昇華性染料感熱転写方式による電子スチルカメラ用カラーハードコピー装置

正会員 半 間 謙太郎[†], 後 藤 敏 彦[†]
白 石 幹 夫[†]

あらまし 昇華性染料を用いた電子スチルカメラ用ハードコピー装置の試作につき、主に連続階調表現の観点から実験、解析した結果を述べた。安定な連続階調印画には、感熱ヘッドの入力電力、基板温度、印写ドラムとの位置、押圧が重要なパラメータであることを明らかにし、これらと印写濃度との関係を実験、解析により定式化した。試作装置の印画画質は、色の再現性、階調特性（各色 64 階調）共にモニタテレビ画面にほぼ対応したものであった。一方、印画サイズを手札判相当（80×98 mm）とし、分解能を 6 本/mm としたので、明視距離では走査線構造も目立たず、解像感のあるハードコピーが得られた。カラー化は黄、マゼンタ、シアン 3 色面順次方式で行い、絵素数は各色 480 (V)×512 (H) とした。プリント所要時間は約 1 分である。

1. ま え が き

電子スチルカメラは従来の銀塩フィルムの代りに、超小型の磁気シートから成るビデオフロッピーに撮影画像を記録し、モニタ画面上に即時に再生できるという全く新しい考え方のスチルカメラであり、固体撮像技術と高密度磁気記録技術を基盤としている¹⁾²⁾。

本報告は、この電子スチルカメラの撮影ビデオ信号を入力し、必要に応じてカラーハードコピー化する装置に関するものである。文字あるいは図形の印写を主目的とするプリンタと、ビデオ信号を高画質に印画するいわゆるピクトリアルハードコピー用のプリンタの最も大きな相異は、後者が忠実かつ高品質の連続階調の調子再現を要求されることにある。連続階調印写を実現する方式にはいろいろの方式³⁾が知られており、従来の銀塩写真技術を応用するもの、インクジェットや感熱溶融転写インク等を用いて発色面積を制御するもの、あるいは本報告のように昇華性染料を塗付したカラーインクシートを用い、感熱ヘッドで染料インクの昇華量を制御する方式⁴⁾⁵⁾等が知られている。発色面積で連続階調表現をする方式は、解像度を一定とすると、表現したい階調数を増すにつれて画像の 1 絵素

に割当てる印写ドットの線密度と線数を増加せざるを得ない。これに対し、昇華性染料熱転写方式は、感熱ヘッドの発熱ドット毎に印加エネルギーを制御して連続階調を表現できる。したがって、面積階調方式に比べて数分の 1 以下の線密度の感熱ヘッドを用いて画像として好ましい階調かつ解像力のプリントが得られ、特に印画サイズの小さなピクトリアルハードコピー装置に適した方式といえる。

本論文は、この昇華染料熱転写方式のビデオプリンタの試作を、主に安定な連続階調表現の観点から実験、解析した結果を述べたものである。試作したプリンタは、電子スチルカメラの規格である水平解像度 350 TV 本の映像信号入力に対し、明視距離で写真様の解像感と調子再現を得ることを意識して印画サイズ 80×98 mm（解像度 6 本/mm）、絵素数 480（垂直）×512（水平）個とし、各絵素につき黄、マゼンタ、シアンの各色を 64 段階で連続階調表現させた。印画所要時間は約 1 分である。

2. 印写条件の検討

2.1 昇華性染料熱転写方式

昇華性染料熱転写方式の原理を図 1 に示す。入力ビデオ信号の振幅に対応した電流パルスが感熱ヘッドの発熱素子（抵抗体）で熱エネルギーに変換され、インク紙のインク層を加熱する。加熱されたインク層の昇華性染料は気化して受像紙の受容層に転写して固着する。この場合、感熱ヘッドに入力するエネルギーに対

[†] 株式会社日立製作所 家電研究所
"Color Hard Copy Equipment for Electronic Still Camera System with Sublimation Dye Thermal Transfer Method"
by Kentaro Hanma, Toshihiko Goto, and Mikio Shiraishi
(Consumer Products Research Center, Hitachi Ltd., Tokyo)

図1 昇華性染料熱転写方式
Principle of sublimation dye thermal transfer method.

応して昇華し、転写固着するインクの量が増減するので、発熱ドット毎の階調表現ができる。この場合、転写されたインクの反射濃度は、インク紙および受像紙の特性、感熱ヘッドの特性と駆動条件、感熱ヘッドとドラムの押圧力等に大きく依存する。したがって、安定かつ高効率な連続階調印写を行うための条件を求めることが不可欠である。実験には、インク紙として背面を耐熱処理した厚さ $6\mu\text{m}$ のポリエチレンテレフタレート (PET) フィルムにシアン、マゼンタ、黄の分散染料を結着剤と共に各々面順次塗付 (厚さ約 $1\mu\text{m}$) したものをを用いた。受像紙は厚さ $150\mu\text{m}$ の合成紙を基紙とし、これに厚さ $5\sim 6\mu\text{m}$ のポリエステル系の受容層を塗付したものである。感熱ヘッドは分解能 6本/mm の薄膜ラインヘッド (512 素子) をを用いた。

2.2 濃度のヘッド印加電圧依存性

図2に印写の濃度測定例を示す。測定にはシアンインクを用い、その補色濃度を濃度計により求めた。図中の複数の特性曲線は、ヘッドの発熱体 (抵抗値 $R\Omega$, 印加電圧 V_R) 毎の消費電力 $P_R = V_R^2/R$ をパラメータとして測定した結果である。プリンタの設計においては、特性曲線の非直線性を補正し最適な階調特性を得る必要があるが、ここでは特性曲線の直線部分に着目して濃度 D と通電時間 t_{on} との関係を形式的に係数 A , 定数 t_0 , D_0 を用いて表すと、各々の曲線について、

$$D = A(t_{on} - t_0) - D_0 \quad (1)$$

さて、(1)式をもう少し見通しの良いものとするため、濃度 D とヘッドの入力電気エネルギー $E = P_R t_{on}$ との関係として書き改める。すなわち新しい係数 $B = A/P_R$ を使って、

$$D = B(E - E_0) - D_0 = BP_R(t_{on} - t_0) - D_0 \quad (2)$$

ただし $E_0 = P_R t_0$ である。(2)式を用いて検討した結果、定数 C を用いて係数 B を、

$$B = CV_R \quad (3)$$

とヘッドの印加電圧 V_R に比例していると解釈することにより、印加電力 P_R をパラメータとして測定した

図2 濃度の印加電力依存性
Supply power dependency of optical density.

図3 係数 C と印加電圧 V_R の関係
Supply voltage dependency of density sensitivity.

複数の濃度特性曲線のどの直線部分の濃度 D をも計算できることが判明した。すなわち、(3)式を(2)式に代入して、

$$D = CV_R(E - E_0) - D_0 \quad (4)$$

(4)式から、この方式の印写濃度は、感熱ヘッドの発熱ドットへの入力エネルギーと、印加電圧の積に比例するといえる。すなわち、プリンタの設計においては、発熱体への印加電圧 V_R を可能な限り大きくして印加電力を大きくし、パルス印加時間を短縮するのが、所要印刷時間の短縮および高効率印画の両面から有利なことが判明した。発熱体への入力エネルギーを一定とし、係数 C と印加電圧 V_R の関係として図2を書き直したものを図3に示す。

2.3 ヘッド基板温度と印写の濃度

連続して何枚もの印画を行うと、画面全体の濃度が安定せず、どんどん濃くなっていく現象が見受けられた。この現象は、印写環境温度の上昇によるものと推定し、感熱ヘッドの基板温度 T_B (アルミナ基板裏面で測定) をパラメータとして濃度特性を測定した。実

図4 濃度の基板温度依存性
Base temperature dependency of optical density.

測例を図4に示す。基板温度 T_B が上昇するにつれて比例定数 C は大きくなり、常温での基板温度 T_0 に対する基準値 C_0 を用いて次の実験式が得られた。

$$C = \alpha(T_B - T_0) + C_0 \quad (5)$$

α は比例定数で、図4に示した例では $\alpha \approx 0.012$ であった。この場合、感熱ヘッドの通电時間として、例えば10msという一定の値を印加しても、基板温度が30°Cまたは60°Cであると濃度は各々0.5、1.1と約2倍も違った値となる。この違いは、本試作のビデオプリンタのごとく、制御濃度範囲0~1.8を64階調に分割して連続階調制御をする場合は約20階調の階調差に相当することになり、無視できない。一方、印画中は感熱ヘッドで平均数十Wの電力が消費されるので、1枚の画像を印画している間に数°C、多数枚の画像を連続して印画する間に数十°Cも基板温度が上昇することになり、何らかの補正手段が必須である。具体的な手段として、基板温度 T_B の上昇をヒートシンクおよび強制空冷により一定値に抑え、残りの濃度差を(3)式と(5)式を対応させることにより印加電圧に帰還させる方法などがある。この場合、基板温度 T_B の15°Cの上昇に対し、印加電圧 V_R を約1Vの割合で下げるよう制御して、基板温度に依存しないほぼ一定の濃度特性が得られる。

2.4 感熱ヘッドの発熱温度と濃度予測

以上行った濃度 D と印加電圧 V_R 、基板温度 T_B 等との関係の検討は、プリンタの設計という意味では見通しが良いが、現象の物理的理解という観点からは遠い。そこで、昇華過程に直接関連する感熱ヘッドの発熱状態を測定し、上記検討結果と比較考察することにより濃度予測する手法を検討した。ヘッドの発熱状態は赤外線温度計を用い、感熱ヘッド単体の空印字状態を非接触で測定した*。

感熱ヘッドの発熱部分の構造を図5に、通电時間に対する発熱中央部表面の温度 T のプロファイル実測値例を図6に示す。このプロファイルは、通电時間が

図5 感熱ヘッドの断面図
Cross sectional view of a thermal head.

図6 発熱温度プロファイルの一例
Temperature profile of a heating element.

数十msより短い場合、微小物体に対する非定常熱伝導⁶⁾と考えて導いた下式とよく一致した。すなわち、温度 T はヘッドに通電を行っている昇温時には、

$$T = T_{\infty} - (T_{\infty} - T_L)e^{-\tau_1 t} \quad (6)$$

また通電を終了した後の降温時は、

$$T = T_L + (T_P - T_L)e^{-\tau_2(t - t_{on})} \quad (7)$$

(ただし、 $t > t_{on}$)

の2式で表すことができる。ここに、 t は時間(sec) T_{∞} 、 T_L は各々定常状態における発熱の収束温度と最低温度、 t_{on} は通电時間、 T_P は t_{on} 秒通电した時点での発熱温度、 τ_1 、 τ_2 は、各々通电時および切電後の時定数である。本検討に用いた感熱ヘッドの場合、実測値より、ほぼ $\tau_1 \approx \tau_2 \approx 300$ と求められる。 τ_1 、 τ_2 をヘッドの構造および熱物性値から計算⁶⁾により推定すると約275となり、ほぼ実測値に合っている。

定常状態の収束温度 T_{∞} は、実測結果より、

* 昇華に寄与する熱は、厳密には感熱ヘッドの空印字の状態ではなく、インク紙等の紙の接触した状態で考えねばならない。しかしながら、受像紙の基紙部分の断熱性が大きいこと、インク紙等の熱容量が小さいことなどから、有限要素法を用いて計算によりシミュレートした限りでは、接触した状態との温度差は最大数十°C程度である。本報告では実験で測定し易い空印字状態で議論を進め、最後に実験式((11)式)の係数に含めて、温度差により生ずるずれ分を実験的に補正することを試みた。

$$T_{\infty} = T_B + \frac{1}{C_1} P_R = T_B + \frac{1}{C_1} \cdot \frac{V_R^2}{R} \quad (8)$$

の実験式にまとめることができる。すなわち、感熱ヘッドの基板温度 T_B と印加電力に比例する項の和で表すことができる。図7に示した実測値の例では、放熱係数 C_1 は約 $1 \text{ mW/}^\circ\text{C}$ であり、印加パルスのデューティ比に起因する基板温度 T_B の発熱部付近での変化を補正すると、印加電力 P_R が 0.5 W/dot 以下の領域での実測値とのずれは数%以下であった。

次に、感熱ヘッドからインク紙および受像紙への注入熱量を求める。まず、単位時間あたりの感熱ヘッドから紙への流入熱量 $Q \text{ (J/sec)}$ は、次式で表される。

$$Q = \beta_1 \Delta T \quad (9)$$

ここに、 β_1 は系の熱伝導率および寸法等により定まる定数、 ΔT は紙とヘッドの温度差であり、発熱体の温度 T と、環境の温度 T_E の差 ($\Delta T = T - T_E$) と考えられる。すなわち、紙は印写ごとに未印写部分が紙送り動作により供給されるので、その温度はほぼ T_E に等しく、かつ通電時間が数十 ms と短いので系をほぼ断熱と考えて良い。さて、この熱量 Q のうち、実質的に昇華に寄与する熱量 $Q_e \text{ (J/sec)}$ は、近似的に昇華性染料が温度 T_N で昇華を開始すると考えて

$Q_e = \beta_1 (T - T_N) = \beta_1 \Delta T_e$ 、ただし $T > T_N$ (9)' と表す。昇華に係わる総熱量 $P_e \text{ (J)}$ は、 Q_e の時間積分で表せるから、図6に示した感熱ヘッドの温度プロファイルの仮想した昇華開始温度以上の部分の面積として求められる。画像を印写する場合、通電時間のデューティ比が大きく、かつヘッドは連続パルス列で駆動されるため温度プロファイルの立ち上がり立ち下りの時定数 τ_1, τ_2 はほぼ等しくなり、近似的に、

図7 発熱体の収束温度
Finish temperature of a heating element.

$$P_e = \beta_1 \Delta T_{h \text{ ton}}, \text{ ただし } \Delta T_h = T_P - T_N \quad (10)$$

と表せる。

図8に、この熱エネルギー P_e を用いて印写の濃度 D を予測しうる可能性を検討するための実験結果を示す。同図(a)は、発熱体への印加電力と通電時間 t_{on} を変数として濃度 D を測定した例である。同図(b)は、この測定結果と(10)式の対応を調べるために、測定値を整頓して作図し直したものである。すなわち、同図(b)の横軸は、(10)式の係数 β_1 を形式的に無視した $\Delta T_{e \text{ ton}}$ とし、仮想の昇華開始温度を 120°C とした。このようにした結果、感熱ヘッドから紙に注入される熱エネルギー量 P_e と濃度 D の間には密接な関係があり、これは次式のように表せることがわかった。

$$D = \beta_2 \Delta T_{h \text{ ton}} - \beta_3 \quad (11)$$

ただし β_2, β_3 は定数で、この場合 β_2 は約 1.2, β_3 は約 0.05 である。(11)式を(10)式と対応させるため、定数 β_4 (ただし $\beta_4 = \beta_2/\beta_1$) を用いて形式的に書き改めると下式のようなになる。

$$D = \beta_4 \beta_1 \Delta T_{h \text{ ton}} - \beta_3 = \beta_4 P_e - \beta_3 \quad (11)'$$

すなわち、濃度 D は熱エネルギー量 P_e に比例する項とオフセット項の和で予測できることが実験的に判明した。

2.5 感熱ヘッドとドラムの当接圧

感熱ヘッドとドラムの当接条件によって、ヘッド、

図8 紙への注入熱エネルギー量による濃度予測
Density inference from injection thermo energy.

インク紙、受像紙、ドラム各々の接触条件が変わり、(図1参照)熱の通過率が変化するので、十分な発色濃度が得られなかったり、1枚の画像の中に濃度むらが生じたりする。この関係を検討するために、図9に示すようにヘッドとドラムの関係を剛性平板とこれに接する半径 r の弾性体円柱の接触⁹⁾と考へた。ヘッドの押付荷重を p とすると、接触面の幅 (ニップ幅) $2b$ は、

$$2b = 4(rkp/l)^{1/2} \quad (12)$$

$$k = (1 - \nu^2)/\pi e \quad (13)$$

ここに、 l 、 ν 、 e は各々ヘッドとドラムの接触長、ドラムのポアソン比、ゴムの硬度 H_s から求まるドラムの弾性係数である。また、接触面における最大当接圧 $q_{\max}$ 、および当接圧 q の分布は、

$$q_{\max} = (1/\pi^2 \times 1/r \times p/k l)^{1/2} \quad (14)$$

$$q = q_{\max}(1 - x^2/b^2)^{1/2} \quad (15)$$

で与えられる。ここに x はヘッドの取付け位置ずれ

図9 感熱ヘッドとドラムの当接モデル
Analysis model for thermal head vs. drum contact.

図10 濃度のヘッド取付け位置依存性
Thermal head positioning dependency.

図11 濃度の押圧荷重依存性
Head-drum pressure dependency.

に相当する接触幅方向の変位である。

図10、図11に各々ヘッドの取付け位置ずれ、および押付荷重に対するヘッドとドラムの当接圧を示す。図中には、各々の場合の濃度 D の実測値を併せて記入してある。いずれの場合にも、濃度 D と当接圧 q はよく対応することが判明した。ただし、当接圧が低くなるにつれて濃度 D のばらつきが大きくなると共に、発色形状が発熱ドット形状と対応せず、発色が不安定になる傾向が見うけられた。

3. カラーハードコピー装置の試作

3.1 性能仕様の設定

電子スチルカメラの性能は、撮像部の性能と、記録媒体であるビデオフロッピーの性能により定まる。これらのうち、ビデオフロッピーの性能仕様は統一規格化されており⁹⁾、垂直走査線数は現行のテレビ方式に合致した525本、水平解像度は約350TV本である。したがって、カラーハードコピー装置の性能は、ハードコピー化する段階での性能劣化を招かぬよう、この数値以上の性能を有する必要がある⁹⁾。

一方、印画結果は、明視距離でほぼ写真様の解像感を有させるのが好ましいから、解像度を数本/mm以上とし階調特性も写真に準ずる調子再現特性でなければならぬ¹⁰⁾。

検討の結果、上記両方の要求をほぼ満たすものとして、各色の階調数を64レベル、分解能を6本/mmとした。映像信号の標準化は10.8MHz、画像の水平方向表示率を約90%とし、印写ライン数を512とした。したがって、印画サイズは80×98mm、画素数は480(V)×512(H)=約246,000個である。

3.2 装置の構成

カラービデオコピー装置試作機の構成を図12に示す。信号前処理部でAGC、色補正、輪郭補正等の信号処理された信号はA/D変換され、RGBフレームメモリーに記憶され、各色毎に感熱ラインヘッドに印加するデータを格納するためのラインメモリーに転送される。転送は画像信号の1垂直ライン毎に行われる。転送レートは、テレビ信号の1垂直周期に同期させ、1フレーム周期(33ms)に1印写ライン分のデータ480個を転送し、印写するようにした。昇華性染料を塗付したカラーインク紙は、黄、マゼンタ、シアンの色面順次ロール化してカセットに収納されている。したがって、ドラムに巻付けられた受像紙が3回転する間に3色の印写が行われ、カラープリントが得られる。図13に各色インク紙の濃度特性実測値を示す。各色の印写は、各濃度特性の非直線性と撮像系の

図 12 カラービデオコピー装置の構成
Construction scheme of a color video copy equipment.

図 13 昇華性染料インクシートの濃度特性
Optical density of sublimation dye ink sheet.

写真 1 試作機の外観
The proto-type of color video copy equipment.

写真 2 印画サンプル
A printed sample.

図 14 色再現範囲
Color reproductive area.

ガンマ特性を補正した後に行われる。

写真 1 に試作機の外観を示す。プリント時間は、印写に要する時間 $1/30 \times 512 \text{ ライン} \times 3 \text{ 色} = 51.2 \text{ 秒}$ に

加えて、給排紙等の所要時間を含めて約 1 分である。写真 2 に試作したカラービデオ装置の印画例を示す。前述したように、階調数を各色 64 レベルとしたので、通常の画面では A/D 変換の量子化による擬似輪郭は見受けられず、アナログ的な連続階調表現が得られた。印画の発色領域は、図 14 に示すように通常の印刷に匹敵しており、色の再現性も良い。

4. む す び

昇華性染料を用いた電子スチルカメラ用カラーハードコピー装置の試作につき、主に安定な連続階調表現の観点から実験、解析した結果を述べた。試作装置の印画画質は、解像度、各色の調子再現共にモニタテレビ画面にほぼ対応したものであった。一方、印画サイズを手札判相当の $80 \times 98 \text{ mm}$ とし、分解能を 6 本/mm としたので、明視距離では絵素構造、走査線構造も目立たず、ピクトリアルハードコピーとして好ましい解像度と階調特性が得られた。

このカラーハードコピー装置は、電子スチルカメラ用にとどまらず、テレビ放送受信、ビデオカメラ、VTR等の動画信号源から入力されるビデオ信号のハードコピー装置、工業計測機、医療機器等への応用等の幅広い用途が考えられる。

最後に本研究をご指導、ご支援、ご協力いただいた多くの方々、特に日立製作所日立研究所 堀康郎主管研究員、機械研究所 松野順一研究員、東海工場 佐藤勝也部長に深く感謝します。

(昭和60年1月29日受付、昭和60年7月30日最終受付)

[参 考 文 献]

- 1) Kihara, et al: "The Electronic Still Camera a New Concept in Photography", IEEE Trans., CE-28, 8, pp. 325-331 (Aug., 1982)
- 2) Hanma, et al: "A Electronic Still Camera Technology", IEEE Trans., CE-30, 8, pp. 402-407 (Aug., 1984)
- 3) 大野信ほか: "小特集 テレビ画像のハードコピー", テレビ誌, 37, 7, pp. 520-558 (July, 1983)
- 4) Masuda, et al: "Color Video Picture Printer", IEEE Trans., CE-28, 8, pp. 226-232 (Aug., 1982)
- 5) 田口ほか: "昇華転写形感熱記録体", 第14回画像工学コンファレンス論文集 8-4, pp. 197-200 (1983)
- 6) 機械学会編: "伝熱工学資料 (改訂第3版)", 機械学会, p. 162 (1975)
- 7) 平修二: "現代弾性力学", オーム社, p. 197 (1975)
- 8) 水島: "電子スチルカメラ懇談会の活動とスチルビデオフォーマット規格", テレビ学技報 (回路, 方式), 8, 35, TEBS 100-1 (Dec., 1984)
- 9) 半間ほか: "電子スチルカメラ用ハードコピー装置", 同上, TEBS 100-3 (Dec., 1984)
- 10) 奥田ほか: "TV 画像ハードコピー化用プリンターにおける信号処理", 第14回画像工学コンファレンス論文集 8-5, p. 201 (1983)