

解説

デジタル画像のハードコピーと画質

三宅 洋一

千葉大学工学部画像工学科 〒260 千葉市弥生町 1-33

(1987年10月1日受理)

Image Quality and Hard Copy of Digitized Images

Yoichi MIYAKE

Department of Image Science and Engineering, Faculty of Engineering, Chiba University,
1-33, Yayoi-cho, Chiba 260

1. はじめに

画像、図形処理機能をもったパーソナルコンピュータ、ワードプロセッサや電子スチルカメラの普及に伴って CRT に表示された画像（ソフトコピー）をフルカラーハードコピーとする需要が増大し、レーザープリンター、インクジェットプリンター、サーマルプリンターなどいわゆるデジタル画像ハードコピーシステムが活発に研究、開発されている¹⁾。これらのハードコピーでは、写真、印刷とは異なって、画像をいったん時系列信号とした後なんらかの画像処理を施して画像記録することが行なわれる。本論文では、これら各種ハードコピーシステムについて簡単に説明し、次にこれらのシステムにより得られるデジタル画像の解析、画質について著者の研究を中心に解説する。

2. 各種ハードコピーシステム

デジタルハードコピーはシステムとしては光プリンター、インクジェットプリンター、感熱プリンターに分類することができる。これらのおのおのについて簡単に説明する。

2.1 光プリンター

光プリンター²⁾は CRT 画像を銀塩フィルム上に直接記録するもの、フライングスポットチューブを用いて光ビームを振らせるもの、LED やレーザーを光源として 1 画素ごとに銀塩フィルムあるいは電子写真に記録する方法が開発されている。

CRT を直接写真撮影する方式は、良好な画像がイン

スタントカメラを用いて簡便に得られるため最も広く用いられている。この種の装置では表示用の CRT を撮影するものと撮影用の CRT を別にしたものがある。後者の方式は画質の向上を図るためラスタイレーズを行なうなどの工夫がなされており高画質の画像が得られる。またカラー画像は、白色発光する CRT 上に R, G, B 分解像を順次出力し R, G, B フィルターを通してフィルム上でカラー画像を合成する方式が多い。3 個の CRT を使用して 1 回の露光で済ますトリニスコープ方式も開発されている。

現在最も高画質の画像は、レーザープリンターにより銀塩フィルム上に画像を出力する方式で得られる。しかしレーザープリンターは高価でシステムも大きいため印刷用のハーフトンドットプリンターを除いてはあまり普及していない。図 1 はテレビ画像から新聞印刷を行なうことを目的として行なった実験例³⁾で、NTSC の Y 信号を補間処理しレーザープリンター (Tritec 7500, Ar レーザー使用, サカタインクス) により 65 および 150 線/inch の網点線数で出力した画像である。なお、補間は cubic convolution method によっている。階調のある高画質の画像が得られている。

LED プリンターは LED の集積化技術の進歩が著しく小型で非常に高画質の画像が得られるようになった。Ar や He-Ne レーザーを用いたプリンターと置き換えることも予想されている。最近発表されたフジックスピクトログラフィー 1000 は Y, R, IR の 3 個の LED からドナーフィルムと呼ばれる新しく開発された熱現像転写感光材料へ露光し、およそ 90°C に加熱現像し受像

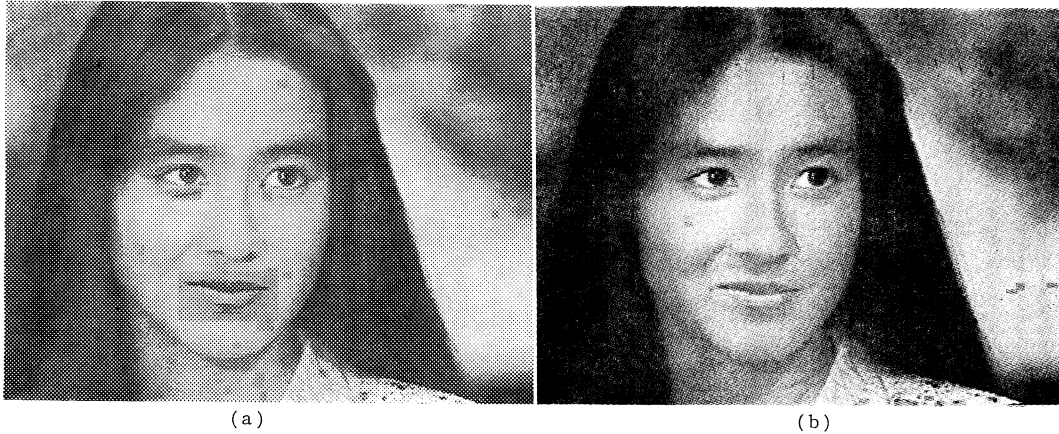


図1 レーザープリンターを用いたテレビ画像の出力例
(a) 網点線数 65 線/inch, (b) 150 線/inch

シートに画像を転写するものできわめて良好なカラー画像が得られる。

2.2 インクジェットプリンター

インクを記録紙に噴射する方式によって、(1)コンテニューアス型、(2)間欠型、(3)オンデマンド型が開発されている^{4,5)}。(1)はインクに高い圧力をかけて画像信号の大きさに対応したインクを連続的に噴射させるものである。(2)はインクに高電圧を印加し静電気力でインクを噴射させる方式である。一方、(3)は圧電素子を用いて一定量のインクを圧力が生じたときだけ噴射するもので構造が簡単であるため現在もっとも広く開発されている。しかし、後述するように1,0により階調を表わす必要があるため画像の変調にいろいろな工夫が必要である。

インクジェットプリンターは画像の大小にかかわらず画素の大きさが変化しない。このような特徴を生かして最大 7m×16m の画像を描画する壁面広告用プリンター⁶⁾も開発されている。

2.3 感熱プリンター

画像信号をサーマルヘッドを用いて熱パルスに変換し画像の記録を行なうプリンター^{7,8)}である。感熱紙を用いて熱エネルギーを画像化する直接方式とインク、染料を溶融あるいは昇華させ紙に転写する方式がある。前者は、感熱紙を用いるため保存性やカラー化などに問題が多いが、プリンターの構造が簡単であるためファクシミリなどの文字出力を中心に広く用いられている。

一方、後者の方式のうち溶融転写によるものは感熱固体インクの薄膜をベースに塗布したインクリボンにサーマルヘッドのオン、オフ信号により溶融し普通紙に転写する。したがって、オンデマンド型インクジェットプリ

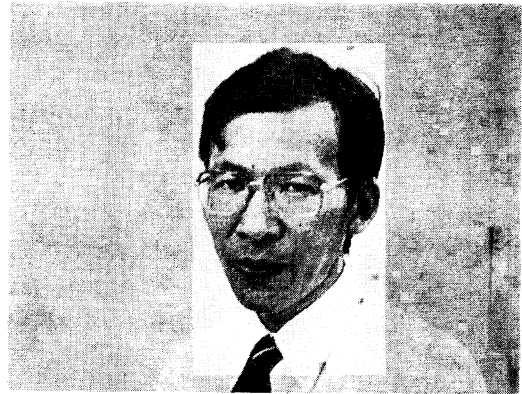


図2 CCD カメラと感熱プリンターによる画像の例 (原画像はカラー)

ンターと同様階調を表わすため多値画像から2値画像への変換が必要である。カラー化はc, m, y 3枚のインクリボンを用いることで容易に実現できる。

昇華型染料を用いる方式ではサーマルヘッドに入力したエネルギーに比例した染料を気化し画像形成を行なうため画像を2値化する必要がなく64階調程度の記録が可能である。溶融転写、昇華染料による画像はインクジェット画像のような大きな画像を作ることには向かないが比較的良好的な画質が得られる。図2に電子カメラで撮影して溶融転写により出力した画像の一例を示す(原画像はカラーである)。

3. 階調の再現法

銀塩写真を用いるCRTプリンターや連続階調の記録が可能な昇華型感熱プリンター、コンテニューアス型インクジェットプリンターを除いて多くのプリンターはドッ

0	8	2	10
12	4	14	6
3	11	1	9
15	7	13	5

(a)

10	4	6	8
12	0	2	14
7	9	11	5
3	15	13	1

(b)

13	7	6	12
8	1	0	5
9	2	3	4
14	10	11	15

(c)

図3 代表的な4×4 ディザマトリクス
(a) Bayer マトリクス, (b) Half-tone マトリクス, (c) Screw マトリクス

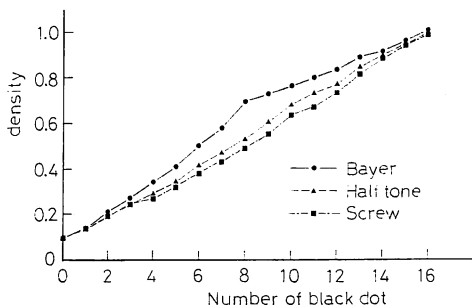


図4 3種のマトリクスによる再現濃度とオンとなるドット数の関係

トの集合により階調を表現⁹⁾している。これは、視覚のバンドパス特性を利用したものでドットの配列に工夫がなされディザ法、濃度パターン法などの手法が広く用いられている。このなかで最も広く使われている組織的ディザ法について簡単に説明する。

ディザ法はディザマトリクス D_{ij} を閾値として入力画像の2値化を行なうものである。すなわち、

$$g(x,y)=1 \quad f(x,y) \geq D_{ij} \\ =0 \quad \text{otherwise} \quad (1)$$

として2値化する。

ここで、ディザマトリクス D_{ij} をどのように決めるかが擬似中間調画像の画質に大きく影響する。それゆえ、数多くのマトリクスが提案されている。図3にそれらのうちの代表的な4×4のマトリクスである Bayer 型、網点型 (half-tone)、渦巻型 (screw) マトリクス¹⁰⁾を示す。

図4はこれらのマトリクスを用いてオンデマンドインクジェットプリンター (SHARP IO-0700) により17レベルのグレイスケールを出力してその反射濃度と1となるドット数との関係を示したものである。インクが紙へ付着するさいの非線形性のためマトリクスにより階調特性が異なることがわかる。図5はこれら3種のマトリクスのオンとなるドット数8におけるグレイ部分の拡大写真である。マトリクスによりドットの配列が大きく異なっていることが理解できよう。このようにドットごとに閾値処理を行なう組織的ディザ法他入力画像の小領域 (通常は4×4) の平均値と閾値を比較する濃度パターン法、隣接する画素の情報を考慮して閾値処理を行なう条件付決定形ディザ法、閾値を2個用いた3値中間調画像等も提案されている。

インクジェットプリンターでは一つのドットの大きさは100~200 μm 程度のものである。したがって、マトリクスを大きくすればドットの粗さが目立つため17レベル以上の階調を表わすことは困難である。これに対して感熱プリンターでは8 dots/mm 程度の解像力を持ちマトリクスを大きくできるため階調を増やすことが可能である。それゆえ、階調、鮮鋭度ともインクジェット画像よりはるかに優れた画像を出力できる。

視覚が弁別できる階調数 L は空間周波数 f が高くな

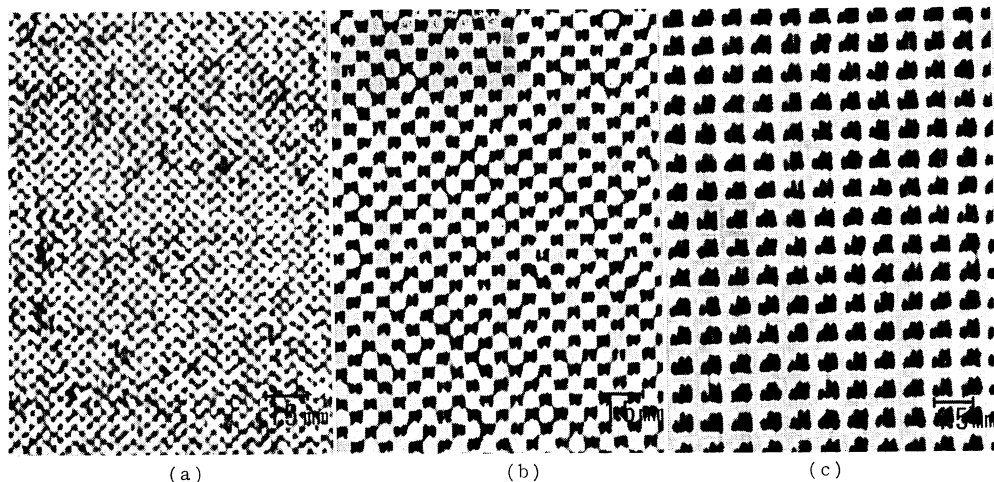


図5 オンとなるドット数8におけるグレイ画像の拡大写真

表 1 画質評価のための物理的パラメーター

1. 階調	濃度 (平行光濃度, 拡散光濃度, 積分濃度, 分析濃度, 視覚濃度, 等価中性濃度, 焼付け濃度, 三色濃度など), 調子再現曲線, 特性曲線, フレア曲線, ガンマ, コントラスト, 有効露光域, 濃度ヒストグラム, ドットゲイン
2. 鮮鋭度	解像力, アクュータンス, PSF, LSF, MTF, CTF, SQF, インフォメーションボリウム, ナイキスト周波数, 帯域幅, 走査線密度, スクリーン線数
3. 粒状, ノイズ	RMS 粒状度, Selwyn 粒状度, Callier 係数, ACF, Wiener スペクトル, モワレ, ドットゲイン, エリアジング, S/N
4. 色再現	色度値 (XYZ, xyz, uv, $U^*V^*W^*$, $L^*a^*b^*$, $L^*u^*v^*$ など), マンセル値, カラー濃度 (分光濃度分布, RGB 濃度など), 色差, 主波長, 色再現域
5. 歪曲	伸び, 縮み, 歪曲収差
6. 総合的なものおよび感度に関するパラメーター	エントロピー, 情報容量, 情報スペクトル, ISO, ASA, DQE, NEQ, 量子効率, 分光感度

れば少なくなる。これらの間には

$$L = 1010(e^{-0.138f})(1 - e^{-0.1f}) + 1 \quad (2)$$

の関係があることが報告¹¹⁾されている。この式に従えば、 $f=1.0$ line/mm ではおおよそ 64 レベルの階調が識別できることになる。4×4 のマトリクスによる擬似中間調画像では 17 レベルの階調が再現できるにすぎないから画質の不十分さが認識できよう。

4. デジタル画像の画質

ハードコピーの画質は一般的には、階調、鮮鋭度、粒状性、色再現性により評価することができる。これらのおのおのについては表 1 に示されるようなさまざまなパラメーターが写真画像の評価のために用いられてきた¹²⁾。もちろんこれらの大部分は時系列信号により形成されるデジタル画像についても適用できると考えられる。しかし、デジタル画像の画質については十分に研究されてはいない。

デジタル画像の画質は後述する標本数、量子化レベルのほか、ハードコピーデバイス、画像処理、変換マトリクス、紙質に依存する。たとえば、図 6 は先に示したインクジェットプリンターを用いて Bayer マトリクスと 3 種の記録用紙 (H: 上質紙, F: 中質紙, D: 普通紙) により 17 レベルのグレイスケールを出力し反射濃度とオンとなるドット数の関係を示したものである。紙質が調子の再現に大きく影響することがわかる。これはインクドットの紙への付着、浸透が紙質により異なるためである。

網点印刷においては反射濃度と網点面積率、ベタ濃度、紙質の関係は Yule-Nielsen の式から説明される。しかしインクジェット画像や感熱画像については Yule-Nielsen 式によってドットとマクロ濃度の関係を正しく表わすことができない。われわれは、ベタ濃度とドットの面積率をオンとなるドット数 k の関数 $D_s(k)$, $s(k)$ として Yule-Nielsen 式を変形した (3) 式をインクジェット画像のドットと反射濃度 D を表わすために提案¹³⁾し良い結果を得ている。ここで n は紙質に関する定数である。

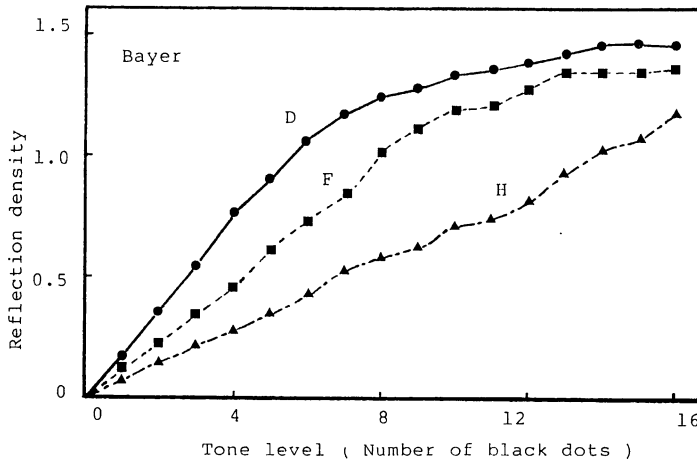


図 6 紙質 (D: 普通紙, F: 中質紙, H: 上質紙) による調子再現の違い

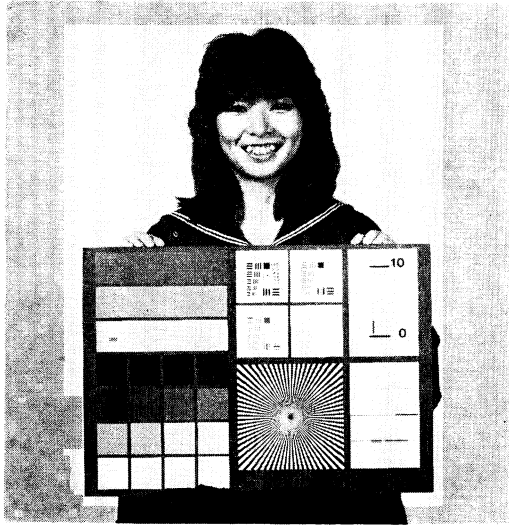


図7 画質評価のためのチャート

$$D = -n \log \{1 - s(k)(1 - 10^{-D_s(k)/n})\} \quad (3)$$

一方、図7はデジタル画像の画質を評価するためわれわれの研究室で開発した画質評価のためのチャート¹²⁾である。チャートは、16レベルのグレースケール、c, m, y, BLインクで記録された平行線チャート、ジーマンスターチャート、幅5mmの直線、反射濃度(0.47, 0.66, 0.83)の3段階グレー色票で構成されている。またカラー画像の評価ではここにマクベスのカラーチェッカーを加える。これらのチャートから、表1に示された各種物理的パラメーターのうち入出力階調特性(特性曲線)、

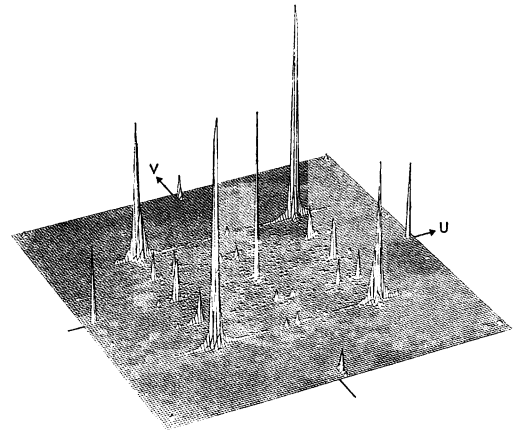


図8 Bayerマトリクスによるインクジェット画像のWienerスペクトル(オンとなるドット数は8)

LSF, 解像力, 解像力の方向性, MTF, RMS粒状度, ACF, Wienerスペクトル, 色度値が測定できる。またMTFはLSFのフーリエ変換から計算できる。しかし、デジタル画像では写真画像のように等方向性が成立しないため方向によるMTFの差異についても考慮する必要がある。

一般にRMS粒状度による評価ができるのはノイズが白色(ホワイトノイズ)に近い場合である。しかしデジタル画像のノイズは図5に示したような周期性をもつためRMS粒状度よりもWienerスペクトルによる解析が有効である。図8はBayerマトリクスを用いた

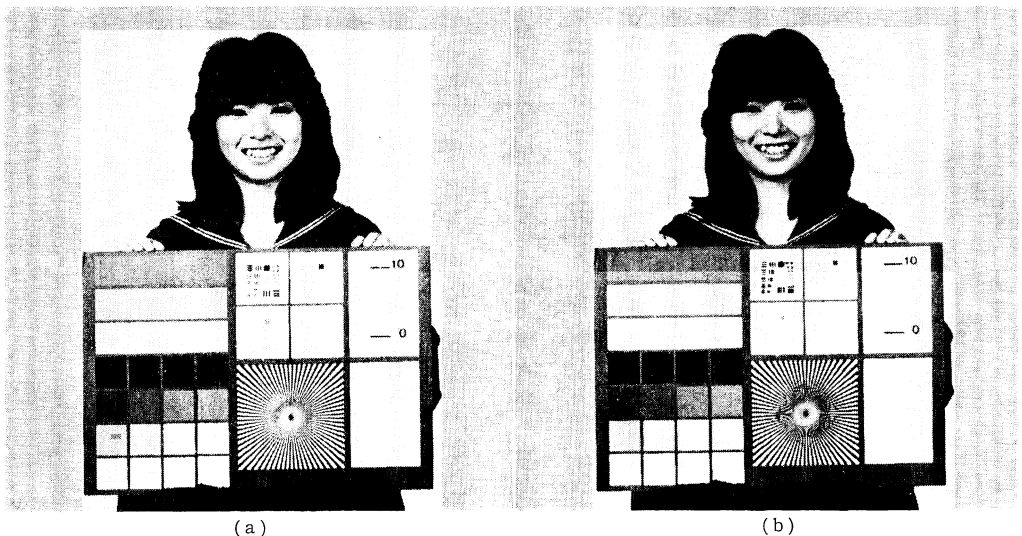


図9 図7のデジタル画像の例(量子化レベルは8ビット)
標本数: (a) 920×900, (b) 460×450

インクジェット画像においてオンとなるドット数が8であるグレイ画像の自己相関関数のフーリエ変換から求めた Wiener スペクトルである¹⁴⁾。このような周期性をもつ粒状構造は写真画像と根本的に異なることに注意すべきである。

一方、良く知られているようにデジタル画像の総合画質は標準化数 $M \times N$ と量子化レベル Q 、情報容量 ($C = MN \log_2 Q$ bits) に依存する。 C と画質の関係はしばしば論じられているが十分な解析はなされていない。われわれは図7の画像を標本数4種 (920×900, 460×450, 184×180, 92×90点)、量子化レベル数8種 (8 bits から1 bit) 変化させた B/W およびカラー画像それぞれ32枚を光プリンターを用いて作成し(4)式により定義した評価関数 DQF (digital image quality function) を用いて画質評価を試みた。その結果 DQF と主観評価値との間に高い相関が得られた^{15,16)}。評価に用いた B/W 画像の一例を図9に示す。

$$DQF = (DQF 1)^2 \cdot \log_2 (DQF 2) \quad (4)$$

$$DQF 1 = \int_0^{NF} MTF_s(u) \cdot MTF_v(u) d \log u / \int_0^{10} MTF_v(u) d \log u \quad (5)$$

$$DQF 2 = D / (D/Q + 2\sigma) \quad (6)$$

ここで NF: 標準化におけるナイキスト周波数, Q : 量子化レベル, σ : 記録フィルムの RMS 粒状度, D : システムが再現できる濃度範囲, $MTF_s(u)$, $MTF_v(u)$ はそれぞれシステム, 視覚系の MTF である。このように DQF は画像の情報容量, ナイキスト周波数および佐柳, Biedermann, Granger ら¹⁷⁾ による写真画像の評価式を考慮して定められている。DQF は光プリンターによる連続階調をもつデジタル画像では主観評価値と高い相関を得たが, ドットで階調を表わす擬似中間調画像へ適用する場合, ドット画像における MTF の定義, 方向性, 位置依存性, 粒状の定義など今後検討すべき問題が数多く残されている。

5. ま と め

デジタル画像のハードコピーについてシステムおよびその画質について概説した。デジタルハードコピーシステムの開発には電気, 光学, 写真などきわめて多くのメーカーが参入しており現在最も競争の激しい分野である。しかしながら, おびただしく市販されている各種システムにより得られる画像の画質評価に関してはその測定基準さえも定められていないのが現状である。今後よ

りよいハードコピーを得るためにはより基礎的な画質評価の研究が重要であろう。

デジタルハードコピーシステムは, 1987年で第4回を迎えたノンインパクトプリンティングシンポジウム (電子写真学会主催, 日本写真学会, 画像電子学会, 日本印刷学会協賛) に毎年多くの新製品が紹介されるのでシステムの動向の詳細はそれらの文献¹⁸⁾を参考にさせていただきたい。

文 献

- 1) 大野 信: “ハードコピー化技術の動向”, テレビジョン学会誌, **37** (1983) 520-526.
- 2) 卜部 仁: “銀塩ハイブリッド方式プリント”, 日本写真学会誌, **50** (1987) 55-60.
- 3) Y. Miyake, M. Fukumoto, *et al.*: “A new interpolation algorithm of television pictures for compact printing system,” *Proceedings of Hybrid Imaging Systems* (Rochester, 1987) pp. 17-20.
- 4) 前田淳次: “インクジェット記録方式”, テレビジョン学会誌, **38** (1983) 540-545.
- 5) 宇田川善郎: “インクジェットプリンター”, 日本写真学会誌, **50** (1987) 40-46.
- 6) 麗 昭夫, 菅野義光, ほか: “壁面広告用フルカラージャンボファクシミリ”, 第3回ノンインパクトプリンティング技術シンポジウム論文集 (1986) pp. 25-28.
- 7) 岩本明人: “転写形熱転写記録方式”, テレビジョン学会誌, **38** (1983) 527-539.
- 8) 高島祐二: “カラー熱転写記録”, 日本写真学会誌, **50** (1987) 40-46.
- 9) 小寺宏暉: “ハードコピーにおける階調, 色再現の手法”, テレビジョン学会誌, **38** (1983) 546-552.
- 10) H. Kinoshita, Y. Miyake, *et al.*: “A new evaluation method of image quality of digital half tone images obtained by ordered dither method,” *J. Imag. Technol.*, **10** (1987) 181-185.
- 11) P. G. Roetling: “Visual performance and image coding,” *Proc. SPIE*, **74** (1976) 195-198.
- 12) 三宅洋一: “写真を中心としたハードコピーの画質”, メディアミックス時代における画質の評価 (光学技術協会, 1985) pp. 42-74.
- 13) Win Naing, Y. Miyake, *et al.*: “Analysis of tone reproduction characteristics of inkjet images,” *J. Imag. Technol.*, **14**, **1** (1988) in print.
- 14) ウイン・ナイン, 三宅洋一, ほか: “オンデマンドインクジェット画像の粒状度測定”, 日本写真学会誌, **50** (1987) 188-194.
- 15) Y. Miyake, S. Inoue, *et al.*: “An evaluation of image quality for quantized continuous tone image,” *J. Imag. Technol.*, **12** (1986) 25-34.
- 16) Y. Miyake, Y. Tamoto, *et al.*: “An evaluation of image quality for quantized color images with different information capacities,” *Acta Polytech. Scand.*, No. 149 (1985) 64-67.
- 17) E. M. Granger and K. N. Cupery: “An optical merit function (SQF) which correlates with subjective image judgements,” *Photogr. Sci. Eng.*, **16** (1972) 221-230.
- 18) ノンインパクトプリンティングシンポジウム論文集, 第1回 (1984)-第4回 (1987).