中間調強調を施したディザ法によるカラー表示

原 肇[†], 中 野 吉 孝^{††}
 田 中 政 彦^{†††}, 正会員 吉 田 良 教^{††††}
 正会員 大 脇 健 一[†]

あらまし 画像の表示および伝送において、デジタル信号をそのまま取り扱える2値表示デバイスが研究されている。2値表示デバイスには、液晶やAC型プラズマディスプレイパネル等があり、これらは各セルがオンかオフの2状態しかとれない。しかし、この2値で濃淡画像を表示する研究は、ディスプレイ装置、印刷の両面で進められている。本論文では、2値表示デバイスで濃淡画像を表示する方法として、組織的ディザ法を用い、画質をより向上させるように閾値を定める中間調強調の方法を提案し、定量的に比較検討を行った。さらに、この方法をカラー表示にも適用した。その結果、従来のディザ法に比べ画質を向上させることができた。また、2値ディザと多値ディザの意味を明確にし、2値と多値のディザ化画像を白黒およびカラーで表示した。

1. ま え が き

液晶やAC型プラズマディスプレイパネルなどの2値表示デバイスで濃淡画像表示を行うには、階調数を増す何らかの工夫が必要である。そのために、ディザ法、濃度パターン法等による濃淡画像表示の研究が盛んに行われている。

著者らは、組織的ディザ法を用いて、2値表示デバイスのための中間調表示およびそのカラー表示⁶⁾⁷⁾¹⁰⁾¹³⁾の研究を進めてきた。しかし2値ディザは、解像度、階調特性がともにある程度限定されるため、この解決法として表示デバイスに時間変調などを行うことによって、1画素で数レベル程度の表示を可能とする多値ディザが考えられている。本論文は、2値および多値の組織的ディザ法における閾値調整法として、中間調強調処理を提案するとともに、カラー表示のシミュレーション結果を示している。また、本提案による中間

調強調の処理効果について、他のディザ法との比較評価を行った。

2. デ ィ ザ 法

2.1 2値ディザ

2値ディザは、1画素を2階調で表示する従来からのディザ法である。

組織的ディザ法は、入力画像の周辺画素の輝度やその表示レベルを参照することなく、表示される画素の座標情報だけで閾値を決める方式である。図1にその原理図を示す。画像信号を2値化するための閾値は、Judiceらによって提案されたディザマトリクスで与えられる¹⁾。このマトリクスを全画面に繰り返して入

図1 組織的ディザ法の原理
 Principle of ordered dither method.

[†] 広島工業大学 電子工学科

^{††} 日本電気株式会社 伝送通信事業部

^{†††} 株式会社東芝 総合研究所電子機器研究所

^{††††} 佐賀大学 理工学部電子工学科

“Color Display by Dither Method using Emphasis of Half Tone” by Hajime Hara (Hiroshima Institute of Technology, Hiroshima), Yoshitaka Nakano (Transmission and Communication Division, NEC Corporation, Kawasaki), Masahiko Tanaka (Toshiba Research and Development Center, Toshiba Corporation, Kawasaki), Yoshinori Yoshida (Faculty of Engineering, Saga University, Saga) and Ken-ichi Owaki (Hiroshima Institute of Technology, Hiroshima)

力画像の全画素に対する閾値とする。

基本となる 2×2 ディザマトリクス D^2 は

$$D^2 = \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 3 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

であり、一般に、 $n \times n$ ディザマトリクス D^n は、(1)式を拡張して、次式で与えられる。

$$D^n = \begin{bmatrix} 4D^{n/2} & 4D^{n/2} + 2U^{n/2} \\ 4D^{n/2} + 3U^{n/2} & 4D^{n/2} + U^{n/2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $n=2^2, 2^3, \dots, 2^r$ であり、 U^n は各要素がすべて1の $n \times n$ マトリクスである。

入力データと出力データの関係は、(3)式で与えられる。

$$y_{ij} = 1(x_{ij} - d_{ij}) \quad (3)$$

$$\text{ただし、} 1(t) = \begin{cases} 1 & : t > 0 \\ 0 & : t \leq 0 \end{cases}$$

x_{ij} : 入力データ

y_{ij} : 出力データ

d_{ij} : ディザマトリクス D^n 内の要素 (i, j) の閾値

組織的ディザ法の他に、平均値制限法、平均誤差最小法などがある。

2.2 多値ディザ⁽¹⁾⁽²⁾

多値ディザは、1画素に対し複数の閾値を設けて3階調以上で表示する方法である。最も簡単な例として、3値ディザについて述べる。図2にその原理図を示す。

入力画像を3値化するために、2つのディザマトリクス(以降、レベルマトリクスと呼ぶ)を用意する。例えば、入力画像が図2のように5ビット/画素のデータである場合、表示レベル0, 1/2, 1は、入力輝度レベル0, 16, 32に対応する。いま、注目する画素の輝度レベルが0以上、15以下の間にあるときは、第1レベルマトリクスの閾値と比較し、オンのとき1/2レベル、オフのとき0レベルの輝度で表示する。同様に、注目する画素の輝度レベルが16以上、32未満の間にあるときは、第2レベルマトリクスの閾値と比較し、表示レベルとして1/2か1を決定する。

一般に、 m 値ディザの場合、必要なレベルマトリクスの総数は、 $m-1$ であり、出力される表示レベルは、次式のように表現することができる。

$$y_{ij} = \{1(x_{ij} - \phi_{ij}^l) + (l-1)\} / S \quad (4)$$

$$\text{ここで、} l = \sum_{p=0}^{S-1} 1(x_{ij} - p \cdot x_{\max} / S)$$

S : レベルマトリクスの総数、 $S = m-1$

l : レベルマトリクスの序数、 $l=1, 2, 3, \dots, m-1$

図2 3階調- 4×4 ディザマトリクス
Three level - 4×4 dither matrix.

図3(a) 2×2 ディザマトリクスによる5擬似階調
Five pseudo-gray tone by 2×2 dither matrix.

図3(b) 3階調- 2×2 ディザマトリクスによる9擬似階調
Nine pseudo-gray tone using three level - 2×2 dither matrix.

ϕ_{ij}^l : 第 l レベルマトリクス内の画素 (i, j) の閾値

$x_{\max}$: 入力データの最大値

また、マトリクスサイズを $n \times n$ とすると、必要な閾値数は、 $n^2 \times (m-1)$ であるから、擬似階調数は $n^2 \times (m-1) + 1$ となる。例えば、マトリクスサイズを 2×2 とした場合、図3に示すように2値ディザでは5段階、3値ディザでは9段階の擬似階調がとれる。

3. 中間調強調処理

3.1 従来の組織的ディザ法

組織的ディザ法の特徴として、次の2項目が上げられる。

- (i) ディザマトリクスのサイズをある程度、大きくとることによって擬似階調が得られるため、階調特性に優れている。

GIRL	MULTI LEVEL
	BI LEVEL
AERIAL	BI LEVEL
COUPLE	BI LEVEL
		NORMAL	CONTRAST $\sigma=0.8$	E.H.T K=20 $\sigma=0.8$
組織的デッサ法				

<p>平均誤差最小法</p>
<p>平均値制限法 $\gamma=0.05$</p>
<p>標準画像</p>

(a)

(b)

(c)

(d)

写真 1

(ii) ディザ処理によって、輪郭部の解像度が劣化するため、解像度特性は良いとはいえない。

したがって、(ii)の解像度特性を改善すれば画質の向上につながる。例えば、解像度特性に優れた条件付決定法と組合せる方式が提案されている⁸⁾。しかし、条件付決定法は、入力画像データや表示レベルを参照するため、ディザ処理が複雑である。また、ディザ処理前に輪郭強調をすることもよく知られている³⁾が、この輪郭強調の方法は原画像データを操作した後、ディザ処理を行うため、原画像に対する再現性が良くない。

そこで、まずディザ処理が簡単で、原画像に対する再現性を保つことができる方法として、CONTRAST 処理について述べる²⁾⁹⁾。

CONTRAST 処理は、(2)式のマトリクスの各要素(閾値) d_{ij} を(5)式に示す新しい閾値 d'_{ij} に調整する方法である。

$$d'_{ij} = \sigma(d_{ij} - N) + M \quad (5)$$

σ : コントラストパラメータ, $0 \leq \sigma \leq 1$

M : 輝度パラメータ

N : 入力データの間中値

(5)式を簡単にするため、 $M = N = 1/2$ とすると、 d'_{ij} は次式で与えられる。

$$d'_{ij} = \sigma(d_{ij} - 1/2) + 1/2 \quad (6)$$

この方法は、簡単に2値画像の CONTRAST と全体の輝度の制御を行うものとして、よく知られている。図4に CONTRAST 調整曲線を示す。

3.2 中間調強調処理の提案

3.1節で述べた CONTRAST 調整は、表示画像の輪郭部を強調するが、階調特性の低下が著しく、画質劣化を生じることが多い。そこで、閾値を次のように

定める。

(i) 階調特性の低下を少なくするために、閾値の最大値と最小値の較差を大きくとる。

(ii) 中間値付近の閾値は、CONTRAST 調整したものをを用いて輪郭部を強調する。

このような方法を中間調強調 (Emphasis of Half-Tone: 略して、E. H. T) 処理と呼ぶ。

E. H. T 処理では、(7)式のような K 乗曲線を利用する。

$$y_{ij} = \frac{1}{2} \cdot (1 - \sigma) \cdot |2d_{ij} - 1|^K \quad (7)$$

ただし、 $K \geq 1$ である。ここで y_{ij} に付加する $\text{Sign}(d_{ij} - 1/2)$ は、 $d_{ij} = 1/2$ を変曲点として、 $0 \leq d_{ij} < 1/2$ では、 h_{ij} を y_{ij} だけ減少させ、 $1/2 \leq d_{ij} \leq 1$ では、 y_{ij} だけ増加させる働きを持つ。したがって D. H. T 曲線 h_{ij} に、 $y_{ij} * \text{Sign}(d_{ij} - 1/2)$ を付加して、次式で表す。

$$h_{ij} = d'_{ij} + y_{ij} * \text{Sign}(d_{ij} - 1/2) \quad (8)$$

ここで、符号関数 $\text{Sign}(x)$ は、以下の値をとる。

$$\text{Sign}(x) = \begin{cases} 1: x \geq 0 \\ -1: x < 0 \end{cases}$$

したがって、E. H. T 処理の閾値調整式は、(8)式に、(6)式および(7)式を代入して、次式で与えられる。

$$h_{ij} = \sigma \left(d_{ij} - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot (1 - \sigma) * |2d_{ij} - 1|^K * \text{Sign} \left(d_{ij} - \frac{1}{2} \right) \quad (9)$$

この E. H. T 調整曲線は、NORMAL 曲線と、CONTRAST 曲線 ($\sigma = \text{const.}$) の間で、 K をパラメータとして調整される。 K が大きくなるにつれて、調整曲線 h_{ij} は、CONTRAST 処理の閾値 d'_{ij} に近づ

図4 コントラスト調整のための閾値曲線
Threshold curve for contrast adjustment.

図5 中間調強調のための閾値曲線
Threshold curve for emphasis of half-tone.

く、また K を小さくすると、NORMAL 処理に近づく。図 5 に E. H. T 処理 ($\sigma=0.5, K=5, 10, 20$) の調整曲線 h_{ij} を示す。あわせて NORMAL 処理および CONTRAST 処理の各調整曲線も示す。

4. 画像表示シミュレーション

シミュレーション対象画像は、標準画像 GIRL, COUPLE, AERIAL (画素数 256×256 , RGB 各 8 ビット/画素) である。本シミュレーションは、画像データをマイコンに入力してディザ処理を行い、カラーモニタに白黒およびカラー画像を表示する。このとき、ディザマトリクスのサイズは 4×4 を使用し、各色別にディザマトリクスを設けてディザ化画像を作成する。

シミュレーションにおけるディザ処理は、次の 5 つの処理について行った。

- (i) NORMAL 処理 閾値調整する前の標準型を用いる。
- (ii) E. H. T 処理 (9) 式を使って閾値調整をする。このとき、パラメータ σ と K は SN 比が最大となるものを選ぶ。SN 比については 5 章で述べる。
- (iii) CONTRAST 処理 従来の閾値調整法を用いる。
- (iv) 平均誤差最小法
- (v) 平均値制限法

写真 1(a), (b) と (c) は、2 値ディザを用いたカラー表示のシミュレーション結果を示している。写真 1(d) は、3 値ディザを用いたカラー表示のシミュレーション結果を示している。

5. 評価

ディザ法では、入力画像 X の微小領域内の平均輝度と出力画像 Y の対応する領域内の平均輝度が比例することが望ましい。点 (i, j) の近傍の微小領域を $k \times l$ とし、入力画素の輝度レベル x_{ij} を m 階調 ($x_{ij} = 0, 1, 2, \dots, m-1$)、出力画素の輝度レベル y_{ij} を n 階調 ($y_{ij} = 0, 1, 2, \dots, n-1$) とする。

いま、出力画像 Y が入力画像 X に対して理想的に比例して出力されたとすると、以下の式が成り立つ。

$$\sum_{k,l} \frac{y_{i+k, j+l}}{n-1} = \sum_{k,l} \frac{x_{i+k, j+l}}{m-1} \quad (10)$$

表 1 SN 比
Signal to noise ratio.

	COUPLE	AERIAL	GIRL	
	bi-level	bi-level	bi-level	multi-level
NORMAL	21.6	19.9	20.0	23.4
CONTRAST $\sigma=0.8$	23.5	19.8	20.0	23.6
E. H. T. $\sigma=0.8$ $K=20$	23.6	20.0*	20.0	23.7
平均誤差最小法	23.0	19.2	19.8	21.5
平均値制限法	19.5	17.3	16.9	14.9

* この値は $\sigma=0.9$ の場合の SN 比 単位 (dB)

(10) 式の等号が成立するのは理想的な再現が行われた場合で、実際には誤差が含まれている。1 画面のディザ化を行った際、微小領域 $k \times l$ 内に生じる誤差を画像の再現誤差 N と名づけ、以下の式を用いる。

$$N = \sqrt{\frac{\sum_{i,j} \left(\sum_{k,l} \frac{x_{i+k, j+l}}{m-1} - \sum_{k,l} \frac{y_{i+k, j+l}}{n-1} \right)^2}{i \cdot j}}$$

この N を用い、画像品質の評価方法として SN 比を定義する。

SN 比: $20 \log_{10} S/N$ (dB)

$$\text{ただし } S = \sum_{k,l} \frac{\max x_{ij}}{m-1} = k \times l$$

SN 比の結果を表 1 に示す。微小領域のサイズとして、 $k=l=3$ を用いた。CONTRAST 処理の場合、各画像とも $\sigma=0.8$ で SN 比が最大となった。E. H. T 処理の場合、 K と σ の組合せにより、SN 比が最大となった。CONTRAST 処理や E. H. T 処理の SN 比が NORMAL 処理に比べて大きいのは、最も頻度の高い中間調に対して、閾値を小さなステップでとっているからである。

同様に、E. H. T 処理の SN 比が CONTRAST 処理より大きいのは、図 5 において、閾値 d_{ij} が 0 あるいは 1 の近くで、CONTRAST 処理曲線 d'_{ij} が 0, 1 まで伸びず、 $1/2 \pm \sigma/2$ にとどまるのに比べ、E. H. T 処理では、閾値 h_{ij} が、粗くではあるが、0 から 1 近くまで較差を広くとっているからである。

平均誤差最小法と平均値制限法は、他の組織的ディザ法に比べて SN 比が著しく小さい。これは画素の再現性の忠実度という点で劣ることを意味する。ただ、画像認識の容易さ等がからんで来ると、被験者は、画像に対して別の評価基準を持ち込むため、SN 比の大小だけでは決まらなくなるものと思われる。

6. む す び

本論文で提案した E. H. T 処理は、2 値画像に対して効果的であることが、視覚的にも、定量的にも評価できた。また多値ディザについては、今回は 3 値ディザのみの実験を行ったわけであるが、画質向上が期待できることがわかった。

多値ディザについては、表示方法が充分に確立していないので、組織的ディザ法をはじめ、各種ディザ法に対応したレベルマトリクス内の閾値の決定方法、および表示効果について、今後検討を進めてゆこうと考えている。

終りに、日頃有益な御助言、御討論をいただいている佐賀大学 高松雄三助教授、森田講師ならびに本研究に御協力頂いた大学院学生 横田俊昭君、ファナック株式会社の寺脇文一氏、株式会社東芝の埴田政美氏に深謝致します。

本研究は放送文化基金の援助を得て行われたものであり、また画像データ (SIDBA) は東京大学生産技術研究所の安田靖彦教授より提供されたことを記し、ここに御礼申し上げます。

(昭和 59 年 1 月 6 日受付, 昭和 60 年 4 月 15 日最終受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) C. N. Judice, J. F. Jarvice, W. H. Ninke: "Using Ordered Dither to Display Continuous Tone Pictures on an AC Plasma Panel", Proc. SID, **15**, 4, pp. 161-169 (1974)
- 2) 飯塚, 荒井: "ディザ法による濃淡画像の 2 値表示", 日経エレクトロニクス, **185**, pp. 50-65 (May, 1978)
- 3) 小野: "ディザ法", 画像電子学会誌, **10**, 5, pp. 388-397 (1981)
- 4) 三浦, 吉田: "プラズマディスプレイによる画像表示", 佐賀大学集報, **9**, pp. 193-203 (1981)
- 5) 埴田, 中野, 吉田: "AC 形プラズマディスプレイによる動画像表示", 昭 57 九州支部連大, 615 (1982)
- 6) 中野, 寺脇, 埴田, 吉田: "ディザ法による 2 値表示デバイスのカラー画像表示", 昭 58 信学総全大, 1291 (1983)
- 7) 村上: "メモリー機能をもった放電表示パネルによるカラーテレビ表示", 信学技報, IE 81-59 (1981)
- 8) J. F. Jarvis and C. S. Roberts: "A New Technique for Displaying Continuous Tone Image on Bilevel Display", IEEE Trans., **COM-24**, 8, pp. 891-898 (Aug., 1976)
- 9) C. N. Judice: "Digital Video: A Buffer-Controlled Dither Processor for Animated Images", IEEE Trans., **COM-24**, 11, pp. 1433-1440 (Nov., 1977)
- 10) 原, 依田, 大脇: "プラズマディスプレイのためのカラー画像表示の 1 手法", 信学技報, ED 80-43, pp. 85-90 (June, 1980)
- 11) 中野, 吉田, 埴田: "AC 形プラズマディスプレイによる 5 階調動画像表示", 昭 58 九州支部連大, 205 (1983)
- 12) 田中, 吉田, 埴田: "AC 形プラズマディスプレイによる動画像表示 (光出力について)", 昭 58 九州支部連大 (1983)
- 13) 原, 依田, 大脇: "2 値表示装置によるカラーの中間調表示", 信学技報, ED 83-28, pp. 71-74 (June, 1983)
- 14) 大脇, 吉田編著: "プラズマディスプレイ", 共立出版社。