

シミュレーションによる色空間での画質評価技術

Image Quality Evaluation Technique in Color Space Using Numerical Simulation

近藤 芳 昭* 牧 野 徹* 石 毛 和 典*
Yoshiaki KONDOH Tohru MAKINO Kazunori ISHIGE

要旨

カラープロダクションプリンティング製品開発において、色に関する画質評価は非常に重要な項目である。しかしながら課題もあり、その一つに、製品の試作段階で様々な誤差要因の影響を考慮した評価が難しいということがある。それに加えて、混色理論を用いた1次色の色再現から多次色再現の評価が未確立な点もある。この課題に対し、電子写真画像シミュレーションと品質工学を活用して、開発早期段階から量産ばらつきまで含めて色の画質性能を評価する技術を構築した。

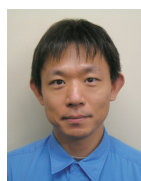
本検討では、シミュレーションにLUT補正プロセスを組み込み、色予測精度を向上させた。そして、色立体の体積カバー率や表面積カバー率、色差という3つの特性について評価を実施した。その際に、品質工学の直交表を用いて誤差の影響を考慮した数値実験を行い、各制御因子と誤差因子の影響度を把握してロバスト条件を見出し、本評価手法の有効性を示すことができた。さらに設計パラメータ検討も可能であることが確認できた。本評価手法を用いて開発の早い段階から色に関する画質評価を行なう事で、さらなる製品品質向上に貢献できると考えている。

Abstract

In designing production printing products, evaluation of color image is one of the most important matters. However, a problem exists that it is difficult to evaluate the color performance of a product at prototype stage taking into account various noise factors. Furthermore, there exists another problem that it is not accomplished to evaluate mixed-colors performance from monochrome performance using theoretical color matching. To solve these problems, we have built an evaluation scheme for performance of color image quality including influence of various noise factors utilizing an electrophotographic process simulation and the QE method. The evaluation scheme is applicable to an early stage of development as well as to its mass production stage.

In this report, we improved accuracy of color matching by adding a lookup table (LUT) correction to the simulation scheme. We practiced evaluation for 3 characteristics which are volume coverage, and surface coverage of color solid, and color differences. In our investigation, numerical experiments were arranged with orthogonal arrays based on the QE method to take into account noise factors. As a result, responsibility of each control factor and noise factor was verified and the most robust condition was determined. Validity of the scheme was successfully shown. Furthermore, it was verified that the scheme can be applied to parameter designing stage. By applying the scheme for the color image quality evaluation to an early stage of a project, we consider to contribute further improvement of quality of products.

執筆者



近藤芳昭



牧野 徹



石毛和典

* 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

カラープロダクションプリンティング分野では、さらなる高画質性能を備える印刷機が求められている。その中で、色の安定再現性は重要項目の一つに挙げられる。それは、ユーザーの意図した色彩を自在に表現できれば、大きなメリットとなるからである。そのため我々は、色の安定再現性に関する管理ポイントを、効率良く早期に把握できる評価技術が重要と考えた。

色の安定再現性を評価するには種々の課題がある。実機を用いた評価では、様々な誤差要因の影響から、色の安定再現において管理すべき設計／製造箇所を絞り込むのが困難である。また、2次色や3次色などの混色評価に大きな労力を要する。製品の製造個体差や日間ばらつきまで含めると、混色性能を完全に評価するには、相当な評価工数が必要となる。

本検討の目的は、我々の取り扱っている電子写真において、画像シミュレーション技術¹⁾により、試作前の構想段階から、色の安定再現性を評価できるようにすることである。すなわち、開発上流から品質保証に取り組む事であり、その結果として質の高い製品を供給し、市場のニーズに応える事を目指す。

2 解析・評価の手法

電子写真画像シミュレーションと品質工学を組み合わせた手法により、色空間 ($L^*a^*b^*$ 空間) での設計ロバスト性を評価した事例を報告する。概略を以下に述べる。

2.1 電子写真シミュレーションによる解析

電子写真プロセスの露光、潜像形成、現像をモデル化し、一連の計算を行なうことで、実機出力画像を予測する。色再現性においては、2次色以上の混色を精度良く計算する事が求められる。そこで、本検討では現行のシミュレーションに対して、多次元のルックアップテーブル (LUT) を作成して補正する機能を追加することで、精度向上を図った²⁾。LUT補正のブロック図を Fig. 1 に示す。電子写真画像シミュレーションで得られた画素値 $F(C, M, Y, K)$ に対して、LUTを用いて $G(L^*, a^*, b^*)$ へ色変換を行った後に、求める評価値 $H(L^*, a^*, b^*)$ を算出している。この補正効果を確認した結果については4.1節で示す。

尚、シミュレーションの入力条件については、Japan Color 2001 チャート (IT8.7/3) のスクリーン化画像を用いた。

2.2 品質工学を用いた評価^{3), 4)}

モデルの中で、濃度 (色域) 変化への影響が見込まれる因子を選択した。開発初期に議論される仕様値を、制御因子 A ~ D として Table 1 の L9 直交表に各3水準で割り当てた。

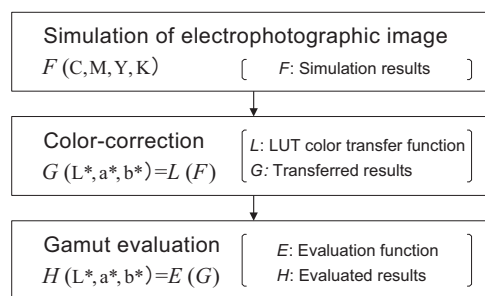


Fig. 1 LUT scheme for the simulation results.

Table 1 Control factors for L9 orthogonal array.

Factor	Description	Levels		
		1	2	3
A	Screen type	Line	Dot	Dot
B	Screen ruling	Coarse	Moderate	Fine
C	GCR rating	Very high	High	Default
D	Laser power	Default	High	Very high

Table 2 Noise factors for L4 orthogonal array.

Factor	Description	Levels	
		1	2
a	Laser diameter in main scan direction	Small	Large
b	Laser diameter in sub scan direction	Small	Large
c	Developing bias	Low	High

因子Aはスクリーンの線種設定をLine, Dotの2形状として、水準3にはDot形状を割り当てた。因子Bはスクリーンの線数設定で、粗密を割り当てた。因子CはカラーマネジメントにおけるGray-Component Replacement (GCR) 設定を割り当てた。混色グレイをK (Black) で置き換える比率であり、水準1で最も置き換え量が多くなり、トナー消費総量が最小となる。因子DはLDビームパワー設定を割り当て、潜像電位分布の変化による色再現性への影響を評価した。

製造個体差や出力環境による誤差を誤差因子 a ~ c として、Table 2 の L4 直交表に割り付けた。

因子 a, b は LD ビーム径の大きさを割り当てた。主／副方向ビーム径の変化が、C, M, Y, K スクリーン重畳状況を変化させることに対する、色再現性への影響を考慮した。因子 c は現像バイアス変化を割り当て、直接的な濃度ばらつきを考慮した。今回の事例では、C, M, Y, K で同一誤差としたときの計算結果を示す。

3 画質評価項目

Japan Color 2001 チャートの各パッチの $L^*a^*b^*$ 値で形成される立体形状を、以下は色立体と表記する。前節で設定した L9×L4 直交実験のシミュレーション結果に対して、色立体の体積カバー率と表面積カバー率、及び色差 ΔE_{00} の3項目で色再現性を評価した。

3.1 体積カバー率

色立体の体積カバー率は式(1)で算出した。

$$Volume\ Coverage = \frac{V_{L9 \times L4}}{V_{L9Ideal}} \quad (1)$$

ここで、 $V_{L9Ideal}$ は誤差因子を含まない計算の色立体体積であり、 $V_{L9 \times L4}$ は誤差因子を含んだ計算で $V_{L9Ideal}$ と重複している色立体体積である。この体積カバー率(0~1の範囲)で色再現範囲を評価した。

3.2 表面積カバー率

色立体の表面積カバー率は式(2)で算出した。

$$Surface\ Coverage = \frac{S_{L9 \times L4}}{S_{L9Ideal}} \quad (2)$$

ここで、 $S_{L9Ideal}$ は誤差因子を含まない計算の色立体表面積であり、 $S_{L9 \times L4}$ は誤差因子を含んだ計算で $S_{L9Ideal}$ を包含する色立体表面積である。体積カバー率と同様に、表面積カバー率(0~1の範囲)を用いて、色の再現性を評価した。

3.3 色差 ΔE_{00}

混色の中で2次色のR, G, Bに対し、誤差を含まない条件と誤差を含む条件のシミュレーション結果との間で、CIEDE2000の色差 ΔE_{00} を計算して、色の再現性を評価した。

4 計算結果

4.1 精度確認の計算結果

シミュレーション結果画像に対してLUT補正した結果をFig. 2に示す。C, M, Y, R, G, Bの18ステップ階調チャートについて、実機実験とシミュレーションの結果を比較し、ほぼ一致する傾向が認められた。

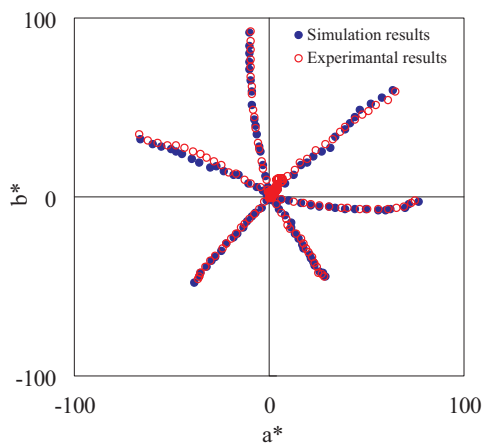


Fig. 2 Color distribution of C, M, Y, R, G, and B in a^*-b^* plane. The filled circles show the simulation results. The open circles are experimental results.

4.2 L9xL4の計算結果

電子写真画像シミュレーションでL9xL4直交実験を実施した。体積カバー率、表面積カバー率、色差を算出し、それぞれ望小SN比の要因効果図をFig. 3に示す。ただし、体積カバー率と表面積カバー率については、1からの差分をとり、SN比を算出した。Fig. 3 (a)の体積カバー率に関する要因効果図では、スクリーン設計に関係した因子A,Bにおいて、やや誤差の影響を受ける傾向が見られた。Fig. 3 (b)の表面積カバー率に関する要因効果図では、各因子で誤差の影響を受けない結果となった。

Fig. 3 (c)の色差に関する要因効果図では、BlueでSN比の高い結果が得られており、誤差に対して比較的安定性が高いと考えられる。Red, Greenは、変化の傾向が似ており、総じてBlueよりSN比が低く、相対的に誤差に弱い結果となった。

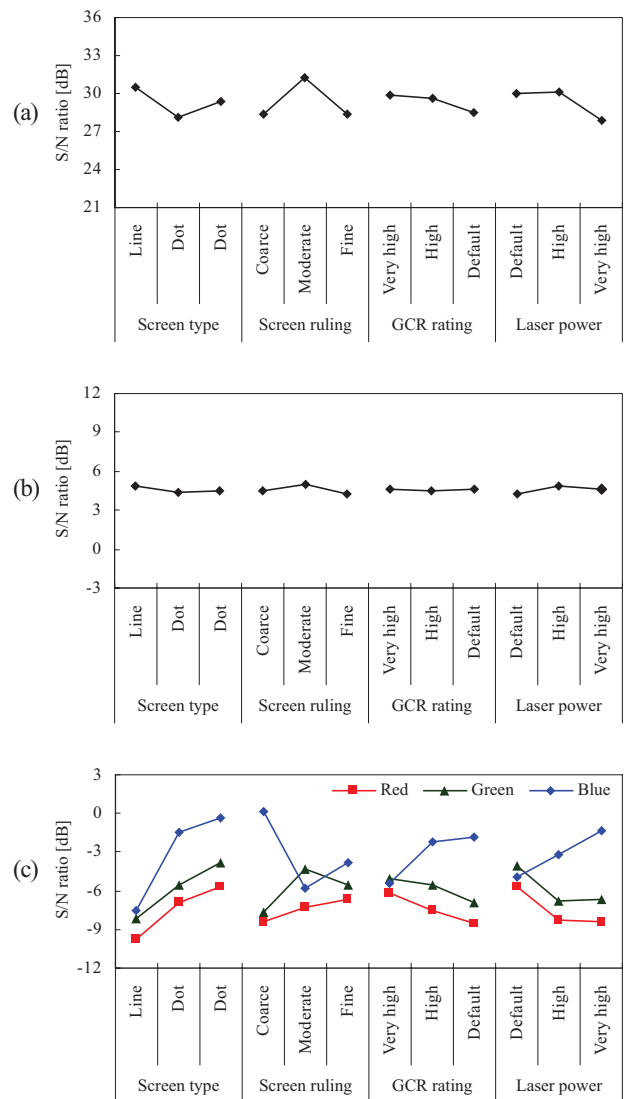


Fig. 3 Factorial effect plots of simulation results of L9xL4 orthogonal arrays. Factorial effects are plotted by S/N ratio. The factor effects are representing smaller-is-better response: (a) volume coverage, (b) surface coverage and (c) color difference.

5 考察

画像シミュレーションによる直交実験の妥当性を検証するため、確認実験を行った。

5.1 確認実験

確認実験では、L9の実験No. 5 (因子 [A, B, C, D] で水準 [2, 2, 3, 1]) を標準条件とした。また、最適条件は、Fig. 3 で各評価項目のバランスを考慮して、因子 [A, B, C, D] で水準 [3, 2, 2, 2] を選択した。確認実験の結果をTable 3に示す。利得に関して、いずれの項目も推定値と確認実験で2dB以下の差となり、利得再現性のある結果が得られた。

Table 3 Confirmation experiment.

Evaluation item	Description	S/N ratio [dB]		Gain	
		Standard	Optimum		
Volume coverage	Expectation	29.92	32.60	2.68	
	Confirmation	29.92	30.70	0.78	
Surface coverage	Expectation	4.53	4.92	0.38	
	Confirmation	4.53	4.48	-0.05	
Color difference	Red	Expectation	-6.00	-6.48	-0.48
		Confirmation	-6.00	-5.24	0.76
	Green	Expectation	-3.32	-3.01	0.31
		Confirmation	-3.32	-2.37	0.96
	Blue	Expectation	-4.62	-2.09	2.53
		Confirmation	-4.62	-4.00	0.62

5.2 色立体の特性

確認実験において、最適条件は表面積以外で若干の利得が示された。この効果をより詳細に確認するため、 $L^*a^*b^*$ 値分布をFig. 4, 5, 6に示す。

Fig. 4に(a)標準条件、(b)最適条件の色立体断面を示し、体積カバー率のばらつき傾向を確認した。ここで、C, M, Y, R, G, BにおいてそれぞれChroma ($C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$)を算出し、 L^*-C^* 平面で示した。図中の破線で囲んだ領域において、最適条件はRedとGreenのばらつきが抑制されており、ロバスト性向上を確認できた。

表面積カバー率に関しては、色立体を a^*-b^* 平面に投影したときの最外郭部の変化が大きな影響を及ぼすと考えられる。Fig. 5で(a)標準条件、(b)最適条件の最外郭部を示した。両者でそれぞれほぼ同一線上に分布する結果となり、誤差の影響で表面積に大きなばらつきは生じ難かったと考えられる。

Fig. 6は(a)標準条件、(b)最適条件におけるC, M, Y, R, G, Bの a^*b^* 値分布を示す。図中の破線で囲んだRed, Greenにおいて、最適条件は標準条件よりばらつきが抑えられて色差が小さくなっており、ロバスト性向上が確認できた。

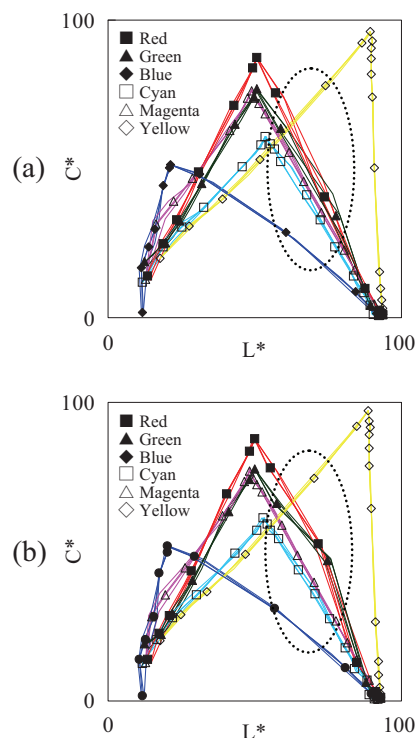


Fig. 4 Color distribution of C, M, Y, R, G, and B in L^*-C^* plane, (a) with standard and (b) with optimum condition. The simulation results with noise factors are shown by the solid lines. The marks represent the simulation results without noise factors. Chroma C^* is calculated from the square root of the sum of $(a^*)^2$ and $(b^*)^2$.

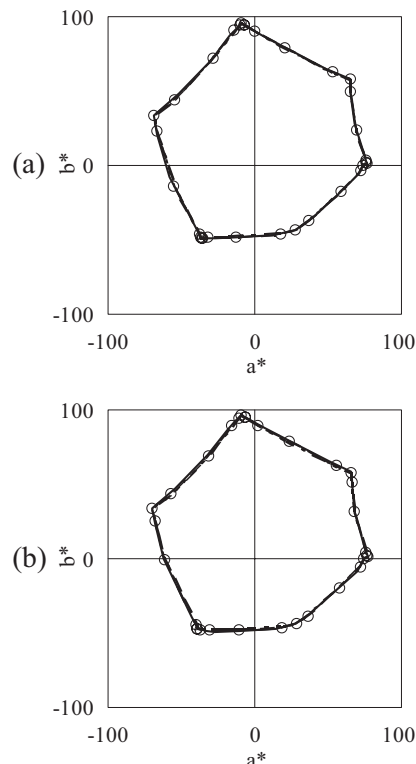


Fig. 5 Outermost edge of Gamut surface in a^*-b^* plane, (a) with standard and (b) with optimum condition. The simulation results with noise factors are shown by the solid lines. The marks represent the simulation results without noise factors.

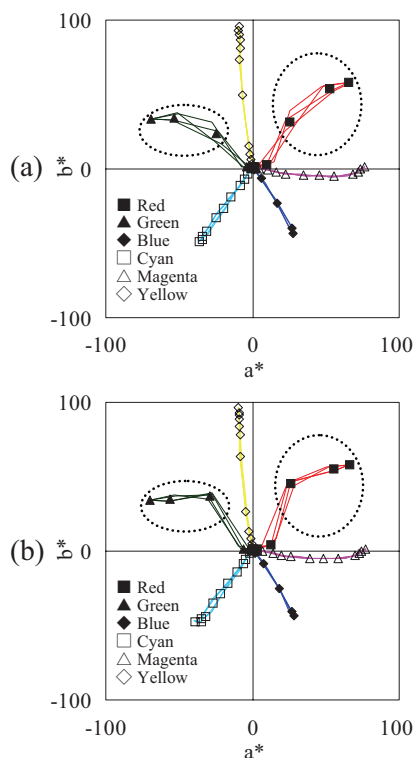


Fig. 6 Color distribution of C, M, Y, R, G, and B in a^*-b^* plane, (a) with standard and (b) with optimum condition. The simulation results with noise factors are shown by the solid lines. The marks represent the simulation results without noise factors.

6 まとめ

LUT補正による精度向上を行なった電子写真画像シミュレーションと、品質工学を組み合わせる手法の有効性を事例で示した。体積カバー率、表面積カバー率、色差という3つの評価項目で、開発の早い段階から色の安定再現性を評価可能であることが確認できた。また、最適条件を見出せたことから、設計パラメータ検討にも適用可能な手法であることが確認できた。

今後の課題として、開発の早い段階で評価適用することで、製品品質向上に貢献する事ができると考えられる。また、シミュレーションモデルにトナー特性（分光波長など）や定着など、幅広い設計要因を取り入れて実験範囲の拡大を行ない、さらに実機との整合性向上を図ることが必要と考える。

●参考文献

- 1) 伊藤, 近藤, 石毛, 牧野: Imaging Conference JAPAN 2010 論文集, pp.11-14.
- 2) 洪博哲: “カラーマネジメントシステムの開発”, KONICA TECHNICAL REPORT Vol.8, pp.93-96 (1995).
- 3) 田口玄一ほか: 品質工学便覧, 日刊工業新聞社 (2007).
- 4) 矢野宏ほか: 田口玄一論説集第4巻, 日本規格協会 (2012)

●出典

本稿は日本画像学会 “Imaging Conference JAPAN 2012” 論文集の予稿を加筆修正して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。