

シミュレーションと品質工学を用いた レーザー走査光学系の設計品質評価

Quality Evaluation for Design of Laser Scanning Optical System Using Numerical Simulation and Quality Engineering

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

要旨

プリンティング市場では、より高画質、高信頼性を兼ね備えた製品への期待が高まっている。その要求に対し、製品開発の初期から量産までを包括的に考慮した品質向上への取り組みができないか検討した。本報告では複写機に搭載されているレーザー走査光学系を検討対象としている。我々のグループで開発した画像シミュレーションシステムは、試作実験機が存在しないような製品構想段階から画質予測とその評価が可能である。品質工学のL18×L18直交表を用いて、設計仕様値を制御因子に、量産/市場環境のばらつきを誤差因子に割り付けることで、濃度ムラや粒状感といった複数の画質評価項目に対して、総合的にロバスト性の高い設計条件を確認した事例を報告する。

Abstract

Expectation for products combining higher image quality and higher reliability is rising in the printing market. In order to reply such request, we have investigated a quality improvement scheme which can be applied comprehensively from start of development to the mass production phase. In this report, a laser scanning optical system has been considered. An imaging simulation system developed in-house has been applied, which can predict and evaluate image quality of a virtual product before the prototype doesn't exist at the concept phase. A comprehensively robust-oriented design specification has been confirmed for plural articles of image quality such as density fluctuation and graininess by arranging an orthogonal array of the quality engineering method in L18×L18 for allocating design parameters, production tolerance and environmental variation in the field to control factors and error factors respectively.

1 はじめに

熾烈な市場競争に勝ち残るために、製品品質の向上は重要なテーマの1つと言える。複写機業界においても、出力画像の濃度階調再現性や、粒状感など、多岐にわたる画像品質評価が行われ、高品質と高信頼性を保証する製品提供を支えている。また、設計の品質については、開発や生産の途中で不具合を生じて後戻りを起こさない高いロバスト性を備えた構成を実現することが求められている。

そこで我々は、設計初期段階から量産工程や市場環境の誤差まで包括的に取り扱うことで、さらに高いロバスト性の獲得を目指し、製品の高品質化につなげるための評価技術について検討した。

設計品質の評価として、開発初期に定めるべき設計仕様を制御因子とし、製造や市場で生じるばらつきを誤差因子としてそれぞれ直交表に割り付けた実験でSN比を求め、各因子の画質に対するロバスト性をシミュレーション評価した事例について報告する。

2 レーザー走査光学系における設計品質評価

本報告は、複写機に搭載されているレーザー走査光学系を検討対象としている。レーザー走査光学系の設計は転写や現像など他のイメージングプロセスとも密接な関係がある。電子画像データ処理(スクリーン化)、露光感光プロセスの光放電曲線(PIDC)、現像プロセスの現像バイアス設定や最高濃度調整等の各設計条件も同時に検討することで、さらなる高画質化やロバスト性向上が可能であると考えられる。

我々はこれまでシミュレーション検討として、設計者の経験に基づいて絞り込んだ幾つかの設計条件に対して、種々のパラメータを想定した総当りの要因実験を計画し、複数の機種で総じて年間数百万件に上るシミュレーション上の試作実験を実施していた。しかし実際にそれが実機のユニット構成の中でどの程度のウェイトを占めるかの確認までには及ばず、局所最適化に留まっている可能性があった。そこで、より幅広い設計条件の画像品質に対する要因効果関係を明らかにすることと、評価効率化の観点からシミュレーションと品質工学の組合せを考えた。

本報告内容としては、レーザーダイオード(LD)や、ポリゴンミラー(PM)などの機器設計仕様と、電子画像デー

* 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

タのスクリーン化に代表される画像処理の設計仕様を、制御因子としてL18直交表に割り付けた。また、製造誤差や、市場で想定される変動などを誤差因子としてL18直交表に割り付けた。この直積L18×L18実験をシミュレーション上にて実行することで、効果的かつ効率的に各設計条件が画像品質に及ぼす影響について評価した。

シミュレーションに関して、既出¹⁾²⁾と同様の計算アルゴリズムを用いた。ワークフローも同様に、入力となる評価用電子画像をスクリーン化した後、電子写真プロセスの露光、潜像、現像をモデル化したシミュレーションにより、実機出力の濃度分布を予測する。このモデルでは、ビーム径、PIDC、現像バイアスなどをパラメータとしている。

3 画質評価項目

濃度ムラ(周期スジ)、粒状性、色差の3つの画質項目を数値化して比較することで、レーザー走査光学系の設計品質を評価した。画質評価の例として濃度ムラが顕著なシミュレーション結果をFig. 1に示す。

3.1 濃度ムラ(周期スジ)

周期的なスジ状のムラの強さを評価する。Fig. 1 (a)にシミュレーション結果として得られた画像と、Fig. 1 (b)精度確認のため同等条件で実機出力した参考実験画像を示す。本報告では濃度ムラ(周期スジ)の強さとして、空間周波数スペクトル成分³⁾に視覚特性関数(VTF)を乗じたときの最大値で評価した(Fig. 1 (c))。

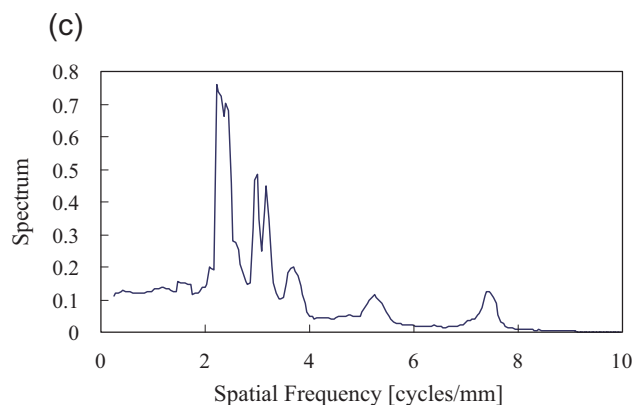
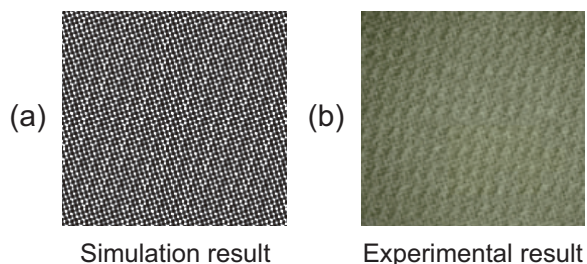


Fig. 1 Example of density fluctuation. (a) is a simulated image which reproduced an error of polygon mirror shown as (b). (c) is a spectrum value of (a) in consideration of visual transfer function VTF.

3.2 粒状性⁴⁾

粒状性を評価する値として、明度成分変動を考慮したLightnessNoise (LN) が挙げられる。ここではシミュレーション画像のLN値を比較し、評価した。

3.3 色差

色差で色空間の変動を評価した。標準設定と定めた条件のシミュレーション結果に対して、誤差を付与した条件のシミュレーション結果との間で、CIEDE2000の色差 ΔE_{00} を算出した。

4 品質工学・直交表の導入

画質に影響を及ぼす要因を効率良く個別に評価する必要があるため、品質工学の直交表割付の手法を利用した。1, 2章で述べた目的に従い、開発の初期段階で議論される仕様値などを制御因子とし、量産工程で管理される製造誤差や動作精度などのばらつきを誤差因子とした。

4.1 評価因子

レーザー走査光学系で求められる設計パラメーター(制御因子)として、以下のA~Hに注目した。

Table 1 Control factors for L18 orthogonal array.

Factor	Description	Levels		
		1	2	3
A	Screen type	Dot	Line	-
B	Developing bias	Low	Middle	High
C	Screen ruling	Coarse	Medium	Fine
D	Number of laser beams	Default	1.5 times	twice
E	Number of polygon mirror facets	Small	Default	Large
F	Gamma	Low	Default	High
×				
G	Density of input image	Low	Medium	High
×				
H	Color	Mono color (C,M,Y,K)	Process black (3C)	Full color (4C)

Table 2 Noise factors for L18 orthogonal array.

Factor	Description	Levels		
		1	2	3
a	Laser beam diameter	Large	Small	-
b	Developing bias	Default	High	Low
c	LD pitch error in main scanning direction	Type-c1	Type-c2	Type-c3
d	LD pitch error in sub scanning direction	Type-d1	Type-d2	Type-d3
e	Delay between polygon mirror facets in main scanning direction	Type-e1	Type-e2	Type-e3
f	Phase pattern of factor "e"	Type-f1	Type-f2	Type-f3
g	Shift between polygon mirror facets in sub scanning direction	Type-g1	Type-g2	Type-g3
h	Phase pattern of factor "g"	Type-h1	Type-h2	Type-h3

- A : スクリーンの線種設定 (Line, Dot)
- B : 現像バイアス設定
- C : スクリーンの線数設定
- D : ビーム数
- E : PM形状 (面数)
- F : 階調補正係数 (γ 補正/最高濃度調整)
- G : 入力画像濃度
- H : 色 (単色 CMYK, 混色 CMY, 混色 CMYK)

製造誤差や動作精度に関わる因子(誤差因子)について、a~hに注目した。

- a : LDビーム径の変動
- b : 現像バイアスの変動
- c : LDに起因した主走査方向のビーム位置ずれ
- d : LDに起因した副走査方向のビーム位置ずれ
- e : PMに起因した主走査方向のビーム位置ずれ
- f : PMの面で因子eが発生する周期
- g : PMに起因した副走査方向のビーム位置ずれ
- h : PMの面で因子gが発生する周期

Laser beam No.	Factor c			Factor d		
	Type-c3	Type-c2	Type-c1	Type-d3	Type-d2	Type-d1
1						
...						
n						

Fig. 2 Factor model of "c" and "d".

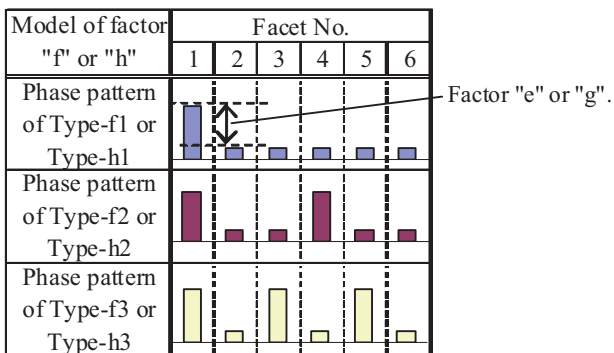


Fig. 3 Factor model of "e" and "g" in case of 6 facets polygon mirror.

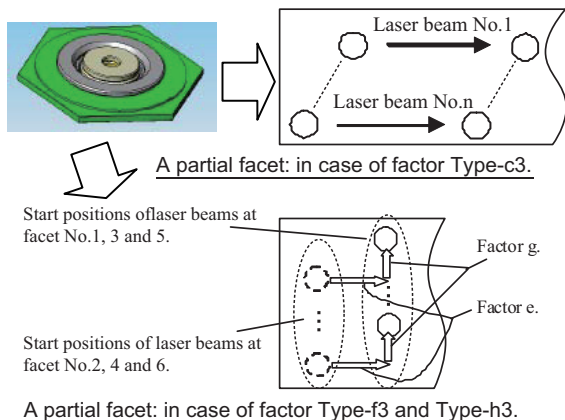


Fig. 4 Factor model of 6 facets polygon mirror.

4.2 直交表

4.1に挙げたA~Hの制御因子と、a~hの誤差因子を、それぞれL18直交表に割り付けて、L18×L18の直積実験を行い、各因子の影響をSN比で把握することを考えた (Table 1, 2)。誤差因子c~hの水準は、Fig. 2, 3, 4に示す設定とした。Fig. 2に直接的なビーム位置ずれに関する因子c, dの水準を示す。Fig. 3にはポリゴンミラーの誤差に起因したビーム位置ずれに関する因子e, gと、面ごとの位相に関する因子f, hについて、6面ポリゴンミラーを仮定した模式図を示す。さらにFig. 4で、6面ポリゴンミラーの走査例を示す。

このとき、Table 1の要因GとHに関しては総当たりで確認を行い、18×18×3×6 (4単色+2混色) = 5832の実験を行った。個々の水準に関しては、設計標準的な値や、量産工程で管理している値の他に、現時点の測定実験では効果確認ができていない値や、新規部品又は生産技術開発の必要がある値も必要に応じて盛り込んだ。

実際にこれらの条件についてユニット作成を行い試験することを考えた場合、複数の熟練者が1ヶ月以上の工数を費やすことが容易に想像できるが、本報告のようなシミュレーションと品質工学を併用する手法により、1人で1ヶ月かからずに実施できた。

5 評価結果

L18×L18実験で、4Cの中間濃度を選択したときの実験結果をFig. 5に示す。各画質評価項目のSN比を比較することで、どの因子がどの程度影響を及ぼす可能性があるかを確認できる。

Fig. 5 (a)に周期スジの要因効果を示す。B以外全ての因子でSN比の変動が見られた。

Fig. 5 (b)に粒状性(LN値)の要因効果を示す。粒状性に関して大きな変動は見られなかった。因子A, D, Fに若干の線形変化の傾向が見られたが、有意なものかどうか見極めるにはさらに詳細な確認が必要と考える。

Fig. 5 (c)に色差 ΔE_{00} の要因効果を示す。経験的にBの因子が色差に影響することは把握していたが、Dの因子も比較的大きな影響を及ぼす可能性のあることが分かった。

6 考察

周期スジは各因子が持つ特定周波数成分の誤差が重なり、強調されることが原因と考えられる。Fig. 5 (a)でB以外の因子は周期性の要素を持ち、水準に応じた周期変動が直接的に画質へ影響していると考えられる。製品開発初期の仕様決めの際に、大きな周期スジの原因となる因子を予め確認し、大きな画質劣化につながることはない設計構成にすることが重要と言える。

粒状性に関して、Fig. 5 (b)で全般的に大きく変動する因子がない理由を2点、推測した。まず、スクリーン線

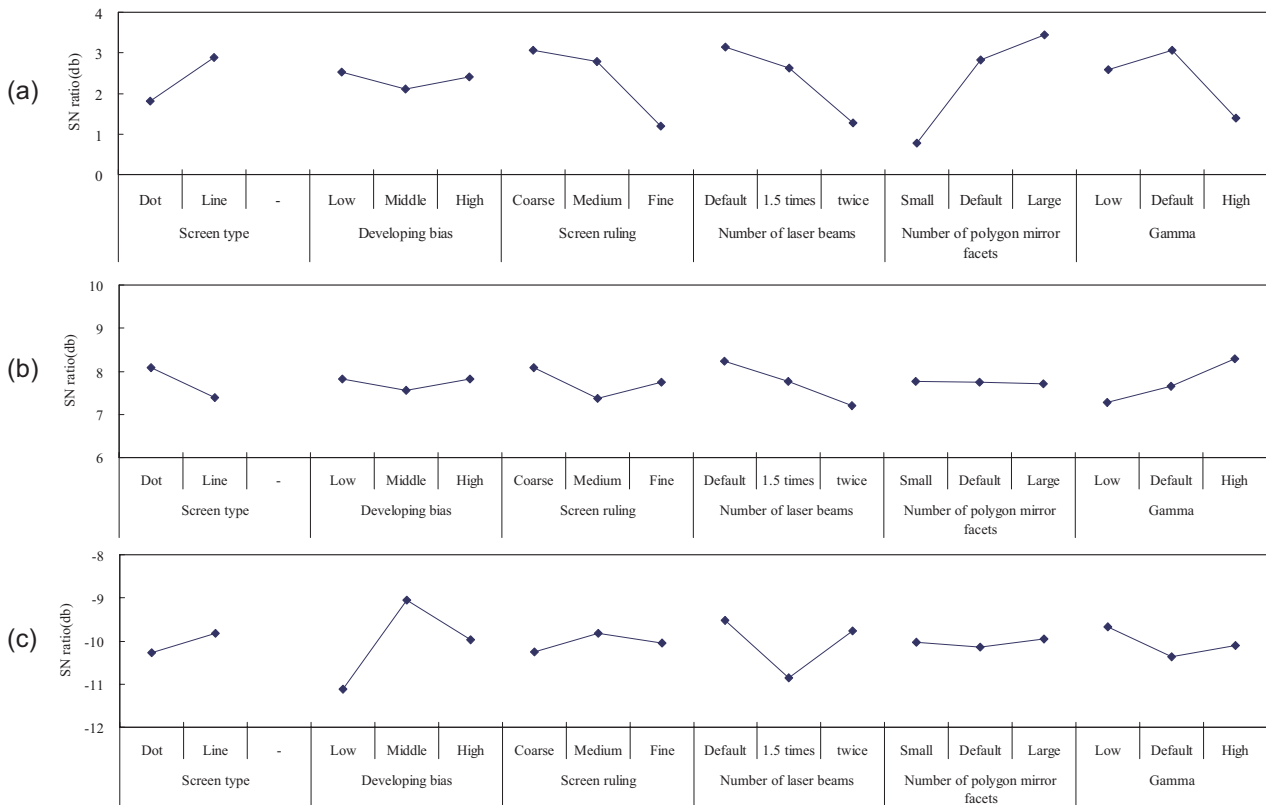


Fig. 5 Factorial effect plots of simulation results using L18xL18 orthogonal arrays. Factorial effects are plotted by SN ratio. The factor effects are representing nominal-is-best response: (a) the density fluctuation, (b) the graininess and (c) the color difference.

数の因子が170～300線／inchの比較的高線数を用いており、与えた誤差に対して高周波成分の変化が多くなったために、粒状性への影響が少なくなったと考えられる。そして4Cの混色は、紙白が比較的小さくなるため、結果的に明度成分変動(∝LN値)が抑制される傾向にあることが原因と推定した。

色差に関して、Fig. 5 (c)で直接濃度に影響する因子B(現像バイアス設定)だけでなく、因子D(ビーム数)の影響も比較的大きい。例として、ビーム数が異なる影響を確認できる実験のシミュレーション画像をFig. 6, それらに対応した画像評価値をTable 3に示す。

ここで、直交表の実験番号に応じて、例えば制御因子の実験番号2(S2)で、誤差因子の実験番号1(N1)のシミュレーション結果をS2N1と表記する。また、N0は誤差のない理想的な状態のシミュレーション結果を表す。

Fig. 6は(a), (b), (c)にS2N0, S2N1, S2N18の結果、(d), (e), (f)にS15N0, S15N1, S15N18の結果を表す。尚、N1～N18の平均値と比較した場合、ビーム数の多いS2実験は $\Delta E_{00ave} = 4.3$ 、ビーム数の少ないS15実験は $\Delta E_{00ave} = 2.4$ となった。

Table 3より、S2とS15のN0からN1への変動は各画質評価値において、傾向とオーダー共に同等に見える。しかし、N1からN18への変動では大きく異なり、S2の場合は色差の増大と同時に、粒状性と周波数スペクトルの増大も確認できる。それに対し、S15の場合、色差は低下し、一方で粒状性と周波数スペクトルの増大はS2より

少ない。このことから、ビーム数の影響を受けて周期スジと粒状性が悪化することで、色差に悪影響が出ていたと推察する。

これらの様な知見を実機試作前から設計者にフィードバックすることで、製品化上流でのさらなる品質の作りこみを推進することができる。

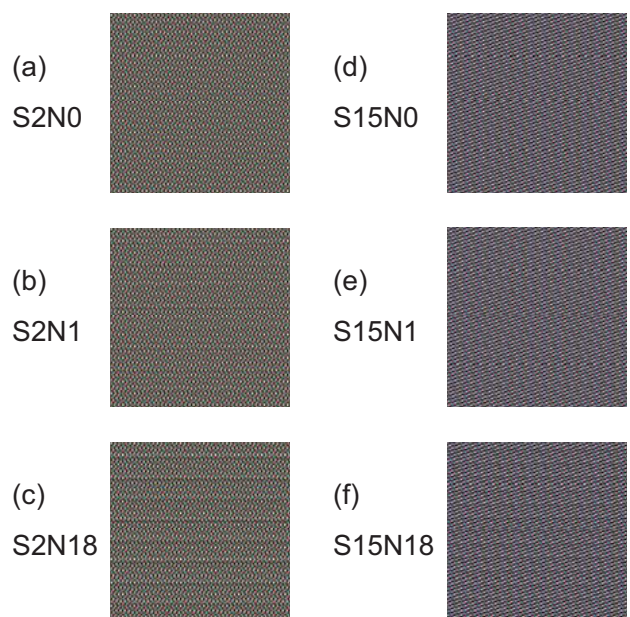


Fig. 6 Simulation results, (a), (b) and (c) are numerical experiments of dot screens. (d), (e) and (f) are numerical experiments of line screens.

Table 3 Calculated values of Fig. 6 conditions.

No.	Spectrum peak	Lightness Noise	Color difference ΔE_{00}
S2N0	0.19	0.27	-
S2N1	0.29	0.33	3.0
S2N18	0.76	0.47	5.0
S15N0	0.52	0.29	-
S15N1	0.58	0.33	3.1
S15N18	0.65	0.41	0.9

7 まとめ

画像シミュレーションと、品質工学を組み合わせ、L18×L18直交表を利用することで、開発初期の設計条件から量産工程のばらつき誤差までの要因を含んだ画像評価を実施した。レーザー走査光学系を対象に、3つの画像評価項目に対する機能特性をSN比で評価し、各因子の要因効果を確認した。各条件(仕様)の画質評価項目やロバスト性を確認することで、設計品質の評価を行った。

今後の課題は、これまで実施してきた開発/生産現場への個別支援から、さらに上位の製品開発フローへの適用を目指し、組織的にこのような品質評価技術を活用する仕組みづくりが必要と考える。

●参考文献

- 1) 香川敏章, 牧浦尚, 中野暢彦, 豊島哲朗: “1200dpi画像形成技術の開発”, シャープ技報第76号, pp.46-51 (2000).
- 2) 伊藤, 近藤, 石毛, 牧野: Imaging Conference JAPAN 2010 論文集, pp.11-14.
- 3) Y. Hirose, T. Inagaki, T. Tanaka and H. Ogatsu: Image Noise Evaluation Method for Xerographic Prints of Digitized Image, Japan Hardcopy 1988, pp. 189-192 (1988).
- 4) 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 第39巻2号, pp.20-29 (2000).

●出典

本稿は日本画像学会“Imaging Conference JAPAN 2011”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。