

第2種スターリング数を用いたランダムパターン法†

長嶋 祐 二** 唐崎 幸 弘** 長嶋 秀 世**

濃淡画像を白黒の2値で表現する方法には大きく分けてディザ法と濃度パターン法がある。これらの方法は、直接テレビカメラから得られるようなダイナミックレンジの広い画像に対し出力画像が白抜けや黒つぶれになりやすく、適当な加工を加えないと鮮明な画像が得られにくい。本論文では、入出力強度特性を非線形とすることを目的とした第2種スターリング数を用いたランダムパターン法について述べる。この方法は、出力1画素 ($n \times n$ ビット) のうち r 個を白点とする確率が、試行を m 回行ったとき、第2種スターリング数 $S_{m,r}$ に比例するように考えられており入力強度対出力強度特性が r 特性に近い形をもっている。したがって、この方法はダイナミックレンジの広い画像や r 補正を必要とする画像に対し変換を行うことなく直接適用することができる。最後にマイクロコンピュータによるオンライン画像処理装置を試作し比較的低解像度のディスプレイにより従来の方法と比較実験を行った結果、ランダムパターン法のうち独立確率法や条件付確率法と比較して鮮明な画像が得られ本方法の有効性が認められた。また、最大階調数を50とした本方法の処理時間は独立確率法および条件付確率法の87%程度となり処理速度の向上がみられた。

1. ま え が き

光通信の発展にともないデジタル通信網が充実され、画像伝送や画像処理の重要性はさらに増すものと思われる。とくに、計算機による画像処理は、白黒2値の表示装置を用いて画像の濃淡を表現する問題に関心もたれ、数多くの報告がある^{1)~7)}。また、マイクロコンピュータの普及は目覚ましくこれによる画像処理には新たな関心が寄せられている。

濃淡画像を白黒の2値で表現する方法は主として、ディザ法と濃度パターン法に大別される²⁾。ディザ法は、入力画素をある規則により計算された閾値を用いて2値化する方法であり、一般的に入力1画素と出力1画素が1対1に対応するものである。

濃度パターン法は、入力1画素を大きさ $n \times n$ 点の出力1セルに対応させる方法で、1セル内の白点数は零から n^2 個まで n^2+1 通りの場合がある。この方法はさらに入力画素の強度レベルに対し出力セル内のドットパターンが一意的に決定される固定パターン法と、入力強度に対応する出力セル内のドットパターンを乱数を用いて決定するランダムパターン法^{5),6)}とがある。固定パターン法は、入力強度に対応する出力セル内のドットパターンが一意的に決定されるため、量子化効果による偽輪郭が生じやすいこと、入力強度の規則的な変化に対して干渉縞が生じることなど画質の

劣化が起こりやすい。ランダムパターン法は、固定パターン法の欠点を改善する方法であるが、レベル分布の影響を強く受け直接テレビカメラから得られたダイナミックレンジの広い画像に対して出力画像が白抜けや黒つぶれになりやすく鮮明な画質が得られない場合がある。

本論文では、濃淡画像の新しい2値化手段として、第2種スターリング数を用いたランダムパターン法について述べる。本手法は、人間の視覚特性を考慮し出力セル内のドット位置を第2種スターリング数を用いて決定するようにした。これは、 $n \times n$ ビットで構成された出力1画素のうち r 個を白点とする確率が、第2種スターリング数 $S_{m,r}$ に比例する結果となる。ここに、 m は独立試行の回数であり、画素の強度に比例するようにしてある。これより入力強度対出力強度特性が r 特性に近い形となり、ダイナミックレンジの広い画像や r 補正を必要とする画像に対し変換を行うことなく直接適用できる。また、本手法の有効性を調べるため、マイクロコンピュータを用いたオンライン画像処理装置を試作し、従来の濃度パターン法との比較検討を実験によって行った。

2. 濃淡画像の表示方法

2.1 濃度パターン法

入力画像データを表示装置に出力するとき、1画素 $P(x, y)$ の濃淡の強度を $I(x, y)$ とし $I(x, y)=0$ を黒点 (最暗)、 $I(x, y)=1$ を白点 (最明) と定義する。ここに、 (x, y) は画素の座標を表す。

入力画素 $P(x, y)$ を出力表示装置の $n \times n$ 点に対応させ、これを出力1セルとする。このとき、1セル

† A Random Pattern Method Using Stirling's Numbers of the Second Kind by YUJI NAGASHIMA, YUKIHIRO KARASAKI and HIDEYO NAGASHIMA (Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Kogakuin University).

** 工学院大学工学部電子工学科

* 現在 東芝(株)

に一つのドットマトリクス D を対応させ、入力強度に応じた値を D に与える。これを濃度パターン法という。

入力画素 $P(x, y)$ に応じたドットマトリクスを

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & \dots & d_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$d_{k,l} = \begin{cases} 1: \text{白点} \\ 0: \text{黒点} \end{cases}, 1 \leq k, l \leq n$$

とする。

濃度パターン法は、大別して固定パターン法とランダムパターン法に分けることができる。

固定パターン法は、ある入力画素の強度が与えられれば、一意的にドットマトリクスを割当てることができる。この方法では D の n^2+1 種類のパターンを適切に決めておけば、簡単に出力画像を得る⁷⁾。この方法の問題点としては、より小さいドットマトリクスに対し量子化効果による偽輪郭が生じること、入力強度の規則的な変化に対し干渉縞が生じることなどがあげられる。

ランダムパターン法は、固定パターン法を用いたときに生じる偽輪郭、干渉縞をなくすため、ドットマトリクスを決定するのに一様乱数を用いる方法であり、これには独立確率法と条件付確率法がある。

独立確率法は、強度 $I(x, y)$ の画素に対応した D の要素 $d_{k,l}$ ($1 \leq k, l \leq n$) をたがいに独立な一様乱数を用いて次式のように決定する。

$$d_{k,l} = \begin{cases} 0: \text{Rand}(0,1) \geq I(x,y) \\ 1: \text{Rand}(0,1) < I(x,y) \end{cases} \quad (2)$$

ここに区間 $[0,1]$ の一様乱数を $\text{Rand}(0,1)$ と定義する。この方法を用いたとき、 D により表される1セル内の白点の数 r は $\sum d_{k,l}$ であり、2項分布に従う。これより、白点の数が r 個になる確率 $P_i(r)$ は、 $N=n \times n$ として

$$P_i(r) = \binom{N}{r} I^r(x,y) [1-I(x,y)]^{N-r} \quad (3)$$

となる。この平均および分散はそれぞれ

$$E_i(r) = NI(x,y) \quad (4)$$

$$V_i(r) = NI(x,y)[1-I(x,y)] \quad (5)$$

となる。

条件付確率法は、 D の要素 $d_{k,l}$ の 0, 1 の決定の確率が、同一マトリクスの以前の結果より確率を変える方法である。この方法では、同じ入力強度に対するドットマトリクスの白点の数の分散が小さく、よき

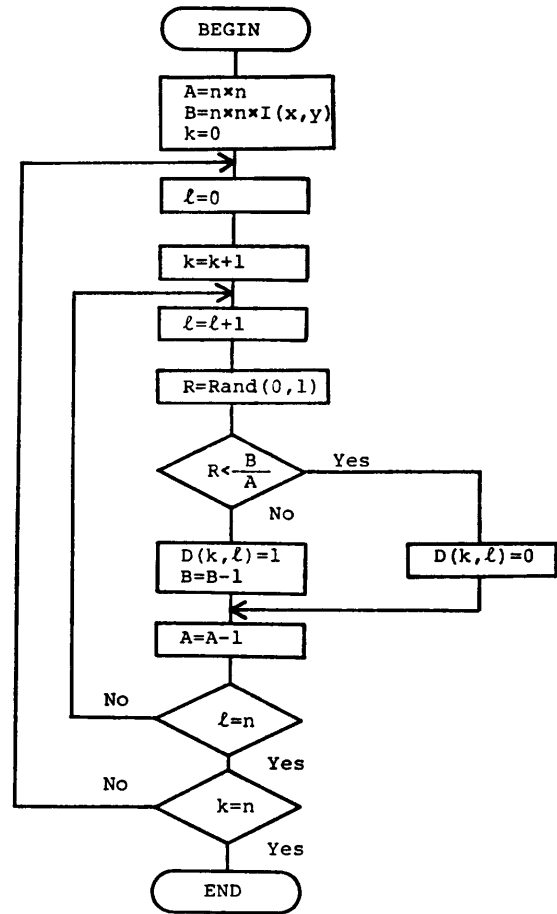


図1 条件付確率法の流れ図

Fig. 1 Flow chart of conditional probability method.

めの細かい画像が得られる。この方法による D の決定の過程をを過程を図1に示す。

2.2 第2種スターリング数を用いたランダムパターンの決定

これまでに述べた濃度パターン法は、入力画像のレベル分布の影響を強く受け、オンラインで直接テレビカメラから得た画像に対し、出力画像が白抜けや黒つぶれになりやすい。そこで、視覚特性を考慮した非線形変換形の方法を考える。

前節に述べた従来の濃度パターン法は、 D の要素 $d_{k,l}$ ($1 \leq k, l \leq n$) の 0, 1 の決定に一様乱数を用いていた。新しい方法では、 $d_{k,l}=1$ とする (k, l) の決定に一様乱数を用いる。すなわち、ドットマトリクスの要素 $d_{k,l}$ を標本とする大きさ $N=n \times n$ の標本空間 $S = \{d_{k,l} | 1 \leq k, l \leq n\}$ を考える。この S に属する独立試行を $m (\geq 0)$ 回行ったとき、要素 $d_{k,l}$ ($1 \leq k, l \leq n$) が重複を許して r 個選び出されたとする。第2種

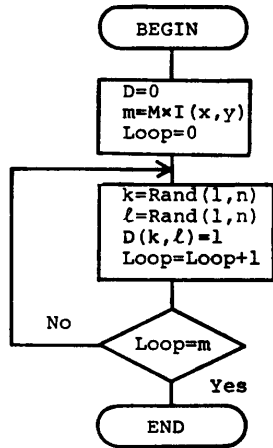


図2 第2種スターリング数を用いた方法の流れ図
Fig. 2 Flow chart of 2nd Stirling method.

スターリング数を用いた方法は、この選り出された r 個の要素 $d_{k,i}$ を 1 (白点)、それ以外の要素をゼロ (黒点) として D を決定する方法である。図2にこの方法による D の決定過程を示す。この方法で、 S のうちから r 個を 1 にする (r 個を白点とする) 確率 $P_{s,m}(r)$ は独立試行を m 回行ったとき

$$P_{s,m}(r) = \frac{N! S_{m,r}}{(N-r)! N^m} \quad 0 \leq r \leq N \quad (6)$$

と表すことができる。ここに、 $S_{m,r}$ は第2種スターリング数で次式のように表される。

$$\begin{cases} S_{m,r} = \frac{1}{r!} \sum_{t=1}^r (-1)^t \binom{r}{t} (r-t)^m \\ S_{m+1,r} = S_{m,r-1} + r S_{m,r} \end{cases} \quad (7)$$

確率分布 $P_{s,m}(r)$ の平均および分散はそれぞれ

$$E_{s,m}(r) = N \left[1 - \left(1 - \frac{1}{N} \right)^m \right] \quad (8)$$

$$\begin{aligned} V_{s,m}(r) = & N(N-1) \left(1 - \frac{2}{N} \right)^m - N \left(1 - \frac{1}{N} \right)^m \\ & \times \left[N \left(1 - \frac{1}{N} \right)^m - 1 \right] \end{aligned} \quad (9)$$

と表されるが、前者は画像の平均的濃さを表し、後者は出力画素のきめの細かさを表す。これより本手法は、入力強度に対し、出力強度が非線形になる。

いま、独立試行の回数 m を画素の入力強度に比例させ、入力強度が 1 のときの試行回数を M とし、最大階調数 $M (\geq m)$ と定義する。最大階調数は出力画像の鮮明さならびに処理時間に影響する。なお、この試行は区間 $[1, n^2]$ の一様乱数によって行う。

図3は、 D の大きさを $N=4 \times 4$ とした独立確率法、条件付確率法および第2種スターリング数を用い

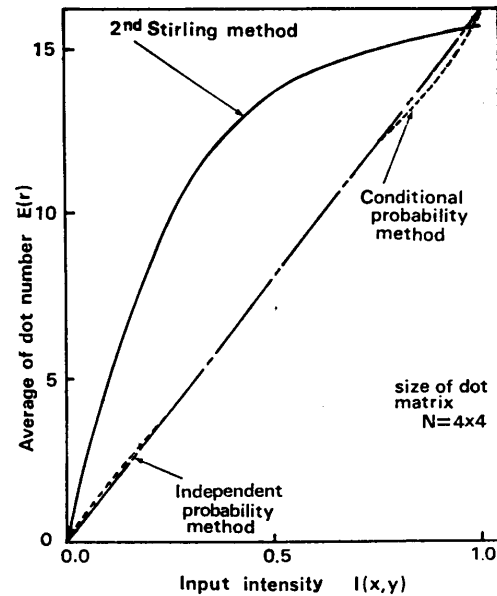


図3 三つの方法の入力強度に対するドットマトリクスの平均ドット数の関係
Fig. 3 Relation between input intensity and average of dot number for the three methods.

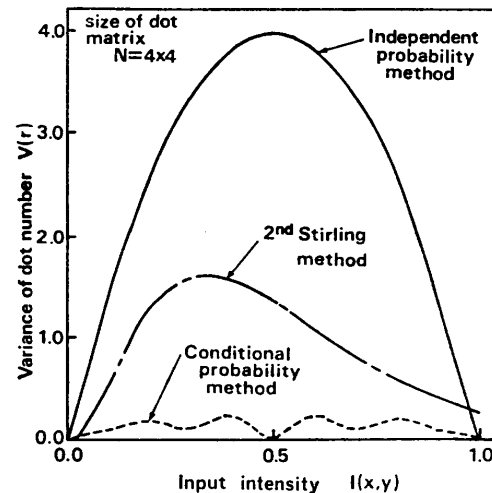


図4 三つの方法の入力強度に対するドットマトリクスのドット数の分散の関係
Fig. 4 Relation between input intensity and variance of dot number for the three methods.

た方法の入力強度に対する出力平均ドット数を示す。ここに第2種スターリング数を用いた方法の最大階調数は、 $M=60$ とした。この図より、本手法は視覚特性である対数関数に近い特性をもっており、直接テレビカメラから得られた画像に対して γ 補正の効果をもつことがわかる。図4は、各手法に対するドットマト

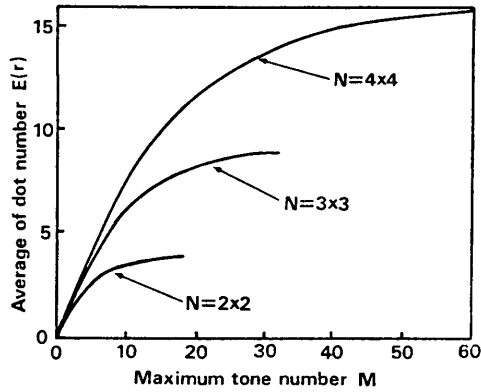


図5 第2種スターリング数を用いた方法のドットマトリクスの大きさ N による最大階調数に対するドットマトリクスの平均ドット数の関係

Fig. 5 Relation between maximum tone number and average of dot number, which have size N dot matrix, by 2nd Stirling method.

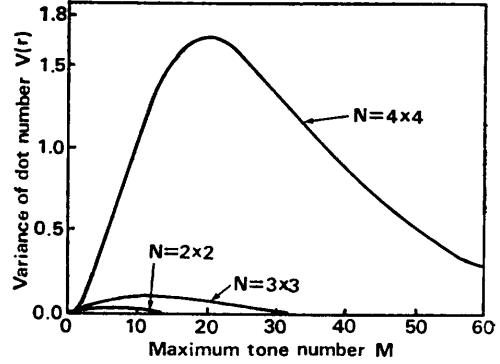


図6 第2種スターリング数を用いた方法のドットマトリクスの大きさ N による最大階調数に対するドットマトリクスのドット数の分散の関係

Fig. 6 Relation between maximum tone number and variance of dot number, which have size N dot matrix, by 2nd Stirling method.

リクスの白点数の分散を入力強度に対して示したもので、本手法は独立確率法と条件付確率法の中間に位置していることがわかる。

図5は、本手法においてドットマトリクスの大きさ N を 2×2 , 3×3 , 4×4 としたときの最大階調数 M に対する出力1画素の平均ドット数を示す。図6に出力1画素の平均ドット数の分散を示す。ドットマトリクスの大きさを一つに決定したとき必要とする画質を得るために図5、図6より最大階調数を選択する。効率が良くて最良の画質を得るためには、最大階調数は図6の分散が小さかつ図5の平均ドット数の曲線が飽和する直前の値とする。

3. 画像処理装置の構成

前述の第2種スターリング数を用いた濃淡画像表示法の効果を実験的に確かめるために試作した画像処理装置を簡単に述べる。

本装置は画像入力のための撮像部に CCD カメラ、画像データの入力に画像データ入力ユニット、システムの制御およびデータ処理に 16 ビットマイクロコンピュータ (以下 μ COM と略す) で構成されている。

図7にそのシステム構成を示す。

撮像部には、ソニー製 CCD カメラ XC-37 を使用した。このカメラの有効画素数は、 $384 H \times 491 V$ 、水平周波数 7.16 MHz、垂直周波数 15.734 kHz、水平解像度 280 本、垂直解像度 350 本である。なお、従来

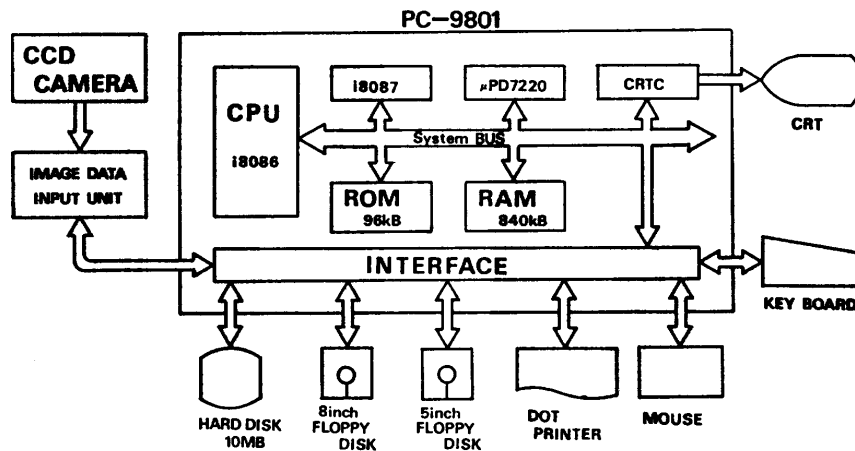


図7 画像処理装置のシステム構成図
Fig. 7 A system configuration of the processing equipment.

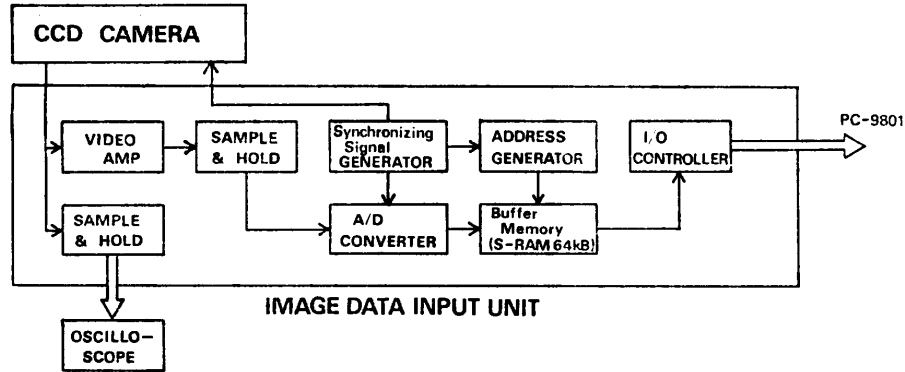


図 8 画像データ入力ユニットのブロック図

Fig. 8 A block diagram of image data input unit.

の撮像管テレビカメラも用いることができる。

μ COM 部は画像データ入力ユニットの制御および入力された画像データの処理、出力を行う。使用しているコンピュータは、NEC 製 16 ビットパーソナルコンピュータ PC-9801 E (CPU i 8086, RAM 840 kB) である。また、ディスプレイは NEC 製カラーキャラクタディスプレイ PC-KD 551 (解像度 640 H \times 400 V ドット, ドットピッチ間隔 0.39 mm) を、プリンタは NEC 製ドットマトリクスプリンタ, NM-9400 (印字ヘッドワイヤ数 24 本, 印字ヘッドワイヤ径 0.2 mm) を使用している。画像データ入力ユニットは、撮像部からのビデオ信号を量子化し、そのデータを 64 k バイトのワークメモリに格納して必要に応じて μ COM へ転送するための自作ユニットで、その構成を図 8 に示す。

4. 実験による比較検討

ここでは、独立確率法、条件付確率法および第 2 種スターリング数を用いた方法の 3 種類のランダム濃度パターン法の比較を行う。入力画像は、試作した画像



図 9 原像の写真

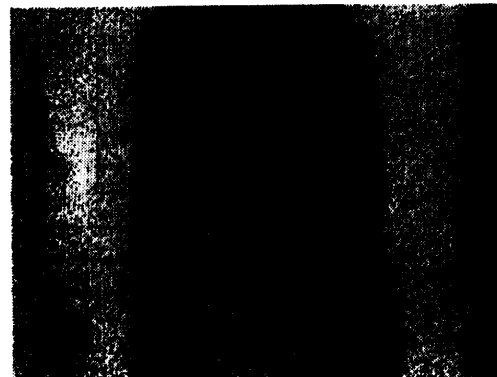
Fig. 9 Photograph of original image.

処理のユニットにより得られた画像データ 64 k バイトのうち 128 \times 128 画素 (出力 1 画素=4 \times 4 ドット) のデータとする。これは、キャラクタディスプレイの解像度により制限された結果である。

使用した原像の写真を図 9 に示す。図 10 (a) は最大階調数 $M=50$ のキャラクタディスプレイへの出力を写真に撮ったものであり、(b) は、ドットプリンタ



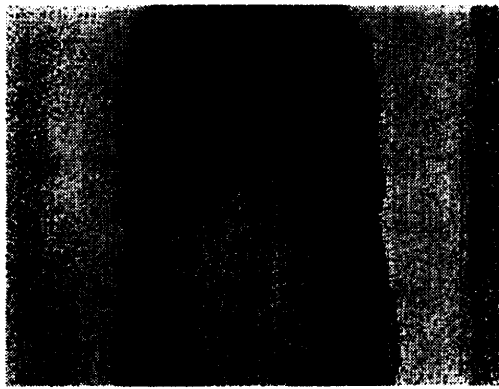
(a) Graphic display



(b) Dot printer

図 10 第 2 種スターリング数を用いた方法, $M=50$, $N=4 \times 4$

Fig. 10 2nd Stirling method with $M=50$, $N=4 \times 4$.



(a) Graphic display

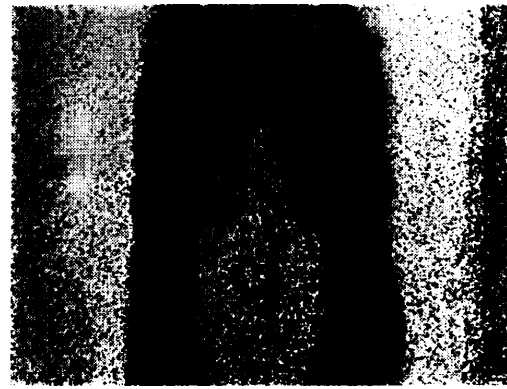


(b) Dot printer

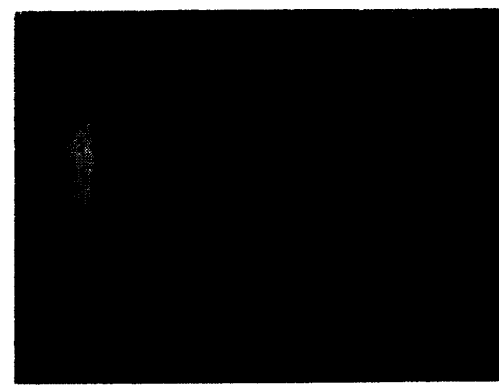
図 11 第2種スターリング数を用いた方法, $M=40$, $N=4 \times 4$
Fig. 11 2nd Stirling method with $M=40$, $N=4 \times 4$.

への出力である (プリンタへの出力のときのみ, ドットの白黒を反転させた). なお, 原像に比べ出力画像が縦長となっているのは, ディスプレイとドットプリンタの縦横比が1対1でないためでありディスプレイへの画質が粗く見えるのは使用しているディスプレイの解像度によるものである. 図 11 は, 最大階調数 $M=40$ の出力結果で, 図 10 に比べ画質が粗く, プリンタ出力はやや黒つぶれが起きている. このことより, 画質のきめの細かさは, 最大階調数に左右されていることがわかる. 図 12 に, 独立確率法, 図 13 に条件付確率法の出力結果を示す. これらは, 図 10, 11 に比べ画質が粗く, プリンタへの出力は黒つぶれを起している. 図 12 と 13 の比較は論旨とは異なるので行わない. ここで比較のために, 図 14 に条件付確率法と同程度の画質となる $M=16$ のディスプレイへの出力結果を, 図 15 に入力画像データに γ 補正を行い条件付確率法を適用したドットプリンタへの出力画像を示す.

表 1 は, キャラクタディスプレイに出力するまでの



(a) Graphic display



(b) Dot printer

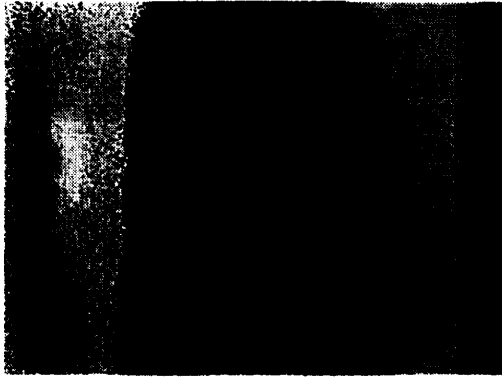
図 12 独立確率法, $N=4 \times 4$
Fig. 12 Independent probability method with $N=4 \times 4$.

表 1 各手法の処理時間の比較
Table 1 Comparison of process time for each methods.

処理方法		処理時間 (機械語)	時間比
独立確率法		4分29秒	1.14
条件付確率法		4分34秒	1.17
第2種 スターリング数 による方法	$M=16$	57秒	0.24
	$M=40$	3分5秒	0.79
	$M=50$	3分55秒	1.00

ドットマトリクスの大きさ $N=4 \times 4$

処理時間を示す (i 8086 の機械語プログラムによる). これより本手法で良質な画像が得られる $M=50$ のとき処理時間は, 独立確率法および条件付確率法に比べて 87% 程度となり処理速度が速いことがわかる. また, ディスプレイへの画質が同程度となる $M=16$ の処理速度は条件付確率法の約 1/5 と速いことがわかる. 本手法は γ 補正が同時に行われていることを考慮すればデータに何らかの方法により γ 補正を行ってから, 従来の濃度パターン法を用いる場合より処理が簡



(a) Graphic display



(b) Dot printer

図 13 条件付確率法, $N=4 \times 4$ Fig. 13 Conditional probability method with $N=4 \times 4$.図 14 第 2 種スターリング数を用いた方法, $M=16$, $N=4 \times 4$ Fig. 14 2nd Stirling method with $M=16$, $N=4 \times 4$.

単に行える。

5. む す び

本論文では、濃淡画像の 2 値化法でとくに視覚特性を考慮して第 2 種スターリング数を用いたランダムパターン法について述べた。本手法は、ドットマトリクスの白点の配分を決定するとき、その確率分布に第 2

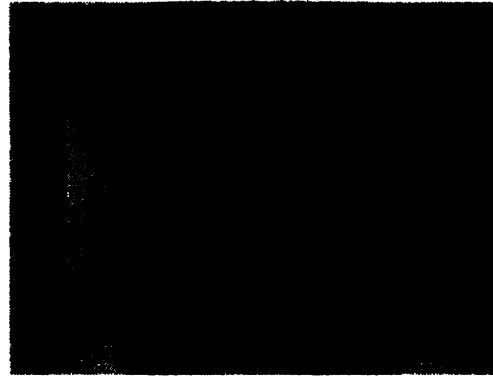


図 15 条件付確率法 (r 補正あり), $N=4 \times 4$
Fig. 15 Conditional probability method with $N=4 \times 4$ (after process r -correction).

種スターリング数が現れるようにしてある。その結果、入力強度に対する出力強度特性が γ 特性に近いため、 γ 補正を必要とする画像、または γ 特性の逆関数による補正を必要とする画像に対し、データの変換なしに直接適用できることがテレビカメラからのオンライン入力により確かめられた。

また、最大階調数を 50 とした本手法の処理時間は独立確率法および条件付確率法の 87% 程度となり処理速度の向上がみられた。

画像実験はマイクロコンピュータとそのキャラクタディスプレイを用いて行ったもので、一般家庭でもテレビカメラを用いて簡単に画像処理を行うことができる。さらに、本手法は従来の手法に比べてより少ない回路素子でハードウェア化することが可能である。

謝辞 本研究に卒業研究としてご協力いただいた松下通信工業の寺内美奈、東邦電子の斎藤隆および卒業生の杉浦圭彦、樽川かおるの諸氏に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Knowlton, K. and Harmon, L.: Computer-produced Grey Scales, *Comput. Gr. Image Process.*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-20 (1972).
- 2) 小野文孝: ディザ法, 画像電子学会誌, Vol. 10, No. 5, pp. 388-397 (1981).
- 3) Jarvis, J. F., Judice, C. N. and Ninke, W. H.: A Survey of Techniques for the Display of Continuous Tone Pictures on Bilevel Displays, *Comput. Gr. Image Process*, Vol. 5, No. 1, pp. 13-40 (1976).
- 4) 黒沢, 飯島: Haar 変換に基づく新しい濃淡画像の 2 値化表現法, 情報処理学会論文誌, Vol. 20, No. 3, pp. 218-224 (1978).
- 5) 戸川隼人: 濃淡画像のディスプレイ, 第 11 回ブ

- プログラミングシンポジウム報告集, A 9 (1970).
6) 藤村是明: ドット式表示装置による濃淡図形表示の方法, 情報処理, Vol. 15, No. 7, pp. 503-509 (1974).
7) 安田, 長谷川: 単一符号化方式による中間調の

ある画像のファックス伝送記録, TV 学会研資, 画像伝送, 7-3 (1974).

(昭和 59 年 12 月 12 日受付)

(昭和 60 年 2 月 21 日採録)