像の特徴量及び濃度ムラ自体の特徴量から、濃度ムラの視認性を予測する相関モデルの提案を目的とした。更に、ここで提案するモデルを、幅が異なる直線状濃度ムラや先述の円形濃度ムラに対しても適用できるように検討した。

2 仮説

観察者が濃度ムラの程度を評価する時、少なくとも一度は高解像度で詳細に観察すると予想される。人の視野のうち詳細に観察できるのは中心窩サイズに相当する視角2度の範囲であるから、濃度ムラ評価時の注目領域の基本サイズは視角2度の範囲であるべきと考えた。この範囲を超えるような幅の広い濃度ムラに対しては、観察者は無意識のうちに濃度ムラを成す明度分布の境界(エッジ)部分を視角2度毎に区切って詳細観察していると予想した。したがって、濃度ムラの形状によらず、濃度ムラのエッジ位置付近を中心とする視角2度の範囲が、ムラの目立ち易さを評価する際の注目領域として適切だと考えた。そしてこの注目領域における原稿画像の明度分布の空間周波数成分と、濃度ムラの視認性とに相関があると仮定した。

直線状濃度ムラの明度変化のエッジは基本的に、向かい合う2本が1対になって現れる。ここで、濃度ムラが直線状の場合は向かい合うエッジ間の距離を w 、円形の場合はエッジが成す円の直径を w とする。 w を視角で表した時に $w \geq 2$ 度であれば、各濃度ムラの視認性と相関がある空間周波数成分を得るための解析対象、すなわち注目領域は、その中心が当該濃度ムラのエッジ位置にあるべきと考えた。 $w < 2$ 度であれば、当該濃度ムラの両側のエッジが2本同時に観察されるため、解析対象となる注目領域は濃度ムラの中心位置に配置されるのが妥当と考えた。

次に、視角2度に相当する長さを λ とし、 λ 四方の正方形を注目領域として、その中心が濃度ムラのエッジあるいは中心に相当する位置にあるように配置した場合を考える。全面一様な階調に設定した上で濃度ムラが発生している画像では、前記注目領域に1つの濃度ムラの片側または両端のエッジがある場合の両方において、濃度ムラを成す明度分布に特有の空間周波数パワースペクトルは $1/\lambda$ で最大パワーを示すと予想される。一方過去の研究では、濃度ムラと類似する空間周波数成分が原稿画像に含まれている程、そのムラが目立たなくなる傾向が確認されている¹⁾。

以上を考慮して、濃度ムラの視認性と相関のある空間周波数成分の抽出条件は次のようにすれば良いと仮定した。

濃度ムラが無い原稿画像データ上において、DFTの対象にする注目領域の中心を、印刷後に濃度ムラが出現する位置を基準に配置する。特に、濃度ムラを成す明度分布のエッジ間距離(w)が $w \geq 2$ 度の時は、注目領域を濃度ムラのエッジ位置に配置し、 $w < 2$ 度の時は濃度ムラのピーク位置に配置する。注目領域サイズを λ (視角2度)四方の正方形として、この注目画像領域でDFTによりパワースペクトルを得る。そのうち、濃度ムラによる明度変化のエッジに垂直な一方のみの空間周波数を表すパワースペクトルを抽出する。抽出したスペクトルにおいて、周波数 $1/\lambda$ 付近でパワーを積分したものを、本研究で定義する原稿画像の特徴量とする。

この特徴量が、濃度ムラの視認性に影響を及ぼすと考えた。円形濃度ムラの場合は全方向の周波数成分が視認性に影響を及ぼす可能性が高いが、ムラの形状によらず同一の条件で視認性に影響を及ぼす因子を抽出可能か検証するために、円形であっても一方のパワースペクトルから特徴量を算出することにした。

3 実験方法

フルカラーの自然画像データ上に意図的に濃度ムラを描いて印刷した画像を呈示し、被験者に濃度ムラの視認性を評価してもらう心理物理実験を行った。その後、原稿画像特徴量や、濃度ムラを成す明度分布の特徴量と、視認性評価結果との相関モデルを仮定した。最後に、仮定したモデルの確からしさを、モデルの仮定に使わなかったデータを用いて検証した。モデル仮定に用いるデータの採取実験を実験1、検証データの採取実験を実験2として説明する。

3.1 実験1：モデル仮定用実験

3.1.1 実験装置

ライトブース内(アイカラービューワ:アイグラフィックス社製、平均相対色温度4930K)でテスト画像を呈示した。テスト画像サイズは $300 \times 300 \text{ mm}^2$ で、周辺が $L^* = 50$ (CIE1976)の様なグレーの枠で囲まれた印刷物であり、枠を含めた全体サイズは $425 \times 410 \text{ mm}^2$ であった。印刷にはインクジェットプリンターPX-H10000(セイコーエプソン社製)を用いた。被験者の疲労軽減のため、テスト画像はブース内で85度の角度で立てて呈示し、座った状態で観察できるようにした。被験者はテスト画像からの距離が850mmの位置に設置された紐を頸台として頭部を略固定された。また、光沢が視野に入らない位置から観察した。

3.1.2 呈示刺激

任意に撮影した自然画像から、Olivaらが提案したOpennessという指標²⁾に対して偏りが生じないように

抽出したものをテスト画像に適用した。モチーフは風景、建造物、動植物、人物、飲食物、その他の物品であり、人物の顔や文字は極力避けた。

このように選んだ自然画像データに、濃度ムラを想定した明度変化を意図的に加えた。濃度ムラは水平方向に伸びる直線状で且つ、色度に変化せず明度のみが変化するものに限定した。また、一つのテスト画像に1か所（1本）のみ含まれるようにした。最終的に、濃度ムラの特徴54種に対し自然画像を5水準ずつ設定し、合計270種のテスト画像を用いた。

濃度ムラの特徴量を表すパラメータをFig. 1のように決めた。濃度ムラとして明度が変化する全域の幅を D 、明度変化が最大になる範囲（ピーク領域）の幅を d として、 d 及び D をそれぞれ3水準設定した。 d/D が1に近い程、濃度ムラの明度分布のエッジが明瞭であることを示す。 d/D が1未満の時は、ピーク領域の端部から濃度ムラ全域の端部まで正規分布に従って画像の階調変化率が変わるようにした。原画像より明度が明るくなる白ムラと、暗くなる黒ムラを作画した。この時、 $L^*=50$ の一樣濃度画像上に濃度ムラを描いた結果、印刷画像上で生じる明度コントラストが、白ムラと黒ムラとでそれぞれ3水準になるように設定した。印刷画像上の明度測定手段は、印刷画像全域をスキャナES-10000G（セイコーエプソン社製）でスキャンし、AdobeRGB色空間で保存した階調値から明度に換算する方法にした。濃度ムラのピーク領域と周辺領域を後述する内容で定義し、それぞれにおける平均明度を L_1^* 、 L_2^* として、 $\Delta L^*=|L_1^*-L_2^*|$ を用いて、 $\Delta L^*/L_2^*$ を明度コントラストと定義した。本稿ではこれを $\Delta L^*/L^*$ と表記する。明度測定の際に適用したピーク領域と周辺領域の定義についてはまず、画像の鉛直方向におけるそれぞれの範囲をFig. 1に示す通りした。画像の水平方向におけるピーク領域と周辺領域の範囲は共通にしたが、一樣濃度画像上に濃度ムラを描いた画像の場合と、テスト画像（自然画像上に濃度ムラを作画したもの）の場合で異なる条件にした。前者は任意の位置で視角2度相当の幅（236 pixel）の範囲とし、後者は実験結果として半数以上の被験者が「濃度ムラが特に目立つ」と回答した範囲にした。

$L^*=50$ の一樣濃度画像上に濃度ムラを作画した時、印刷後の明度変化量が最大変化量の1/2になる位置を、その濃度ムラのエッジと定義し、向かい合うエッジ間の距離を w とした（Fig. 1）。 w は視角で表すことにした。

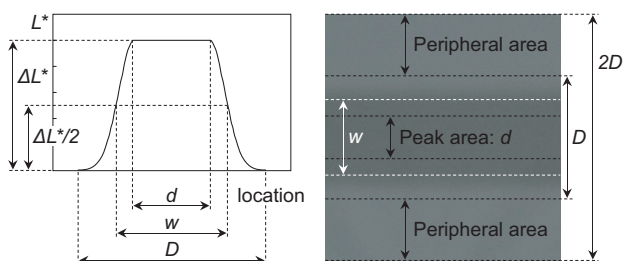


Fig. 1 The definition for physical values of density unevenness images.

Table 1 The conditions of the density unevenness.

Levels	Small		Middle		Large	
	Dark	Light	Dark	Light	Dark	Light
$\Delta L^*/L^*$	0.001~0.067		0.074~0.145		0.146~1.055	
d (mm)	0.24~0.98		D/2		D	
D (mm)	5.72		63.15		124.71	
d/D	0.0019~0.17		1/2		1	
w (°)	0.2~0.4		2.2~4.3		4.6~8.3	

3. 1. 3 実験手続き

被験者は視力または矯正視力正常の12名であった。呈示されるテスト画像は全て異なるもので、被験者が二度と同じ画像を見ないようにした。被験者は練習をした上で本実験を行った。テスト画像の呈示順序はランダムにした。

実験開始時には呈示画像が一樣なグレーのカバーで覆われた状態であり、実験者の合図と共にカバーが外された。外されると同時に被験者は濃度ムラ部分がどこにあるか探索した。実験者は濃度ムラ部分が発見されるまでにかかる反応時間（Reaction Time: RT）を計測した。被験者が濃度ムラと認識した部分が作画された濃度ムラと異なる場合や、RTが10秒を超える場合は、そのRT計測値を無効にした。

RT計測に続いて、実験者は被験者にどの部分が作画した濃度ムラであるか教示した。被験者はその濃度ムラの物理的な見え易さを表す度合いを“目立ちランク”として評価した。続いて被験者はその濃度ムラが気になる度合いを“印象ランク”として評価した。具体的には、印象ランク評価を「自分が購入した写真集を見ていると思って評価する」ことにした。目立ちランクと印象ランクは共に4段階に設定し、0.1刻みで評価して良いとした（Table 2）。一度ランク4（最も目立つ／気になる）を付けた後にそれを超える程度のテスト画像があった場合は、隣り合うランク間の程度差が均一になるよう被験者自身が心掛けた上で、4を超えるランクを付けても良いとした。被験者が評価するランクには個人差が生じるが、被験者の回答はその人の感覚を表す純粋な測定値であると考え、正規化等の処理は行わなかった。

被験者は最後に、作画された濃度ムラのうちのどの部分が「特に目立つ」かを、縮小印刷されたテスト画像上で図示した。結果として半数以上の被験者が「特に目立つ」と判断した領域を解析対象とした。また、その領域の水平方向幅を N とした。「特に目立つ」とされる領域は、濃度ムラの上下のエッジ位置に分割されることがある上に、水平方向の幅は上下の各エッジ上で異なる場合がある。そこで、 N は「特に目立つ」領域に含まれる上下のエッジ長さを別々に計測して合計した値とした。

Table 2 The criteria for each rank.

Rank	Criteria for Visibility	Criteria for Impression
4	非常に目立つ	非常に気になる
3	目立つ	気になる
2	やや目立つ	やや気になる
1	見えるが目立たない	見えるが気になる
0	濃度ムラとして認識できない	

3.2 実験2：検証用実験

実験2は過去に実施された実験であり、多くの条件は実験1と同一であった。実験1との相違点はまず、被験者が実験1とは異なる7名であった点である。次に、ランク評価で目立ちランクと印象ランクを区別せず、「目立つ」を「気になる」と置き換えても良いとした。また、作図する濃度ムラの形状は水平方向に伸びる直線状ムラと円形ムラの2種類で、それぞれ白ムラと黒ムラを用意した。いずれも、ムラ画像の作図によって生じる階調変化率が正規分布に従うものとした。円形濃度ムラの w はエッジが成す円の直径とした。実験2の濃度ムラの w は視角0.9～1.4度であり、全て2度未満であった。

4 解析方法とモデルの仮定

原稿画像の特微量を、視角2度四方の正方形毎に算出した。実験1の $w < 2$ 度のテスト画像に用いた、濃度ムラ作図前の原稿画像データ上において、濃度ムラが「特に目立つ」と判断された範囲内に収まる数だけ、前記正方形を並べて配置した。この時、各正方形の中心がムラのピーク位置と一致するようにした。配置された正方形範囲をそれぞれ注目領域として切り取り、個々に明度分布に変換した上で2次元DFTを行って、画像の鉛直方向、すなわち今回用いた直線状濃度ムラに垂直な方向の空間周波数パワースペクトルのみ抽出した。ここで、視角2度に相当する長さを入とし、得られたパワースペクトルを $4/\lambda$ 以上19/ λ 未満の周波数帯(2.0～9.4 [cycle/degree])で積分し、この積分値を PF とした。一つの前稿画像において複数の注目領域がある場合は、それぞれにおいて同じ手法で得た積分値を平均したものを PF とした。ここで積分範囲にした周波数帯は、本稿で述べた仮説に反しない条件下にあることを前提とした上で、実験1の $w < 2$ 度の濃度ムラが用いられた時の印象ランクに対して、 PF がより強い相関を示すように合わせた結果、選択されたものである。

濃度ムラ自体を表す特微量である、エッジの明瞭さ(d/D)、向かい合うエッジ間の距離(w)、半数以上の被験者が「特に目立つ」と回答した範囲の長さ(N)と、原稿画像特微量 PF を用いて、次の相関モデルを仮定した。

$$\text{濃度ムラ視認性} = a \times \ln\{N \cdot (d/D)/(PF \cdot w)\} + b \cdots (\text{eq. 1})$$

a, b は定数である。濃度ムラ視認性は、 RT 、目立ちランク、印象ランクの何れかを指すものとする。

実験1のうち $w \geq 2$ 度の濃度ムラに対応する原稿画像については、 PF を得るための注目領域をその中心がムラのエッジ位置と一致するように配置して、先述の方法で PF を算出した。実験2で円形濃度ムラが描かれた原稿画像に対しては、視角2度四方の1つの正方形を注目領域とし、その中心とムラの中心位置が一致するように配置して PF を算出した。

5 結果と考察

$\ln\{N \cdot (d/D)/(PF \cdot w)\}$ を A とし、 A 、及びeq. 1に用いた各パラメータと、濃度ムラ視認性を表す各評価値との相関係数をTable 3に示す。この時、濃度ムラ視認性の各評価値には全被験者の平均値を適用した。Table 3の $\Delta L^*/L^*$ は濃度ムラの明度コントラストである。

Table 3 The correlation factors (R) between values representing visibility of density unevenness and image characteristics.

(a) experiment 1: Light and dark unevenness were included when R was calculated.

		RT	Visibility rank	Impression rank
$w < 2^\circ$	$\Delta L^*/L^*$	-0.03	0.10	0.10
	d/D	-0.35	0.42	0.42
	$\ln(w)$	0.28	-0.30	-0.30
	N	-0.50	0.59	0.59
	$\ln(PF)$	0.43	-0.45	-0.48
	A	-0.52	0.61	0.63
$w \geq 2^\circ$	$\ln(PF)$	0.09	-0.20	-0.19

(b) experiment 2

	RT				Impression rank			
	Circular		Belt-like		Circular		Belt-like	
	Dark	Light	Dark	Light	Dark	Light	Dark	Light
$\ln(PF)$	0.26	0.41	0.21	0.30	-0.38	-0.49	-0.42	-0.53
A	-0.26	-0.41	-0.21	-0.32	0.51	0.52	0.44	0.59

実験1で濃度ムラのエッジ間距離が $w < 2$ 度である場合は、印象ランクと PF の相関がより強くなるように PF 計算条件を設定したが、 PF や A と濃度ムラ視認性評価値との相関強さは中程度以下に留まった。一方、濃度ムラの視認性と相関があることが自明である明度コントラスト $\Delta L^*/L^*$ と視認性との相関が無かった。今回扱った他の因子と視認性との相関は何れも PF と同等かやや強い程度だった。以上を考慮すると、原稿画像特微量が視認性に強く影響を及ぼしている可能性は否定できない。また、 PF が原稿画像の特微量を適切に捉えていなかった可能性がある。

実験1の $w \geq 2$ 度の濃度ムラに対しては、 $w < 2$ 度の場合と同様に算出したPFでは、ムラ視認性に対する相関関係を認められなかった。よってeq. 1のモデルは $w \geq 2$ 度の濃度ムラには不適切だと判断された。

全ての濃度ムラが $w < 2$ 度であった実験2のデータはPF算出条件検討に利用していないため、PF算出条件とeq. 1の検証用のデータとして扱った。実験2から得たPF及びAは、RTと弱い相関があり、印象ランクと中程度の相関があった。すなわち、 $w < 2$ 度であれば、原稿画像特徴量PFの算出方法とeq. 1のモデルは妥当であり、濃度ムラ視認性と原稿画像特徴量 (PF)、及び濃度ムラ自体の特徴量 (d/D , w , N) とには弱い～中程度の相関があると実証できた。

6 今後の課題

実験1の $w < 2$ 度の結果から、原稿画像特徴量として定義したPFが、意図する特徴量を適切に捉えていない可能性が示唆された。PFは矩形窓を適用した状態の2次元DFTから得た値であり、窓関数を工夫する余地がある。しかし、今回対象としたような、周期性を持たない局所的な濃度ムラを表す明度分布に関しては、どの窓関数を用いてもその影響は完全には排除できないため³⁾、DFT以外の手法でPFに代わる特徴量を抽出する方法を探索する価値がある。

また、PFは明度分布のパワースペクトルを2.0～9.4 [cycle/degree]の周波数帯で積分したものであり、この周波数帯は人の視覚のコントラスト感度が高い領域とよく似ている⁴⁾。この現象の解明も、相関モデルの精度向上に繋がると期待される。

●参考文献

- 1) N. Minegishi and K. Uchikawa, "Correlations between Visibility of Printed Density Unevenness and Characteristics in Input Images", Journal of the Imaging Society of Japan, 56, pp. 24-34 (2017) [in Japanese].
- 2) A. Oliva and A. Torralba, "Modeling the Shape of the Scene: A Holistic Representation of the Spatial Envelope", International Journal of Computer Vision 42, pp. 145-175 (2001).
- 3) S. Gade and H. Herlufsen, "Technical Review", Brüel & Kjær, No. 3, pp. 1-38 (1987).
- 4) K. Hirai and Y. Miyake, "Image Quality Evaluation of Flat Panel Display Based on Spatio-temporal Characteristics of Human Visual System", The Journal of The Institute of Image Information and Television Engineers, 62, pp. 322-328 (2008) [in Japanese].

●出典

本稿は日本画像学会 Imaging Conference JAPAN 2018 論文集 137-140を一部修正の上転載したものである。本稿の著作権は日本画像学会が有する。