

シミュレーションを用いた電子写真画像の品質評価

Evaluation of Electrophotographic Image Quality Aided by Numerical Simulation

伊藤 信司郎*
Shinjiro ITO

近藤 芳昭*
Yoshiaki KONDO

石毛 和典*
Kazunori ISHIGE

牧野 徹*
Toru MAKINO

要旨

電子写真方式のMFPの開発において、上流段階から出力画像の品質を予測し、評価できることが望まれている。このような要求にこたえるため、最終的に得られる品質を見積もることのできる、シミュレーションを援用した評価手法を提案した。この評価手法では、電子写真プロセスの一部が数値モデルに置き換えられ、シミュレートされた濃度の分布として出力画像が得られる。出力画像は、品質の評価に使われるだけでなく、品質を高める因子を見出すことにも用いられる。本稿では、われわれの手法を粒状性の評価に適用した際の有効性にくわえ、提案手法を品質工学と併用することで、濃度むらの要因効果を明らかにしたことを報告する。

Abstract

In the development of an electrophotographic MFP (multi-function peripheral), it is advantageous to predict and evaluate output image quality at an early stage. To do this, we propose an evaluation method, aided by numerical simulation, which can quantitatively estimate final quality. In this evaluation method, the electrophotographic process is partially replaced by numerical models, and an output image is then obtained as a simulated density distribution. The output image is used not only for evaluation of its quality but also for identifying those factors which improve quality. In this paper, we report on the effectiveness of our method when the method is applied to the evaluation of graininess. At the same time, we report that factorial effects on density non-uniformity are clarified by association of our proposed method with the Taguchi Method.

* コニカミノルタビジネステクノロジーズ(株)
品質保証統括部 評価技術部

1 はじめに

電子写真方式のMFPの開発において、出力画像のさまざまな品質を左右する設計パラメータを効率的に決め、製品化の早い段階から妥当な方針を見きわめたい要求がある。こうした要求には、実機より出力したサンプルによる評価では、限られた台数と条件についてしか行えないという問題が背景にある。そのため、シミュレーションを用いることにより、最終的に出力される画像に関して安定して劣化を再現し、定量評価に基づいて設計の方針と品質の向上に結び付ける技術を構築してきた。

これまで扱った品質の評価項目には、粒状性、階調性、濃度むら、文字や線などが含まれる。品質にあたる因子は、たとえば、マルチビームの配置誤差やポリゴンミラーの形状誤差のほか、スクリーン構造やプロセスの諸条件、画像処理など多岐にわたり、シミュレーションで考慮することができる。また、CMYKの各色の違いを取り扱える。

オフィス向けMFPでは、文字の可読性が重要であるのに対して、この巻で特集されているプロダクション・プリントの領域では、写真画像やグラフィックの質感が重視される傾向にあるため、粒状性や色再現の安定性に高い目標設定が必要とされる。今回、シミュレーションを援用した評価技術により、粒状性および、品質工学の考えを取り入れた濃度むらの評価を検討したので、報告する。

2 シミュレーション

入力となるスクリーン画像を用意したのち、カラー電子写真の露光・感光体・現像特性をモデル化したシミュレーションにより、濃度分布を計算する¹⁾。このとき、レーザパワー、ビーム径、パルス幅、感光体特性、現像バイアス電位などをパラメータとしてあたえることができる。濃度分布は、多値画像として得られる。

濃度むらの評価では、上記の濃度分布をそのまま用いるが、粒状性の評価では、転写プロセスにおいて生じるチリの影響を加味するため、濃度分布を乱すモデルを付加し、トナーの一部がチリとして飛散した分布を評価に使う。非コート紙を用いて実機より出力される画像を考慮するため、濃度分布を乱すモデルとしては、チリによる画像変動をシミュレーションするモデル²⁾をもとに、

最高濃度に近い場所での飛散と、チリとしてかきとる大きさについて改変したモデルを用いる。飛散の概念図を Fig. 1 に示す。

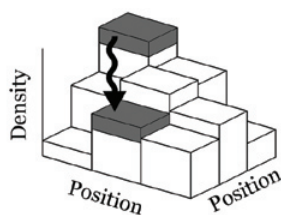


Fig. 1 Model for toner scattering. Density in one pixel is partially removed and added to a neighboring pixel selected randomly.

かきとり率、すなわち各計算格子から濃度がチリとして減少する割合は正規分布にしたがう乱数とし、飛散した別の位置の濃度に加算される。ただし、一定の閾値を超え、最高濃度に近い場所では、飛散が生じてもトナー量が多く残留することを反映し、飛散後も元の濃度の一定割合が残るものとする。

チリの主走査および副走査方向への飛散距離も正規分布にしたがう乱数とする。ここで、距離の平均は0に固定し、標準偏差 σ を変化させて検討する。

濃度分布は解像度3000dpiで求めており、かきとる大きさは計算格子の $8.5\mu\text{m}$ 四方に限定する。実際のチリの濃淡はトナー量によって異なるが、画像が多値階調の濃淡を持つことで対応させる。こうしてつくられたシミュレーション画像を紙上の濃度分布とみなして評価に用いる。

3 シミュレーションによる画像評価

3.1 評価1 粒状性

5種類のスクリーンA, B₁, B₂, C₁,およびC₂のシミュレーション画像を評価の対象とし、指標には明度成分の変動から定量化される明度ノイズ値LN (Lightness Noise)を用いた³⁾。スクリーンAは誤差拡散法によるハーフトーンであり、ほかはすべてドットスクリーンである。BおよびCはそれぞれ線数が190 lpiと212 lpiである。また、B₂およびC₂ではドットが均等に成長するのに対して、B₁およびC₁では階調性の向上ため不均等に成長していく。

それぞれのスクリーンにおいて濃度とチリの飛散距離とを変化させた。各スクリーンのシミュレーション画像は入力濃度を10%から80%まで8段階に変化させたパッチからなっているが、チリの飛散距離がしたがう分布として、主・副走査方向の標準偏差を $\sigma_0=0, \sigma_1=1, \sigma_2=2\text{pixels}$ の3水準にふって画像を作成した。 σ_0 はチリが生じない場合に相当する。

ひとつのスクリーンに対して作成された、濃度と飛散距離の標準偏差が異なる24の画像において、Blackのみの状態(以降、K)とCyan, Magenta, およびYellow (以

降, CMY)とを重ね合わせた状態に分離してから、粒状性の評価値LNを算出する。スクリーン、標準偏差、および色の種別の組み合わせに対して、濃度が異なる8枚のパッチのLNが得られる。LNはパッチの平均明度 L^* とともに変化するが、粒状性をもっとも悪い、すなわちLNがもっとも大きくなるハイライト領域のパッチのLNを評価値として代表させる。このようにして、5種類のスクリーンのKとCMYのそれぞれについて、チリの飛散距離が異なる場合の30のLNが最終的に得られる。

3.2 評価2 濃度むら

スクリーン設計における濃度むらの評価では、第2節のシミュレーションにおいてCyan単色の階調画像のスクリーンを入力とし、品質工学(田口メソッド)のパラメータ設計と組み合わせた。さまざまな因子の影響度を明らかにし、色差で定量評価される濃度むらを低減させるような条件を効率よく見出すことを目的とする。

制御因子は、Table 1 に示したように、スクリーン自体のパラメータと現像プロセスに関するパラメータの6種からなる。これらをL₁₈直交表へ割り付けた(L₁-L₁₈の18通り)。

シミュレーションでは、実験的に求められた、感光体の表面電位と出力画像の濃度との関係を利用する。制御因子Fでは、現像ACバイアスを3水準に変化させているため、3種類の異なるACバイアスに対応した表面電位と出力画像の濃度との関係を求め、シミュレーションに用いる。

Table 1 Control factors.

Factors	Levels		
	1	2	3
A: Shape of screen	Line	Dot	-
B: Number of lines	Low	Mid	High
C: Screen angle (0-90 deg)	Low	Mid	High
D: Bit-depth	Low	Mid	High
E: Gamma	Low	Mid	High
F: AC developing bias	Low	Mid	High

誤差因子は、ビーム径、感光体の帯電電位、およびレーザダイオードのパワーとした(Table 2)。これらをL₉直交表へ割り付けた(N₁-N₉の9通り)。3水準の誤差因子とは別に、ビーム径、帯電電位およびパワーの標準的な設

計値を標準条件 N_0 として定め、標準S/N比を用いて解析を行った。標準条件 N_0 によってつくられるシミュレーション画像の階調性に近いほど望ましく、結果として、色差も小さくなる。

Table 2 Noise factors.

Factors	Levels		
	1	2	3
1: Beam diameter	Small	Mid	Large
2: Charged potential on the surface of photoreceptor	Low	Mid	High
3: Power of laser diode	Low	Mid	High

以上の構成で、 L_1 から L_{18} のすべてに対して、標準条件 N_0 および N_1 から N_9 までを組み合わせるシミュレーションを行った ($18 \times (1+9) = 180$ 実験)。

4 結果および考察

4.1 粒状性の評価結果

作成されたシミュレーション画像 (一部) を Fig. 2 に示す。比較のため、同一のスクリーンによるパッチ画像を、非コート紙を用いて実機より出力した。各スクリーンの実画像では、入力濃度を15段階に変化させている (4.7, 6.3, 9.4, 12.5, 15.7, 18.8, 22.0, 25.1, 31.4, 37.6, 43.9, 50.2, 56.5, 62.7, 69.0%)。実画像を、評価のために作成したシミュレーション画像と合わせて Fig. 2 に示す。

スクリーン B_1 のKにおいて、標準偏差 σ_2 の条件下で各パッチの平均明度に対して LN がどう変化するかを Fig. 3 に示す。シミュレーション画像の LN は実画像の測定・評価結果とおおむね一致した。パッチの入力濃度と明度の関係がシミュレーションと実画像とで整合しない点は、現状のシミュレーションの課題である。以下、シミュレーション画像と実画像ともに、ピークとなる LN を評価値に用いている。

Fig. 4 は、チリの飛散距離の標準偏差に対する LN の変化をあらわしている。CMYにくらべて単色のKでは飛散距離の増大が粒状性におよぼす影響は大きい。また、ドットスクリーン B_1 - C_2 では飛散距離とともに粒状性が悪化しているのに対して、誤差拡散スクリーンAの粒状性は逆に良い方向に向かっている。これはチリの発生がないとき (σ_0) にもっていたむらが緩和されたためと

考えられる。チリの発生が望ましくない指針は変わらないが、より実画像の評価に近付けるため、飛散を考慮に入れ、優劣を評価することが重要となることがわかった。

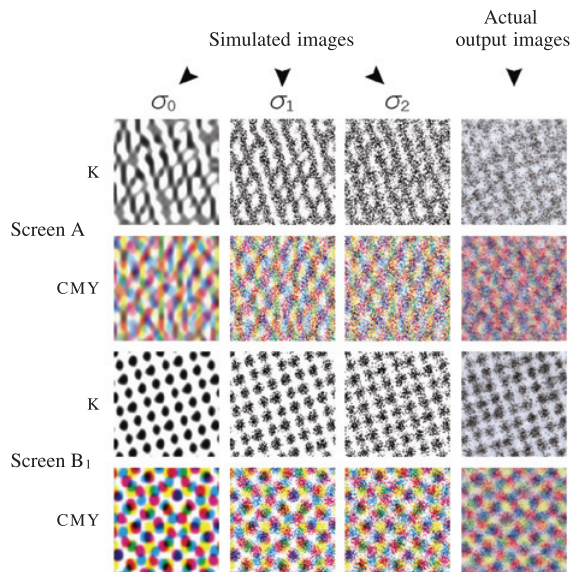


Fig. 2 Actual scanned output images (input density, 25.1%) compared with simulated images (input density, 30%), where the standard deviation of scatter distance varies from σ_0 to σ_2 .

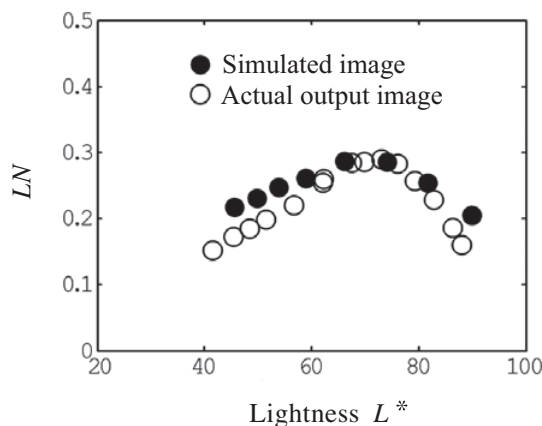


Fig. 3 LN of simulated image of screen B_1 (black) with the standard deviation σ_2 . LN of actual output image is also plotted.

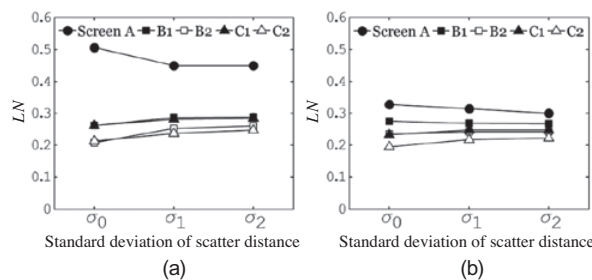


Fig. 4 Variation of LN with respect to three levels of standard deviation. (a) K (b) CMY.

実画像の評価値と関連付けた Fig. 5 によれば、シミュレーション画像による LN では、とくに K の画像においてチリの影響を考慮することで、実画像の LN との間に高い相関が得られることがわかった。

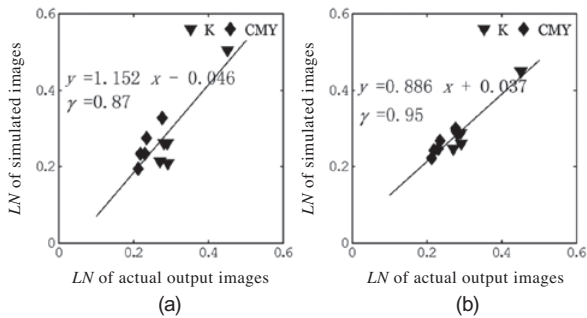


Fig. 5 Correlations of LN between simulated and actual output images. (a) σ_0 (b) σ_2 .

4.2 濃度むらの評価結果

Fig. 6 に、代表的な結果として、組み合わせ (L_{18}, N_2) 、 (L_{18}, N_7) 、および (L_{18}, N_8) について、標準条件 N_0 の濃度 D に対するおのおの濃度 D の変化を示す。また、Fig. 7 に、同一の組み合わせについて、入力濃度に対する色差 ΔE_{00} (CIEDE2000) の変動を示す。ここで、色差を算出する基準として、 L_{18} と標準条件 N_0 の因子の組み合わせのシミュレーションで得られた L^*, a^*, b^* を用いた。

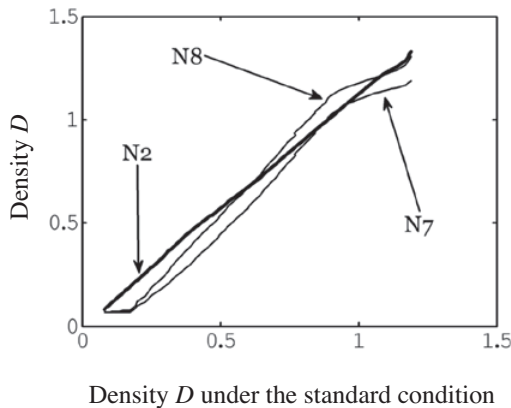


Fig. 6 Examples of results of simulated tone reproduction under the condition of (L_{18}, N_2) , (L_{18}, N_7) , and (L_{18}, N_8) versus under the standard condition N_0 .

全実験について標準 S/N 比を算出し、要因効果図として Fig. 8 にまとめる。現行水準と最適水準を別個のマークであらわす。制御因子の中で寄与がもっとも大きいものはスクリーン線数であり、次いでスクリーン角度であった。ビーム径 (誤算因子 1) が太るにつれてむらが目立つようになるが、スクリーン角度が大きいほどその影響が軽微であることがわかった。したがって、濃度むらの観点からは、スクリーン線数が低く、角度が立っているほうがよい。

スクリーン形状ごとに要因効果を確認したところ、ドットスクリーンに比べて、ラインスクリーンは、ビット数、ガンマ、および現像 AC バイアスの影響を受けやすいことがわかった。また、ラインスクリーンではビット数が高くなるほど S/N 比が高くなるのに対して、ドットスクリーンでは逆の傾向が見られた。スクリーン形状によって相反する結果となったので、ビット数の最適水準としては中央の水準 (D_2) を選択した。スクリーン形状を除いた 5 種の制御因子において、最適水準 (B_1, C_3, D_2, E_3, F_3) と推定した。

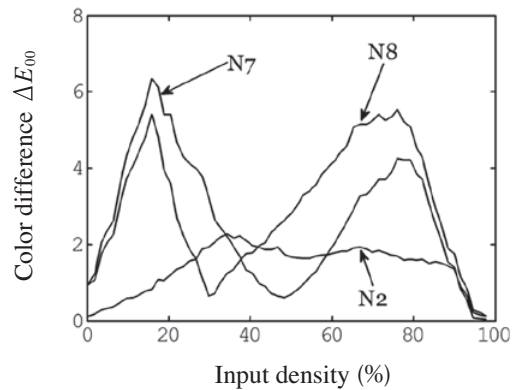


Fig. 7 Color difference between standard condition N_0 and representative results (L_{18}, N_2) , (L_{18}, N_7) , and (L_{18}, N_8) .

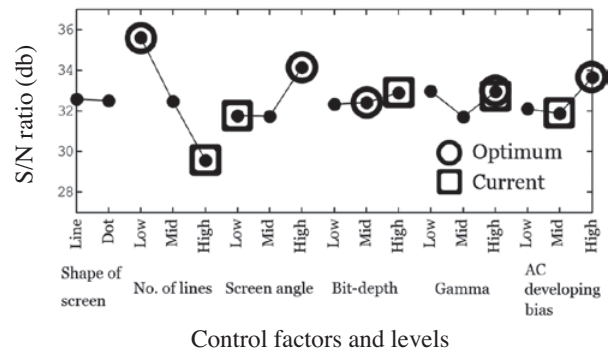


Fig. 8 Factorial effects.

Table 3 に、推定した最適水準の S/N 比と、確認実験として実行したシミュレーションにより求めた S/N 比を比較して示す。推定と確認実験における利得の差は、ラインスクリーンでは 1.0 db、ドットスクリーンでは 0.1db と小さく、再現性に問題は無いと判断した。標準条件 N_0 の階調性からのばらつきをおさえることで、色差を低減させられることも、確認実験によってたしかめられた。

同様の実験を実機で行う場合、仮に全条件を揃えられたとして 1 か月程度は要すると見積られるが、シミュレーションを用いることで約 9 時間で計算を終えられた。したがって効率面での改善効果は大きいといえる。

Table 3 Estimation of effects and results of confirmation experiments.

Shape of screen		Estimation	Confirmation experiments	
		S/N ratio (db)	S/N ratio (db)	Maximum of ΔE_{00}
Line	Current	28.9	29.5	5.6
	Optimum	38.6	40.2	3.0
	Gain	9.7	10.7	-
Dot	Current	28.8	28.5	5.9
	Optimum	38.5	38.1	2.5
	Gain	9.7	9.6	-

5 まとめ

電子写真プロセスの一部をシミュレーションで代替することで、開発の極力早い段階から実機に頼らない画像品質（粒状性、濃度むら）の評価が可能であることを示した。ここで述べた技術を用いることにより、実機の評価では見逃しがちな条件を早期に検出して重点的に検討できるため、設計の改善と品質の向上に結びつけることができると考える。

●参考文献

- 1) 伊藤信司郎, 牧野徹, 梅津昌彦. カラー電子写真システムのシミュレーションによる画像評価技術. KONICA MINOLTA Tech. Rep. 2008, **5**, p. 50-56.
- 2) 高野岳, 澤田崇行, 菅野浩樹. 電子写真記録シミュレーション. 画像電子学会 第26回年次大会予稿集. 1998, p. 39-40.
- 3) 伊藤哲也, 坂谷一臣, 山本真司. 明度, 彩度, 色相情報による画像ノイズ評価尺度の研究. 日本画像学会誌. 2000, **39**, p. 84-93.

●出典

本稿は日本画像学会“Imaging Conference JAPAN 2010”論文集からの転載である。本稿の著作権は日本画像学会が有する。