

論文

デジタル視覚特性と再構成画像による画像解析

保坂 靖夫*

(2007.9.26 受理)

Digital Image Analysis by Using Human Visual Resolution

Yasuo HOSAKA*

The image of analog color TV has been analyzed by using the human visual resolution for three primary colors. However, these analysis results are not suitable for the hardcopy image that is recorded by using digital color fine dots. So, we measured the human visual resolution for digital fine dots, and got the minimum dot size that we can distinguish individual dot in each space frequency. Otherwise, we formed the reconstruction image by using the analog visual resolution and the Fourier transform, and analyzed the dither pattern image noise and quality. Further, we checked the influence that smooth edge dots or Error Diffusion Image method exert on the image quality.

人の目の視覚特性はアナログテレビの開発と並行して詳細に調べられてきたが、デジタルカラー複写機やプリンターなど [1, 0] 2値の記録ドットで構成した静止画像に対する視覚特性の調査がなく、静止画像の画質は人の視覚的感覚量で判断されてきた。ここでは、ドットで記録したデジタル静止画像に対して人が識別できる最小ドットと空間周波数との関係を明らかにしたデジタル視覚特性を用い、人が認識しているドット画像を二次元フーリエ級数と従来の視覚特性から再構成した各種ディザパターンとの画質を比較調査した。さらに、分散型または集中型ディザパターンが中間調に及ぼす影響、記録ドットの断面濃度分布の効果、および誤差拡散法が画像に及ぼす影響などについて示した。

1. はじめに

プリンターやデジタル複写機などに搭載される電子写真やインクジェット記録技術は、気温や湿度などの環境で画質が著しく変動する。そのため、環境に影響されない飽和濃度の [1, 0] 2値の記録ドットで画像を形成し、安定な画質を得ている。この2値記録ドットで中間調画像を再現するには、単位面積当たりの記録ドット数を制御するディザ法が用いられるが、画質の向上は従来から記録ドットを微細化することで行われてきた。しかし、微細化すると記録ドット数が増加することで画像メモリも増え、かつカラー演算処理用CPUなどの周辺技術の高速化が必要になり、その開発にも多大な時間と労力を要する状況になっている。

本報告では、人が識別できる [1, 0] 2値の記録ドットの大きさを解像度ごとに求めたデジタル視覚特性を用い、従来の視覚特性と二次元フーリエ級数から求めた各種ディザ法に対する中間調の再構成画像を用いて画質を予測し、実際の記録画像と

比較検討した。その結果、実際の記録画像と再構成画像から予測した画像とが、良い一致を示した。また、分散型ディザパターンを用いるとはドット数の増加とともにドットが周期的に識別できるようになり画像が劣化すること、ドットの断面濃度分布も画質に影響を与えること、さらに中間調再現に使用する誤差拡散法のデジタル視覚特性上における特徴などを明らかにした。

2. デジタル視覚特性とドット画像の再構成

初めに、人がドットを識別する最小ドットを解像度ごとに求めたデジタル視覚特性^{1,2)}の特徴と、デジタル視覚特性を用いて予測できる各種ディザパターン画像の画質について述べる。ここでは便宜上従来から光学系で測定されている視覚特性をアナログ視覚特性とし、記録紙上に記録した [1, 0] 2値の静止画パターンに対する視覚特性をデジタル視覚特性とした。

2.1 人が識別できる最小ドットの濃度換算

人が明視の距離 (30 cm) から識別できる最小ドットの大きさを網膜上の面積に換算した値を刺激値と定義し¹⁾、解像度ごとの最小刺激値を与える黒色の記録ドットに対するデジタル視覚特性を Fig. 1(a) に示した。この定義した刺激値 Se は次式 (1) で示され、 W と H はドット (またはラインパターン) で決まる幅と長さである。 L は観測距離で、2.4 cm は人の眼球の

* 菅原印刷株式会社 企画室

〒111-0051 東京都台東区蔵前 3-15-1 エスピービル

* Research & Development, Sugawara Printing Co., Ltd.

3-15-1 Kuramae, Taitouku, Tokyo, 111-0051, JAPAN

平成 19 年 12 月退職

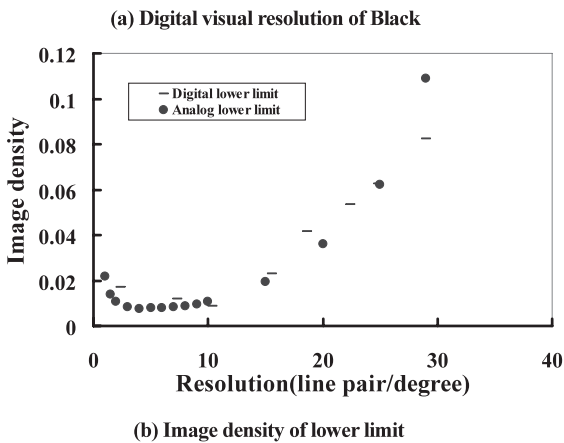
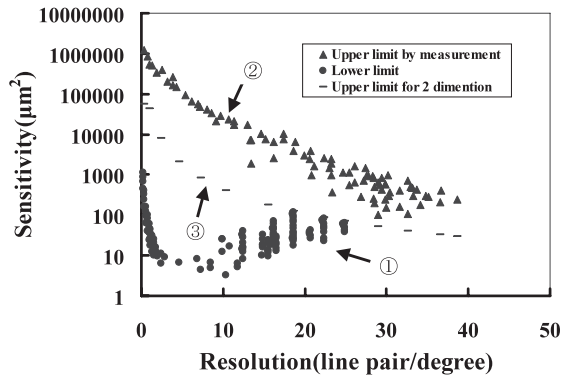


Fig. 1 Lower limit of digital visual resolution.

平均の大きさである。

$$Se = W \times H \times (2.4/L^2) [cm^2] \quad (1)$$

図中●印はドットを識別できる最小刺激値近辺の多数の測定点を解像度ごとに示し、この解像度ごとの最小刺激値の集合を下限①とした。▲印は測定に用いた記録ドット（またはラインパターン）の大きさで決まる上限で、解像度ごとの最大値の集合を測定上限②とした。人がドット（またはラインパターン）を識別できる測定点は下限①と測定上限②の間に多数存在するが、ここでは省略している。また、—印は二次元配列のドットに適用したとき、最大コントラストを与えるドットの大きさが周期の1/2になる範囲を示し、二次元上限③として示した。ドットの大きさが周期の1/2以上になると刺激値は増加するが、コントラストは逆に減少することになる。

この下限①に相当する解像度と明視の距離に換算したドットの大きさから、次式(2)の二次元フーリエ級数の係数 $K_{m,n}$ にアナログ視覚特性³⁾を導入し、再構成画像のコントラスト C_{visual} を求める。

$$C_{visual} = \{A_0V + \sum_{M=1}^{\infty} K_m \times A_mV \times \cos(m\omega_X T_X)\} \times \{B_0V + \sum_{n=1}^{\infty} K_n \times B_nV \times \cos(n\omega_Y T_Y)\} \quad (2)$$

ここで ω_X , ω_Y は、空間周波数（解像度） f_X , f_Y を用いて次式で与えられる。

$$\omega_X = 2\pi f_X, \quad \omega_Y = 2\pi f_Y$$

$$f_{X,Y} = (L/T_{X,Y}) \times (\pi \text{radian}/180^\circ) [\text{line pair/degree}] \quad (3)$$

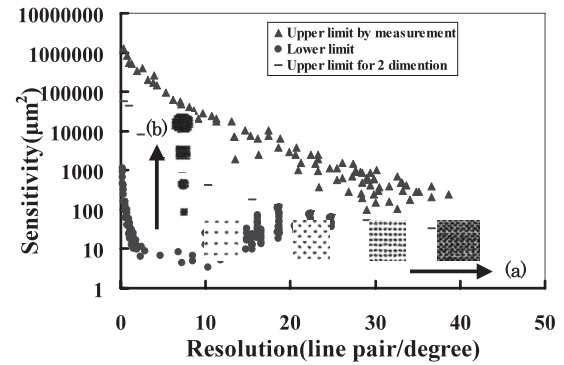


Fig. 2 Dither pattern arrangement in digital visual resolution.

T_X , T_Y は記録紙上のドットまたはラインサンプルの X 軸, Y 軸上の周期である。以上のようにして求めたコントラスト C_{visual} を、次式(4)を用いて画像濃度に変換し、Fig. 1(b)の—印で示した。アナログ視覚特性で定義しているコントラスト⁴⁾ C_{visual} を記録技術の画像濃度 D に変換する場合も次式(4)を用いた。

$$D = -\log \{(1 - C_{visual}) / (1 + C_{visual})\} \quad (4)$$

一方、ドットが微細化すると人はドットを濃度に変換して認識ようになる。図中の●印はアナログ視覚特性の測定法で測定されている識別可能な最小コントラストを画像濃度に変換した値である。デジタル視覚特性の各解像度に対する識別可能な最小ドットを与える画像濃度と、アナログ視覚特性の測定法による最小濃度とはほぼ一致する結果が得られ、微細ドットが濃度に変換されていることが明らかになった。このアナログ視覚特性による最小濃度は解像度 8 line pair/degree で 0.0079 の値を示し、濃度 1.2 の画像では 152 階調を識別し、濃度 1.5 では 190 階調を識別することになる。そのため、[1, 0] 2 値のデジタル量で階調を再現するには 256 階調が必要になる。以降の各種ディザパターンの画像判定には、このアナログ視覚特性の測定法による最小濃度を用いた。

2.2 ドットパターン配置による画像予測

つぎにデジタル視覚特性を用い、異なるディザパターンによる記録画像の画質を検討した。ディザパターンは、分散してドット数が増加する分散型とドットが集中して増加する集中型について示した。Fig. 2 は両者のディザパターンのドット数を増加させたときのデジタル視覚特性上の移動を模式的に示したものである。矢印(a)は分散型ディザパターンの移動を示し、同一刺激値上を高解像度方向に移動する。ドット数が増加して解像度が高くなるとデジタル視覚特性上のドット識別領域外になり、滑らかな画像になることが予測できる。一方、集中型ディザパターンはドット数の増加と共に同一解像度上を刺激値が増加する矢印(b)方向に移動し、ドットパターンが容易に識別されて荒れた画像になることが分かる。また、ディザパターン中のドット配置により連続ドットが生ずるとドットが大きくなったことに相当し、人はノイズとして認識することになる。

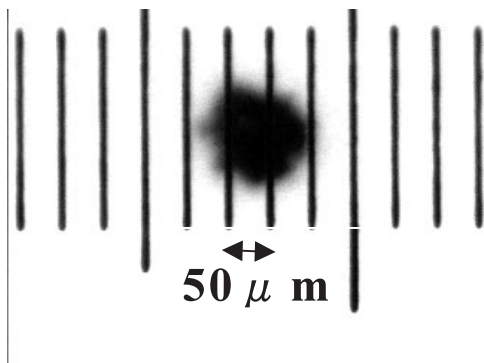
3. ディザパターンによる再構成画像と記録画像

ここでは、分散型ディザパターンと集中型ディザパターンを

用い、各パターンのドット数に対応した再構成画像を求め、実際の記録画像と比較した。その結果から、人が認識している記録画像を再構成画像で再現できることを明らかにした。

3.1 分散型ディザパターンの再構成画像と記録画像

分散型ディザパターンにおける各階調の再構成画像を作成し、デジタル視覚特性から求めたドットの識別限界を与える再構成画像と実際の記録画像とを比較した。Fig. 3(a)にインクジェットプリンター (EPSON MJ910) で記録した大きさ $100\ \mu\text{m}$ のドットを示し、Fig. 3(b)に階調記録に使用した 16×16 ドット構成の分散型ディザパターン配置を示す。このときの2ドット周期で記録した最大コントラストの解像度は $26\ \text{line pair/degree}$ に相当し、明視の距離 (30 cm) にある $100\ \mu\text{m}$ の記録ドットは刺激値 $64\ \mu\text{m}^2$ になる。この分散型ディザパターンを用い、ドット数を増加したときの空間周波数 (解像度) に対する再構成画像を作成し、得られた再構成画像からドット濃度と背景濃度を式 (4) から解像度ごとに求めた。記録紙上に 16×16 ドットのディザパターン中 $1600\ \mu\text{m}$ 間隔に1ドット配置したときの画像を Fig. 4(a)に、人が認識しているドットの再構成画像を Fig. 4(b)に示した。図中、凸部4ヶ所が記録ド

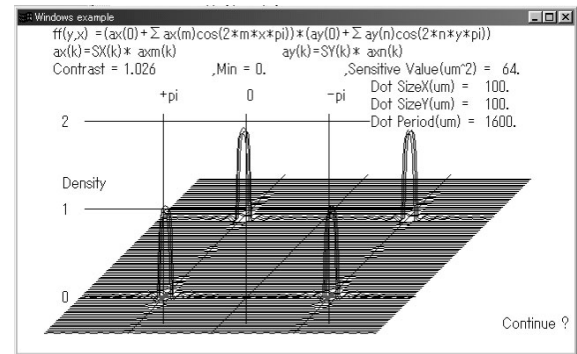


(a) Dot sample of $100\ \mu\text{m}$ diameter

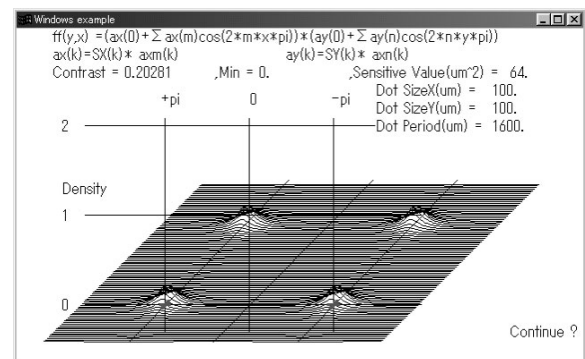
	128	32	160	8	136	40	168		130	34	162	10	138	42	170
192	64	224	96	200	72	232	104	194	66	226	98	202	74	234	106
48	176	16	144	56	184	24	152	50	178	18	146	58	186	26	154
240	112	208	80	248	120	216	88	242	114	210	82	250	122	218	90
12	140	44	172		132	36	164	14	142	46	174		134	38	166
204	76	236	108	196	68	228	100	206	78	238	110	198	70	230	102
60	188	28	156	52	180	20	148	62	190	30	158	54	182	22	150
252	124	220	92	244	116	212	84	254	126	222	94	246	118	214	86
	131	35	163	11	139	43	171		129	33	161	9	137	41	169
195	67	227	99	203	75	235	107	193	65	225	97	201	73	233	105
51	179	19	147	59	187	27	155	49	177	17	145	57	185	25	153
243	115	211	83	251	123	219	91	241	113	209	81	249	121	217	89
15	143	47	175		135	39	167	13	141	45	173		133	37	165
207	79	239	111	199	71	231	103	205	77	237	109	197	69	229	101
63	191	31	159	55	183	23	151	61	189	29	157	53	181	21	149
255	127	223	95	247	119	215	87	253	125	221	93	245	117	213	85

(b) Dispersion dither pattern of 256 dots

Fig. 3 Dot sample and dispersion dither pattern using in experiment.

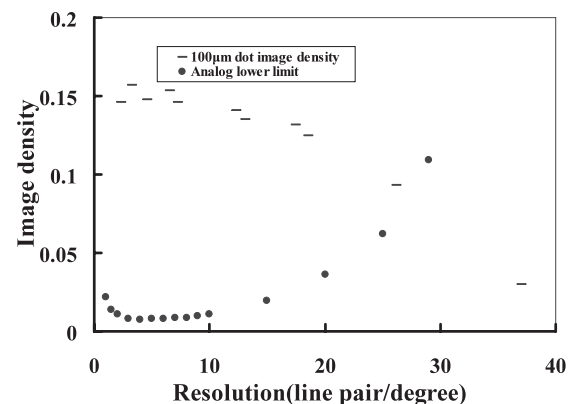


(a) Original dot

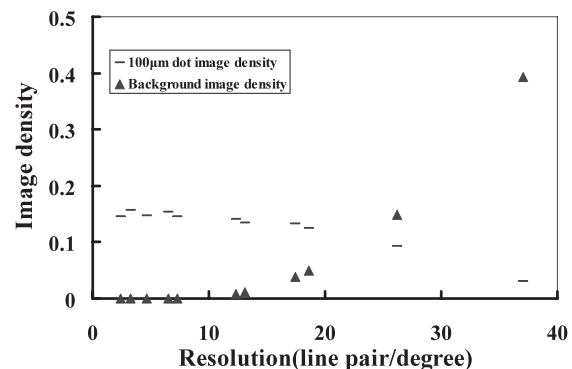


(b) Reconstruction dot

Fig. 4 Reconstruction dot image.



(a) Dot image density for resolution



(b) Background image density for resolution

Fig. 5 Dot image density calculated from reconstruction image.

ットに相当する。

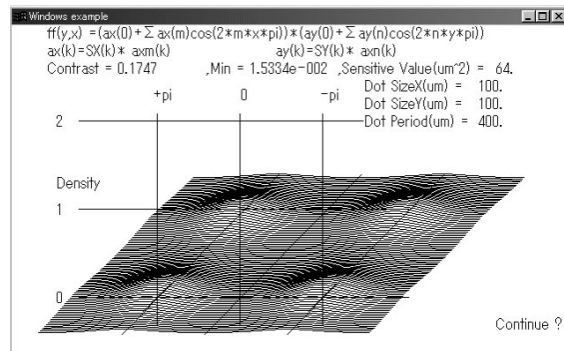
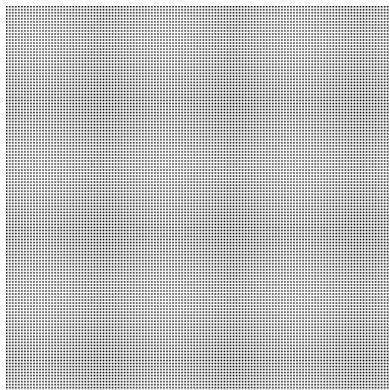
この分散型ディザパターン中のドット数を増やし、256 ドット中 128 ドットが隣接して千鳥状に埋まる解像度 37 line pair/degree 相当まで解像度ごとに再構成画像を求め、得られた再構成画像から変換したドット濃度を Fig. 5(a) の - 印に示した。また、アナログ視覚特性の測定法で既に得られている識別可能な最小濃度を式(4)から求め●印で示した。図から明らかなように解像度の増加と共にドット濃度は減少し、解像度 26 line pair/degree 付近で識別限界以下の値になる。Fig. 2 に示したように、この値は $64 \mu\text{m}^2$ の同一刺激値上を解像度方向に移動し、識別限界の値と交叉する解像度と一致する。また、Fig. 5(b) に示した▲印は 128 ドットに達するまでの背景濃度の変化を示し、- 印は同じドット濃度の変化である。

つぎに、分散型ディザパターンでドット数を増やしたときの実際の記録画像と再構成画像を Fig. 6 に示した。Fig. 6(a) は、 16×16 の分散型ディザパターン中に $100 \mu\text{m}$ のドットを 4 ドット間隔に 4×4 ドット配置した図で、13.1 line pair/degree 相当の解像度の記録画像（左図）と再構成画像（右図）である。図から分かるように記録画像中のドットが識別できる。一方、再構成画像で求めたドット濃度はデジタル視覚特性上で識別限界以上の 0.135 の値を示し、ドットを識別できることがデジタル視覚特性からも明らかである。また、ディザパターン中 2 ドット間隔に 8×8 ドット記録した後、さらに 1 ドット間隔

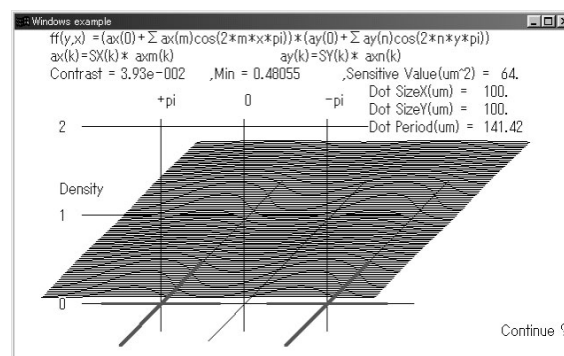
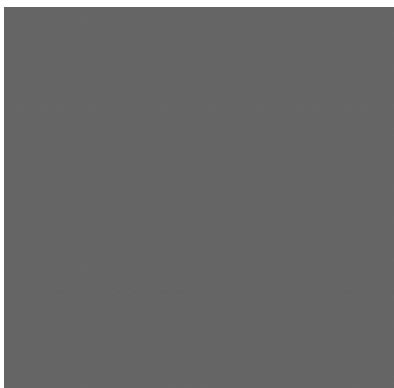
に千鳥状に追加した解像度 37 line pair/degree 相当の 128 ドットの記録画像（左図）と再構成画像（右図）を Fig. 6(b) に示した。実際の記録画像はドットを識別できない様画像となっており、再構成画像から求めたドット濃度も識別限界以下の 0.03 の値でドットを識別できないことが明らかである。このように分散型ディザパターンでは、アナログ視覚特性を導入した再構成画像から実際の記録画像を良く説明できる結果を得た。このことから、滑らかで様な階調表現を与える記録ドットの大きさと解像度とをデジタル視覚特性から予測できることが明らかになった。

3.2 集中型ディザパターンの再構成画像と記録画像

つぎに、 16×16 ドット構成のドット数を中心から増した集中型ディザパターンのドット配置を Fig. 7(a) に示した。中心から X 軸と Y 軸方向にドット数を順次増加させ、 16×16 ドットで埋めつくされるまでのドット濃度と背景濃度の変化を再構成画像から求め、Fig. 7(b) に示した。刺激値が 5×5 ドット相当の $1600 \mu\text{m}^2$ まではドット数と共にドット濃度が増加するが、それ以上のドット数になると濃度は最大濃度の 1.2 になる。また、背景濃度は 14×14 ドット当の刺激値 $12544 \mu\text{m}^2$ に達するまではほとんど上昇せず、集中したドットがはっきり識別できることが分かる。ドット数をさらに増加すると、逆に背景濃度が急激に上昇してドット濃度が低下し、集中したドットが識別し難くなる。



(a) 16 printed dots



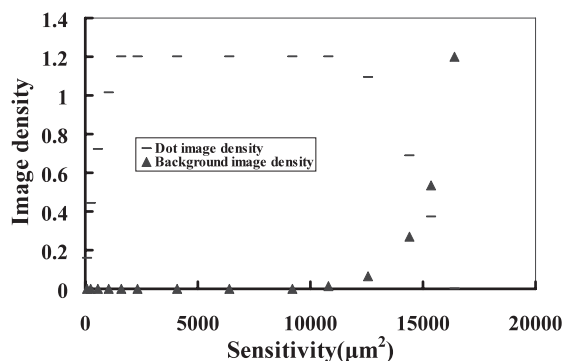
(b) 128 printed dots

Fig. 6 Print sample and reconstruction image of 256 dots dispersion dither pattern.

この集中型ディザパターンで16×16中5×5ドットを記録したときの記録画像と再構成画像をFig.8に示した。Fig.8(左図)が実際の記録画像で、集中したドットがはっきり識別できる。Fig.8(右図)は1600 μm 間隔に並んだ解像度3.27 line pair/degree 相当の刺激値が1600 μm^2 になる大きさ500 μm の集中ドットの再構成画像である。再構成画像に示したドット濃度は最大値の1.2を示し、背景濃度は記録紙の白地のままである。このようにドットがはっきり識別でき、記録画像と再構成画像とが良い一致を示した。

253	249	237	233	221	217	205	201	197	209	213	225	229	241	245	255
246	193	189	177	173	161	157	145	149	153	165	169	181	185	195	251
242	186	141	137	125	121	109	105	101	113	117	129	133	143	191	239
230	182	134	97	93	81	77	65	69	73	85	89	99	139	179	235
226	170	130	90	61	57	45	41	37	49	53	63	95	127	175	223
214	166	118	86	54	33	29	17	21	25	35	59	83	123	163	219
210	154	114	74	50	26	13	9		15	31	47	79	111	159	207
198	150	102	70	38	22				11	19	43	67	107	147	203
202	146	106	66	42	18	10			23	39	71	103	151	199	
206	158	110	78	46	30	14		8	12	27	51	75	115	155	211
218	162	122	82	58	34	24	20	16	28	32	55	87	119	167	215
222	174	126	94	62	52	48	36	40	44	56	60	91	131	171	227
234	178	138	98	88	84	72	68	64	76	80	92	96	135	183	231
238	190	142	132	128	116	112	100	104	108	120	124	136	140	187	243
250	194	184	180	168	164	152	148	144	156	160	172	176	188	192	247
254	244	240	228	224	212	208	196	200	204	216	220	232	236	248	252

(a) Concentration dither pattern



(b) Dot and background image density for sensitivity

Fig. 7 Concentration dither pattern of 256 dots and dot image density.

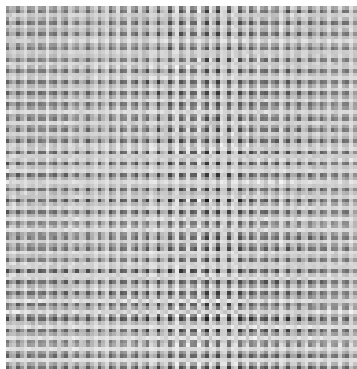


Fig. 8 5×5 dots print sample of and reconstruction image of concentration dither pattern.

以上のように、ドットの大きさとディザパターン中のドット配置が決まると、アナログ視覚特性を導入した再構成画像から人が認識している記録ドット画像を予め予測できることが明らかになった。

4. 再構成画像による画像予測

分散型ディザパターンではドット数を増加して解像度を上げると、ドットを識別せずに一様画像を与える解像度領域になることがデジタル視覚特性上から明らかになった。しかし、実際の記録画像ではドット配置によってドットを識別できることがある。ここでは、この原因をデジタル視覚特性と再構成画像から明らかにし、さらにドットの断面濃度分布が画像に及ぼす影響と、中間調画像表現に使用する誤差拡散法が画像に及ぼす影響について検討した。

4.1 分散型ディザパターンで生ずる周期的ノイズ

ここでは、16×16ドット構成の分散型ディザパターンで、Fig.9(a)に示すように隣接ドットに接することなく順次ドット(1)が増加して8×8ドットに達するまでをfirst stepとし、さらに16ドットおきにドット(2)を千鳥状に追加した状態をsecond stepとしてFig.9(b)に示した。このように16×16ドット中128ドットが千鳥状に埋まり、新たなドット(3)がドット間に追加される状態をthird stepとしてFig.9(c)に示した。

各stepのドットに対する再構成画像を求め、再構成画像から得られたドット濃度と人が識別できる最小濃度を比較し、stepごとの初期段階にドットノイズが生ずることを次に示した。Fig.10は、16×16ドット構成の100 μm のドットによる分散型ディザパターンのfirst stepとsecond stepを示し、ドットが最初に記録されたときの再構成画像である。Fig.10(a)

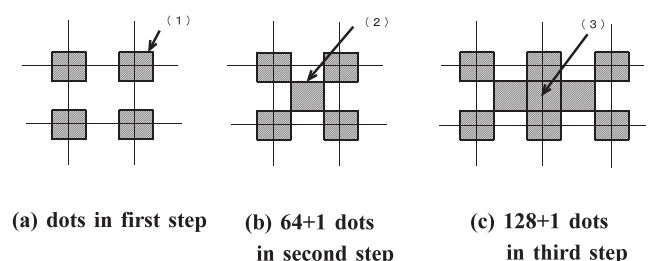
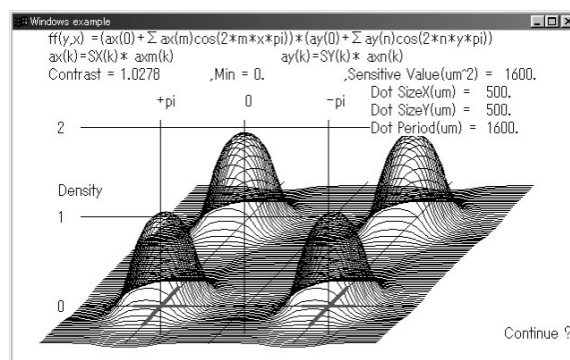
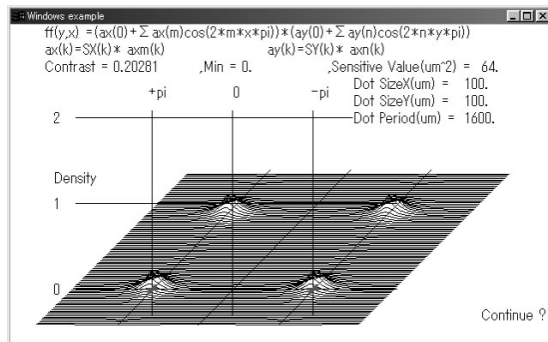


Fig. 9 Dot arrangement of dispersion dither pattern.

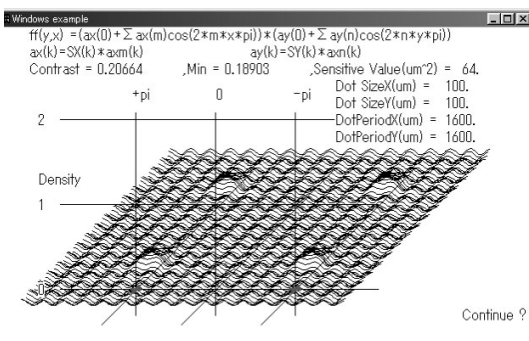


は first step で 16 ドット間隔に 1 ドット記録したときの再構成画像である。解像度は 3.27 line pair/degree に相当し、再構成画像からドット濃度として 0.157 の値が得られ、Fig. 1(b) からドットを識別できる値であることが分かる。

Fig. 10(b) は解像度 26 line pair/degree 相当の 2 ドット間隔に 64 ドット記録した後、Fig. 9(b) のように千鳥状に新たに 1 ドット追加したときの再構成画像である。追加したドットの濃度は first step の 16 ドット間隔に記録した濃度 0.157 に等しい値を示している。各ステップにおける新たにドットを追加した



(a) 1 dot in first step



(b) 64+1 dots in second step

Fig. 10 Dot reconstruction image of dispersion dither pattern.

ときの解像度に対するドット濃度の変化を Fig. 11 に示した。図中—印は first step を示し、解像度 3.27 line pair/degree 相当の最初のドットから 2 ドット間隔に埋まるまでのドット濃度変化である。◆印は千鳥状にドットを追加したときの second step のドット濃度の変化である。●印は人が識別できる解像度ごとの最小濃度を示す。first step および second step とともに解像度が低い初期段階のドット濃度が大きく、荒れた画像になることが分かる。ドット数が増加して解像度 26 line pair/degree 付近になると、ドット濃度は、人が識別できる限界濃度 0.076 に近い 0.093 の値を示す。さらに、ドット数が増加して解像度 37 line pair/degree 相当になるとドット濃度は識別限界値より小さい 0.03 以下の値になる。さらに、Fig. 9(c) に示したように隣接ドットを追加すると、ディザパターン中に集合した大きいドットまたはラインが存在することに相当し、初期段階の低解像度 3.27 line pair/degree 付近では集合ドットが識別できることになる。このように分散型ディザパターン中のドット数を増加すると、step ごとに低解像度領域からドットが配置され、人が識別しやすい低解像度領域に偏ったドット分布になる。

4.2 ドット断面濃度分布の効果

ここでは、Fig. 12(a) に示す断面濃度分布が sine 形状のド

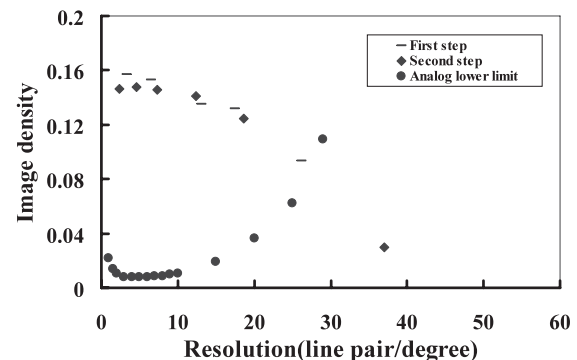
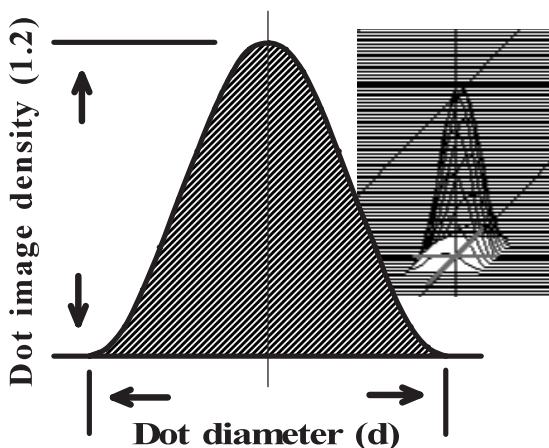
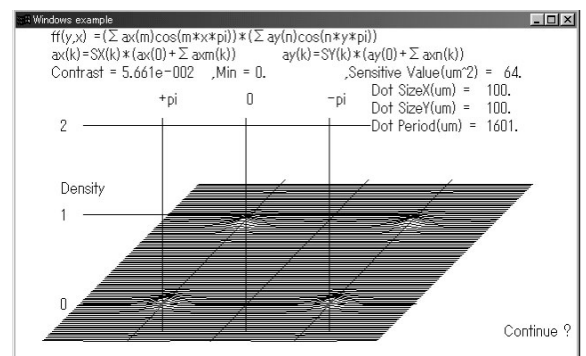


Fig. 11 Dot image density in first and second step of dispersion dither pattern.



(a) Dot image of sine distribution section



(b) 1 dot in first step

Fig. 12 Dot of sine distribution section and dot reconstruction image.

ットを用いた場合の画像に与える影響を、再構成画像を用いて調べた。計算では、インクが最大に広がった状態をドットの大きさとした。Fig. 12(b)は、 16×16 ドットの分散型ディザパターン中に $100 \mu\text{m}$ の sine 形状のドットが 16 ドット間隔に配置されたときの再構成画像である。解像度は $3.27 \text{ line pair/degree}$ に相当し、ドット間隔は $1600 \mu\text{m}$ である。再構成画像から求めたドット濃度は 0.043 を示し、同一解像度の $[1, 0]$ 2 値の矩形濃度のドットの 0.157 より小さくなることから分かる。この sine 形状のドットを用い、ドット数を増加して解像度を上げたときの解像度に対するドット濃度の変化を Fig. 13 の■印で示した。また、 $[1, 0]$ 2 値の場合を図中の—印で、識別限界の最小濃度を●印で示した。 $[1, 0]$ 2 値のドットは解像度 $29 \text{ line pair/degree}$ 付近で人の識別限界近くの 0.076 になる

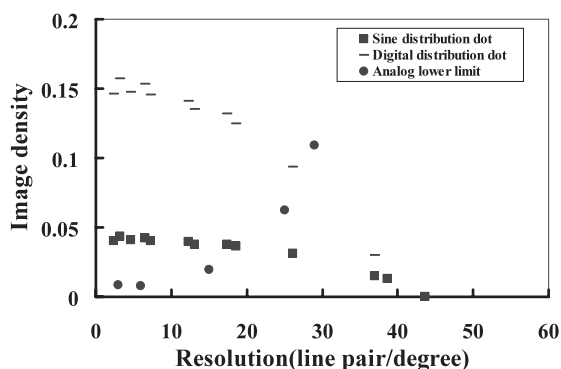
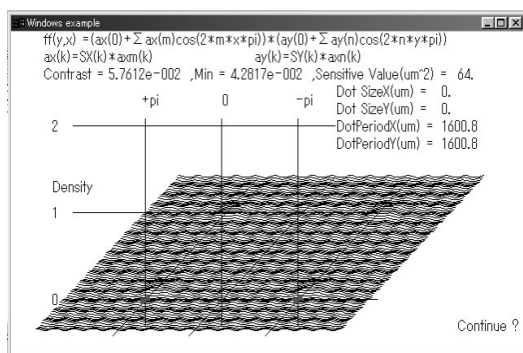
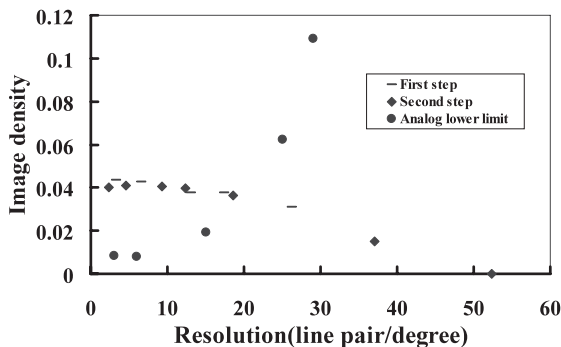


Fig. 13 Dot image density for digital and sine distribution section.



(a) 64+1 dots in second step



(b) Dot image density for resolution in first and second step

Fig. 14 Reconstruction image and dot image density.

が、sine 形状のドットでは $20 \text{ line pair/degree}$ 付近の低い解像度から識別限界近い 0.037 の値を示す。このように、sine 形状のドットは低い解像度で一様画像が得られることが分かる。

つぎに、この sine 形状のドットを用い 2 ドット間隔に 64 ドット記録した後、ドットを千鳥状に追加したときのドットの濃度変化を求めた。Fig. 14(a)は、64 ドット記録後に千鳥状に新たなドットを追加した再構成画像である。Fig. 14(b)は、64 ドットに達するまでのドット濃度変化を—印で、千鳥状にドットを追加したときのドット濃度変化を◆印で示した。いずれも解像度が低い初期段階ではドット濃度が識別限界以上の 0.043 の値を示し、解像度が $20 \text{ line pair/degree}$ 付近になると識別限界の 0.036 以下の値になる。このように分散型ディザパターンに sine 形状のドットを用いると低い解像度で識別限界以下の濃度になり、一様画像が得られる領域が増加することが分かる。

4.3 デジタル視覚特性を用いた誤差拡散法の画像評価

ここでは、中間調画像作成時に使用する誤差拡散法の画像について、デジタル視覚特性を用いて検討した。誤差拡散法は、 $[1, 0]$ 2 値の記録ドットで生じた画像濃度誤差を周囲のドットに順次振り分け、全体として濃度誤差を最小にする方法である。実際の処理は、画像の左上から右方向に走査し、順次上から下に誤差を拡散させるパターンを作成し、その都度 $[1, 0]$ 2 値のドットの記録を計算から判定する。誤差を割り振るパターンは多数考案されているが、比較的良好な画像を与える Floyd & Steinberg 法を用いて検討した。Fig. 15 に Floyd & Steinberg 法の誤差拡散パターンと、記録ドット配置⁵⁾の拡大図を示した。この図は 128 ドット中 64 ドット程度を記録する

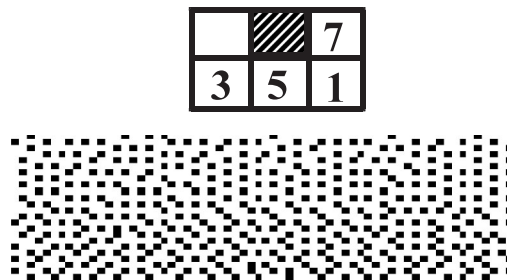


Fig. 15 Dot arrangement of Error Diffusion Image (by Floyd & Steinberg).

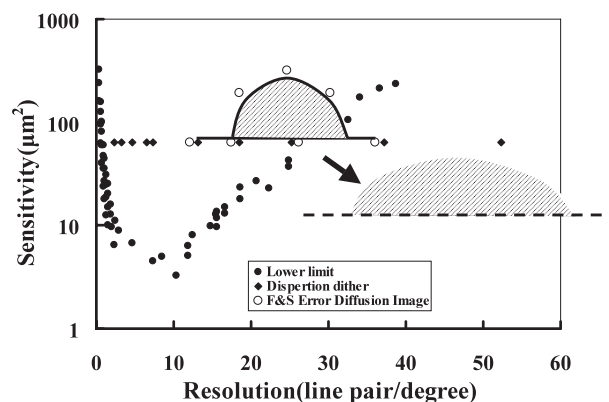


Fig. 16 Digital visual resolution of Error Diffusion Image.

際の階調パターンに相当する。

この Floyd & Steinberg 法のドットまたはライン分布を拡大パターンから解像度ごとに調べ、 $100\mu\text{m}$ ドットを用いたときの解像度と刺激値との関係を Fig. 16 のデジタル視覚特性上に示した。◆印は分散型ディザパターンの場合で同一刺激値上をドット数の増加と共に高解像度方向に移動し、解像度 26 line pair/degree 付近になると●印で示した識別限界以下の値になる。さらにドット数が増加すると、再び低い解像度領域から新しいドット配置が始まる。一方、図中○印と斜線領域が誤差拡散法のドット分布を模式的に概略示した図で、ドットが分散した低い濃度領域では分散型ディザパターンに近く、濃度が上昇し解像度が高くなると集中型ディザパターンまたはラインパターンが加わった状態になる。中間濃度領域の 128 ドットに相当する解像度 37 line pair/degree 付近では再び分散型ディザパターンに近いドット配置になる。この中間濃度を境に白黒反転したほぼ対象パターンでドット数が増加して反転したパターンの解像度が低下し、スムーズな階調特性が得られる。図中斜線部は集中型ディザパターンまたはラインパターンが混在する領域である。このように誤差拡散法は、人が識別しにくい高い解像度領域に分布し、分散型ディザパターンより均一画像が得やすくなる。また、ドットの大きさを $100\mu\text{m}$ から $50\mu\text{m}$ に変更したときの分布の様子を図中矢印で模式的に示した。解像度が 2 倍に、刺激値が $1/4$ になり、人の識別領域外になるため良好な画像が予測できる。このように、デジタル視覚特性を用いて人の識別領域外になるようにドットの大きさと誤差拡散法のパターンの最適化を図るか、予め分散型ディザパターンと集中型ディザパターンさらにはラインパターンなどの異なるパターンを組み合わせ最適化を図ることで、階調特性に優れた良好な画像が得られることが期待できる。

5. 結 論

人が識別できる記録紙上の記録ドットの大きさと空間周波数（解像度）との関係を示すデジタル視覚特性を用い、二次元フーリエ級数に従来の視覚特性を導入した再構成画像から、人が認識しているドットの大きさと解像度との関係を明らかにした。 16×16 ドットの分散型ディザパターンに $[1, 0]$ 2 値の $100\mu\text{m}$ ドットを用いてドット数を増加するとデジタル視覚特性上の同一刺激値上を高解像度方向に移動し、明視の距離（30 cm）換算で $200\mu\text{m}$ 間隔に並んだ解像度 26 line pair/degree 相当では刺激値が識別限界以下の値になり、一様画像が得られることが予測でき、実際の記録画像と一致する結果を得た。このとき、ディザパターン中のドット数が増加すると新たなドット配置が行われ、低い解像度領域からドットが埋まり、周期的にドットが識別されるようになる。また、断面濃度分布がサイン形状に緩やかに変化する $100\mu\text{m}$ のドットを用いた分散型ディザパターンでは、 $400\mu\text{m}$ 間隔相当の低い解像度 13 line pair/degree で一様画像が得られることが明らかになった。集中型ディザパターンではドット数が増加するとデジタル視覚特性の

同一解像度を刺激値が増加する方向に移動して荒れた画像になることが予測され、ドットがはっきり識別できる実際の記録画像と良く一致した。一方、誤差拡散法の Floyd & Steinberg 法によるドット刺激値の分布を解像度ごとにデジタル視覚特性上に描くと、低解像度領域では分散型ディザパターンに近いドット配置になり、中間の解像度領域では分散型と集中型ディザパターンさらにラインパターンが混在した状態になる。 $100\mu\text{m}$ ドットを用いて 256 ドット中 128 ドットを記録した 37 line pair/degree の中間領域では再び分散型ディザパターンになり、この領域から白黒反転した分布状態でドット数の増加が見られる。この誤差拡散法の分布からドットの大きさを $50\mu\text{m}$ 程度にすると一様で良好な画像が得られることが予測できた。今後は、他の誤差拡散法などについてもデジタル視覚特性上から詳細な解析を行う必要がある。

以上の解析は群馬工業高等専門学校電子工学科在職中の測定データをもとに行ったもので、同専攻科の学生および卒業生のデータ作成の協力と諸先生方からの貴重なご意見を頂いたことを、ここに感謝します。

参 考 文 献

- 1) 保坂靖夫：“2 値記録カラー画像の視覚解像度特性”，Japan Hardcopy 2001 論文集，p 75（2001）
- 2) 吉田知子，南智恵美，保坂靖夫：“低解像度デジタル視覚特性の測定と解析”，Japan Hardcopy 2004 論文集，p 139（2004）
- 3) F.W. Campbell and J.G. Robson：“Application of Fourier Analysis to the Visibility of Gratings”，J. Physiol., 197, pp. 551-556（1968）.
- 4) 大頭 仁，行田尚義：“視覚と画像”，森北出版株式会社（1994），pp 23
- 5) <http://www21.atwiki.jp/submarine/pages/173.html>



保坂 靖夫

1970 年 東北大学大学院工学研究科電子専攻 博士課程修了 工学博士。同年（株）東芝 総合研究所電子機器研究所（現 研究開発センター情報・通信システム研究所）入社 デジタルカラー複写機，プリンター，薄型スキャナー，液晶ディスプレイなど画像関連機器の開発に従事。複数の社内表彰と特許取得。1998 年（国立）群馬工業高等専門学校 電子情報学科教授 情報処理教育センター長，電子情報工学科主任，JABEE 委員，教務委員など歴任。2005 年（株）菅原印刷 顧問 学校教育システムの企画と教室コントロールシステムの立ち上げ。2007 年（株）菅原印刷 退職。電子情報通信学会，日本画像学会，画像電子学会，（元）静電気学会 会員，日本画像学会，画像電子学会で編集委員歴任。静電気学会論文賞（1998 年），日本画像学会論文賞（1999 年）