

## 論 文

## 識別可能なドット粒径とデジタル視覚特性

保坂 靖夫\*

(2007.9.26 受理)

## Human Visual Resolution for Digital Fine Dots

Yasuo HOSAKA\*

Human visual resolution was measured in details for the three primary colors in the analog TV. However, these results are not suitable for the hardcopy printers that print out half-tone images by using digital fine dots of the three primary color inks. So, we measured the minimum print dots that we can distinguish for each space frequency, and constructed the digital visual resolution. Furthermore, we recomposed the digital fine dot images recognized through eye by using the Fourier transform and the analog visual resolution, and made clear that the fine dots are transformed the image density.

人の目の視覚特性は、アナログテレビ開発と並行して従来から詳細に調べられてきた。一方、記録紙上に [1, 0] 2 値の記録ドット集合で画像を形成するカラープリンターやデジタルカラー複写機などの静止画像に対する視覚特性とその視覚特性を用いた画質に関する研究報告がなく、高画質化は銀塩写真をモデルにしてドットを微細化することで行われてきた。しかし、微細化に伴う画像メモリの増加やカラー演算処理の高速化などハード面での課題が多くなっている。本報告では、記録ドットをどこまで微細化すれば良質な画像として人が認識するかなど理論的目標値を明らかにするため、人が識別できる減法三原色のドットの大きさと空間周波数との関係を測定で求めた。また、二次元フーリエ級数に従来の視覚特性を導入して人が認識しているドットの再構成画像を作成し、新たに測定した記録ドットに対する視覚特性と比較した。その結果、人が視覚系を通して微細ドットを観測すると濃度に変換され、その濃度は従来から知られている識別可能な最小濃度と一致することを明らかにした。

## 1. はじめに

テレビなど光の明るさで画像を形成する画像機器については従来から人の視覚特性が詳細に調べられ<sup>1)</sup>、視覚特性を考慮した理論的な装置設計が行われてきた。一方、その重要性を急速に増してきた Information Technology (IT) では人と装置を結ぶマンマシーンインターフェースが不可欠になっており、デジタルデータを画像に変換するカラープリンターなどが重要な役割を担っている。このカラープリンターには種々の記録技術が採用されているが何れの記録技術も環境変動に不安定なため、[1, 0] 2 値の飽和濃度による安定したドットで画像を形成するデジタル記録技術が必須になっている。このデジタル記録技術で階調濃度を表現するにはドット数を制御するディザ法が用いられ、画質の向上は銀塩写真粒子を目標にドットの微細化で行われてきたが、最終的な記録画像の画質の判断は人の目

視による感覚量に頼ってきた。

本報告では、[1, 0] 2 値の記録ドットをどこまで微細化すれば人が満足する領域になるのか、理論的根拠を与える黒色 (Black) と減法三原色 (Yellow, Magenta, Cyan) ドットのデジタル視覚特性を明らかにすることを目的とした。そのため、人が識別できるドットの大きさと解像度との関係を示すデジタル視覚特性を測定から求め、二次元フーリエ級数に従来の視覚特性を導入し、人が認識している記録ドットを再構成して両者の関係を明らかにした。その結果、人が微細ドットを画像濃度に変換して認識していること、人が識別できる各空間周波数 (解像度) の最小ドットの変換濃度は人が識別できる最小の画像濃度と一致すること、識別可能な最小ドットを用いて記録するとノイズの無い画像が得られることなどが明らかになった。ここでは、新たに測定した黒色と減法三原色の記録ドットに対する視覚特性とテレビなどによる従来の光学系に対する加法三原色の視覚特性を区別するため、前者の視覚特性をデジタル視覚特性とし、後者の視覚特性をアナログ視覚特性として示した。

\* 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 &amp; Development, Sugawara Printing Co., Ltd.

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

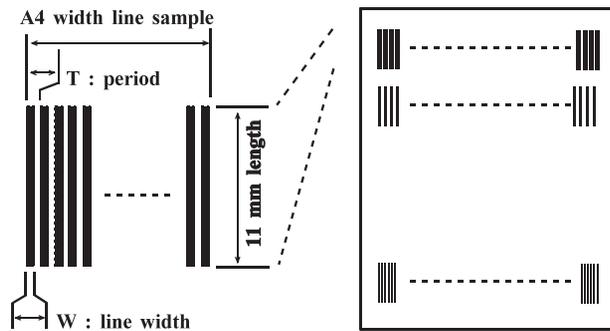
平成 19 年 12 月退職

## 2. デジタル視覚特性の測定

記録ドットで画像を形成するプリンターでは、ドットを微細化すると人がドットを識別できず滑らかな画像になり、ドットが大きくなるとドットが識別されて荒れた画像になる。そのため、記録ドットによる画像の画質向上はドットの微細化で行われてきたが、人が滑らかな均一画像と判断するドットの大きさの目標値が明確でなかった。ここでは、明視の距離に置いた記録紙上の [1, 0] 2 値のパターンについて人が識別できる大きさと解像度との関係を明らかにするデジタル視覚特性の測定方法について示す。

### 2.1 デジタル視覚特性の測定方法

従来のアナログ視覚特性の測定方法は一般に光学系を用いる方法が採用され、光学系からの光の明るさを被験者が直接観測して測定する<sup>1)</sup>。しかし、本報告のデジタル視覚特性の測定は、実際の記録画像との対応を図るため Fig. 1(a) に示すように一定ライン幅のパターンを一定周期で A4 幅一杯に記録し、縦方向には周期と幅の異なるパターンを Fig. 1(b) に示すように多数配置して用いた。このような種々のパターンを多数作成し、被験者が同一パターン中のラインを個々に分離して識別で



(a) Digital line pattern

(b) Resolution sample

Fig. 1 Sample pattern for visual resolution measurement.

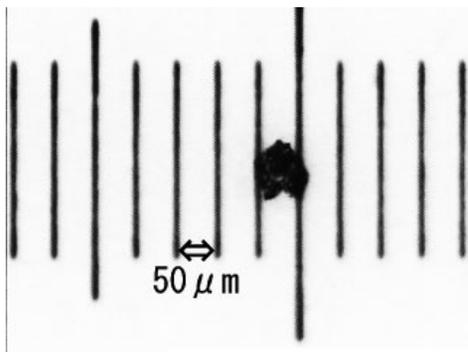


Fig. 2 Photograph of print dot.

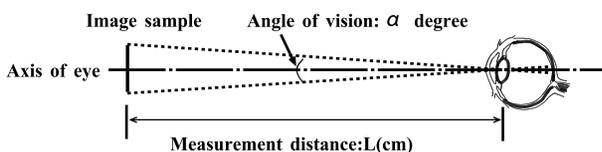


Fig. 3 Reduction image on eye retina.

きる限界の距離を測定し、デジタル視覚特性を決定する。

測定に用いたパターンは、インク顔料による色相変化などの影響がないように常に同一インクジェットプリンター (EPSON PM-2000C) の Yellow (Y)・Magenta (M)・Cyan (C) と Black (Bk) を用いた。最小ライン幅は Fig. 2 に示した最小ドット 60 μm で作成し、記録紙面上でのラインサンプル長の最大値を 11 mm としてライン幅 W が常に周期 T 以下になるようにした。また、より微細なライン幅の測定は記録サンプルと被験者との距離を大きくすることで対応した。

測定は、測定用照明光源にココム太陽灯ランプ (KISPICS) を用い、測定時の記録紙面照度を常に 300 Lux 一定とし、Fig. 3 に示すように観測距離 L を変えて行った。測定距離は最大 300 cm とした。デジタル視覚特性の測定は多くの被験者が得られる多少視力の低い視力 1.0 の 20 歳の学生を対象とし、測定のために視力測定用ランドルト環を用いて視力 1.0 の学生に被験者を絞った。

後で定義する刺激値は網膜上に単純に縮小したライン面積として算出し、ラインを識別できる限界の網膜上のライン面積 (つまり刺激値) と解像度 (空間周波数) との関係求めてデジタル視覚特性を決定した。解像度は視角 1 度に入るライン数を次式 (1) から求めた。

$$\text{Resolution} : f = (L/T) \times (\pi \text{radian}/180^\circ) [\text{line pair/degree}] \quad (1)$$

L: Measurement distance [cm]

2.4: Diameter of eyeball (Mean value) [cm]

### 2.2 刺激値の導入

刺激値 (Se) は、網膜上に単純に縮小投影したラインパターンが目の光センサーである桿体や錐体を刺激する面積とし、式 (2) から求める。この [1, 0] 2 値の記録パターンを人が分離して識別できる測定距離 (L) を求め、刺激値を決定した。ここで W は一次元配列のパターン幅で周期 T より小さい値とし、ラインパターン長 H は実験に使用した 11 mm を最大値とした。

$$\text{Sensitivity} : Se = W \times H \times (2.4/L)^2 [\text{cm}^2] \quad (2)$$

網膜上の視神経や桿体および錐体の大きさは網膜上の存在密度<sup>1)</sup>から概算すると、視神経が 100 μm、桿体が 7 μm、錐体が 33 μm 程度の大きさになる。また、Fig. 2 に示した 60 μm のドットを用いて明視の距離 (30 cm) から観測すると、網膜上に投影されるドットの大きさは眼球の平均的大きさを 2.4 cm とした単純計算から 4.8 μm 程度の大きさになり、桿体一つを 2 個のドットで、錐体一つを 47 個のドットで刺激することになる。

### 2.3 デジタル視覚特性の二次元配列ドットへの適用

デジタル視覚特性の測定には一次元配列のラインサンプル画像を用いたため、二次元配列のドット (またはライン) 画像に対して適用範囲に制限が生ずる。その適用範囲を次に示す。式 (1) の解像度 f と式 (2) の刺激値 Se から共通変数である測定距離 (L) を消去すると、解像度 f に対応した刺激値 Se を与える式 (3) が得られる。刺激値 Se の値は測定距離 L に関係のないサンプルのライン幅 W とライン長 H および周期 T で決まる値になる。

$$Se = (1/f^2) \times (2.4 \times \pi/180)^2 \times W \times H/T^2 \quad (3)$$

二次元配列のドットの場合は  $W=H$  で、かつドットの大きさが周期の 1/2 に一致した  $W=H=T/2$  のとき最大のコントラストを与え、このときの解像度ごとの刺激値  $Se$  を求めると次式(4)が得られる。この上限のコントラストより大きい刺激値のドットは、コントラストが逆に減少することになる。

$$Se = (1/f^2) \times (2.4 \times \pi/180)^2 \quad (4)$$

例えば、解像度 20 line pair/degree で二次元配列したドットサンプルでは、(4)式から上限の刺激値が  $123 \mu\text{m}^2$  になる。このようにして求めた値から、常に二次元配列ドットの最大コントラストを与えるドットの大きさをカバーできるように一次元配列の記録サンプル長と測定距離を設定した。

### 3. ライン識別領域の測定結果

多数のラインサンプルを用い、被験者が任意の距離から観測して個々のラインサンプルを識別できる限界の観測距離を求め、Y, M, C, Bk 各色の刺激値と解像度との関係を式(1)と式(2)から計算してデジタル視覚特性を決定した。

#### 3.1 黒色 (Bk) インクに対するデジタル視覚特性

ラインの幅、長さ、解像度の異なる多数のサンプルを黒色インクで作成し、ラインを分離して識別できる刺激値と解像度との関係を測定距離から求め、Fig. 4 に示した。縦軸に刺激値の対数を、横軸に解像度を示してある。図中の●印は、ラインを分離して識別できる刺激値の下限領域付近における複数の測定点である。このとき、解像度ごとの測定点の最小刺激値を総称して下限①とした。上限付近の▲印で示した測定点はラインサンプルの大きさで制限される測定点で、各解像度に対する最大測定点の集合を同様に総称して測定上限②として示した。識別可能な測定点は下限①と測定上限②の間に多数存在するが、ここでは省略してある。また、式(3)で計算した二次元配列のドットのコントラストを最大にする刺激値を解像度ごとに求めて○印で示し、二次元上限③とした。二次元配列のドットに対しては下限①と二次元上限③に挟まれた領域が周期 T の 1/2 以下になるデジタル視覚特性上の領域となる。実際の測定は、二次元領域をカバーできるように刺激値の測定上限②を二次元上

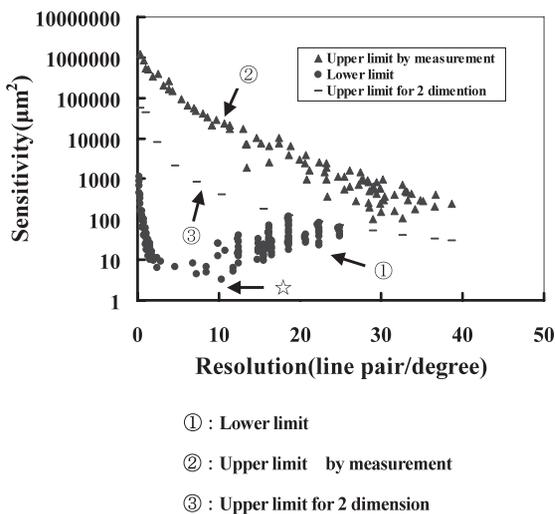


Fig. 4 Digital visual resolution of Black.

限③より大きい領域まで行った。この下限①と二次元上限③は解像度 27 line pair/degree の刺激値  $60 \mu\text{m}^2$  付近で交叉し、デジタル視覚特性の二次元配列の適用範囲を与える。この解像度と刺激値は、明視の距離 (30 cm) 換算で周期  $T=193 \mu\text{m}$  間隔に並べた  $97 \mu\text{m}$  の周期 T の 1/2 の大きさのドットに相当する。同一解像度の測定上限②を与える刺激値  $1584 \mu\text{m}^2$  は、明視の距離換算でドット幅  $97 \mu\text{m}$ 、長さ 2.6 mm のラインサンプルに相当し、二次元上限③の適用範囲をカバーしている。一方、解像度 10 line pair/degree 付近の☆印で示した最小刺激値は  $3.3 \mu\text{m}^2$  を示し、この値は明視の距離換算でほぼ周期 500  $\mu\text{m}$  間隔に並べた  $23 \mu\text{m} \times 23 \mu\text{m}$  のドットに相当する。このように測定距離を大きくして求めた明視の距離換算の微細ドットは、使用したインクジェットプリンターでは形成できず、プリンター開発の一つの目標値になる。

#### 3.2 YMC 各色のデジタル視覚特性

マゼンタとシアンの測定結果を Fig. 5 に示した。ブラックとほぼ同様の結果が得られ、図中○印で示したマゼンタでは最小刺激値がブラックより多少大きい  $10.2 \mu\text{m}^2$  の値になり、そのときの解像度は 18.6 line pair/degree である。明視の距離 (30 cm) 換算では  $280 \mu\text{m}$  間隔に並んだ  $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$  のドットに相当する。

また、▲印で示したシアンもほぼ同様の値を示し、解像度 18.4 line pair/degree で最小刺激値が  $14.3 \mu\text{m}^2$  になり、明視の距離換算で  $280 \mu\text{m}$  間隔に並んだ  $47.3 \mu\text{m} \times 47.3 \mu\text{m}$  相当のドットになる。マゼンタ、シアンともに最小刺激値と二次元配列ドットの上限は解像度 33 line pair/degree 付近で交叉し、ブラックより多少高い値になる。また、同様に測定したイエローの最小刺激値は他の色と比較して大きくなり、 $74.9 \mu\text{m}^2$  の値を示して解像度は約 9.8 line pair/degree となる。明視の距離換算では  $530 \mu\text{m}$  間隔に並んだ  $110 \mu\text{m} \times 110 \mu\text{m}$  の大きさとなり、このように大きい値を示すことから白地に印刷された Yellow ドットが他の色より識別し難いことが分かる。この Yellow の場合は、二次元配列ドットの上限と最小刺激値が解像度 18 line pair/degree 付近で交叉し、デジタル視覚特性の適用範囲は狭くなる。

#### 3.3 識別可能な各色の最小ドット

減法三原色 Y, M, C と Bk のデジタル視覚特性から、人が識別できる最小刺激値と解像度、さらに明視の距離 (30 cm) に置かれた紙面上のドットの大きさと周期を Table 1 に示し

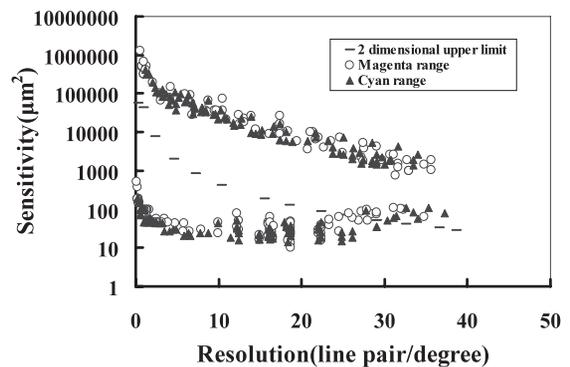


Fig. 5 Digital visual resolution of Magenta and Cyan.

Table 1 Minimum visual dot size of each color.

	Black	Cyan	Magenta	Yellow
Minimum sensitivity [ $\mu\text{m}^2$ ]	3.3	14.3	10.2	74.9
resolution [line pair/degree]	10.4	18.4	18.6	9.8
(at 30 cm distance of distinct vision)				
Dot size [ $\mu\text{m}^2$ ]	23×23	47×47	40×40	110×110
period [ $\mu\text{m}$ ]	500	280	280	530

た。網膜上に投影された Black, Cyan, Magenta の最小刺激値を与えるドット画像は、一つの桿体を複数のドット画像で刺激し、最小刺激値の大きい Yellow は逆に複数の桿体を一つのドット画像が刺激することになる。錐体に対しては各色とも一つの錐体を複数のドット画像が刺激していることが分かる。

#### 4. 視覚によるデジタル量からアナログ量への変換

従来から知られている人の目の規格化した伝達関数  $H(\omega)$  のアナログ視覚特性を二次元フーリエ級数に導入し、人が認識しているラインまたはドットの規格化したコントラスト画像の再構成を行う。求めた再構成画像から記録技術で定義する画像濃度に変換することで最小刺激値に相当するドット濃度を求め、既に光学系の測定法で測定されている人が識別できる最小濃度との関係を明らかにする。

##### 4.1 人が認識しているコントラスト画像の再構成

周期的に配列したライン（またはドット）画像を人が認識している画像に再構成するには、ライン画像を二次元フーリエ級数に展開し、人の目のアナログ視覚特性つまり伝達関数  $H(\omega)$  を各周波数のフーリエ係数に導入し、求めたコントラスト画像を記録技術で定義する画像濃度に変換する。ここでは二次元フーリエ級数を用い、人が認識しているコントラスト画像の再構成について説明する。人の目を通過して人が認識している画像コントラストを  $C(\omega)$  とし、そのときの最大値  $C_{\max}$  で規格化した相対コントラストを求め、その逆数を次式(5)から計算して人の目の伝達関数  $H(\omega)$  を得る<sup>2,3)</sup>。

$$H(\omega) = C_{\max}/C(\omega) \quad (5)$$

識別限界を与える白黒パターン画像の解析には、光学系の測定法で測定されている Fig. 6 で示したアナログ視覚特性の伝達関数  $H(\omega)$  を用いた<sup>4)</sup>。

以降の解析は伝達関数が既に得られている白黒画像に限定した。このアナログ視覚特性から明らかなように高い空間周波数（解像度）で減衰するため、高い空間周波数成分を多く含む微細ドットを人は認識できず、一様濃度の画像と判断することが予測できる。解析には二次元配列の記録ライン画像を用い、規格化した画像コントラスト  $C^{\text{visual}}$  を記録ドットの二次元フーリエ級数  $F_C(\omega)$  と伝達関数  $H(\omega)$  のコンボリューション(\*)を与える次式(6)から求める。

$$C^{\text{visual}} = F_C(\omega) * H(\omega) \quad (6)$$

このようにして画像の再構成は、二次元フーリエ級数の X 軸、Y 軸の空間周波数ごとにアナログ視覚特性を導入し、次式から求める。ここでは、ライン（またはドット）形状を角型と近似した。

(6)

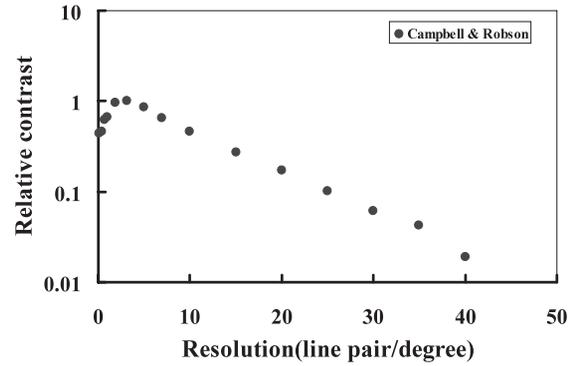


Fig. 6 Analog visual resolution (by F.W. Campbell & J.G. Robson).

$$C^{\text{visual}} = \left\{ A_0 + \sum_{M=1}^{\infty} K_M \times A_M \times \cos(m\omega_X T_X) \right\} \times \left\{ B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} K_n \times B_n \times \cos(n\omega_Y T_Y) \right\} \quad (7)$$

$\omega_X$ ,  $\omega_Y$  は X 軸、Y 軸方向の空間角周波数を示し、空間周波数（解像度） $f_X$ ,  $f_Y$  との関係は次式になる。

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

##### 4.2 再構成画像によるデジタル視覚特性の解析

人が識別できる解像度ごとの限界のドット画像を二次元フーリエ級数と伝達関数を用いて再構成し、ドットの規格化したコントラスト画像を得る。求めた再構成画像から記録技術で定義する画像濃度に変換し、アナログ視覚特性の光学法で得られている人が識別できる最小濃度と比較する。二次元フーリエ級数の展開式(7)で与えられる各空間周波数のフーリエ係数  $A_m$ ,  $B_n$  と、Fig. 6 の空間周波数ごとの伝達関数  $H(\omega)$  の値  $K_m$ ,  $K_n$  との積を求め、人が視覚で認識するドットパターンを式(7)から再構成し、その再構成画像を Fig. 7 に示した。

Fig. 7(a) は、人が識別できる最小刺激値を与えるドットを明視の距離に換算した大きさ  $23 \mu\text{m} \times 23 \mu\text{m}$  ドットの画像で、ドット間隔はほぼ  $500 \mu\text{m}$  である。横軸は記録ドットの 2 周期分を、縦軸は規格化したコントラスト  $C^{\text{visual}}$  の大きさを示す。Fig. 7(b) は、伝達関数  $H(\omega)$  を用いて計算した人が認識している再構成画像を示し、もとの画像と比較すると数倍に拡大した濃度の低いボケた画像になることが分かる。

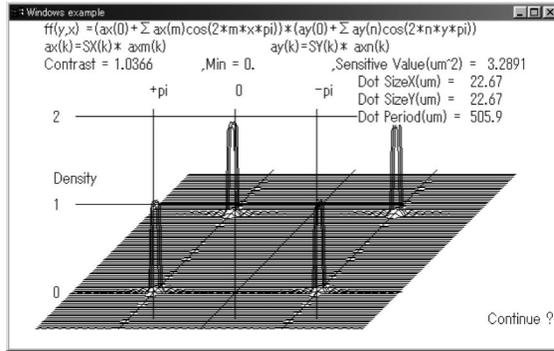
次に、実際の記録技術で使用する画像濃度との関係を示す。Fig. 8 に示すように、アナログ視覚特性で定義するコントラスト  $C^{\text{visual}}$  は、紙面からの反射光  $I_{\max}$  と画像からの反射光  $I_{\min}$  を用い、背景と画像からの反射光の差  $(I_{\max} - I_{\min})$  と画像が存在する領域の全反射光  $(I_{\max} + I_{\min})$  との比として式(8)で定義されている。

$$C^{\text{visual}} = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) = (1 - I_{\min}/I_{\max}) / (1 + I_{\min}/I_{\max}) \quad (8)$$

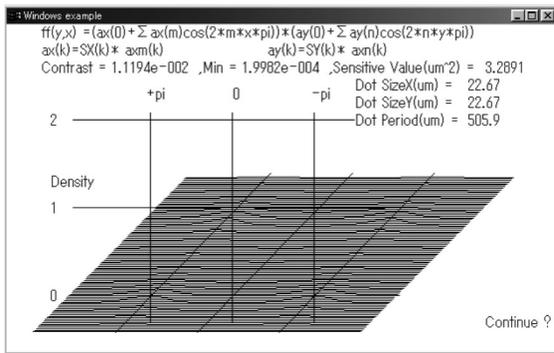
一方、記録技術で定義する画像コントラスト  $C_{\text{image}}$  と画像濃度  $D$  との関係は次式で与えられる。

$$D = -\log(C_{\text{image}}) = -\log(I_{\min}/I_{\max})$$

ここで、アナログ視覚特性の測定と記録技術で使用される共



(a)Original dot



(b)Reconstruction dot

Fig. 7 Reconstruction image of 23 μm.

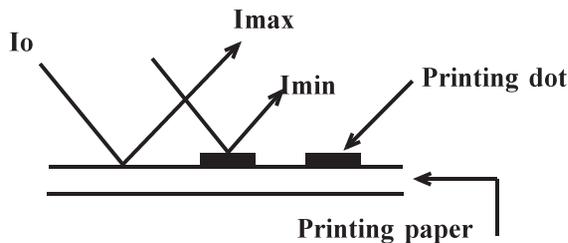


Fig. 8 Reflection light from background and print dot.

通項 ( $C_{\text{image}} = I_{\text{min}}/I_{\text{max}}$ ) を用い、画像濃度  $D$  とコントラスト  $C_{\text{visual}}$  との関係を示すと次式になる。

$$D = -\log \left\{ \frac{1 - C_{\text{visual}}}{1 + C_{\text{visual}}} \right\} \quad (9)$$

以上の式から  $C_{\text{visual}}$  は画像濃度  $D$  を用いて次式 (10) で与えられる。

$$C_{\text{visual}} = \frac{(1 - 10^{-D})}{(1 + 10^{-D})} \quad (10)$$

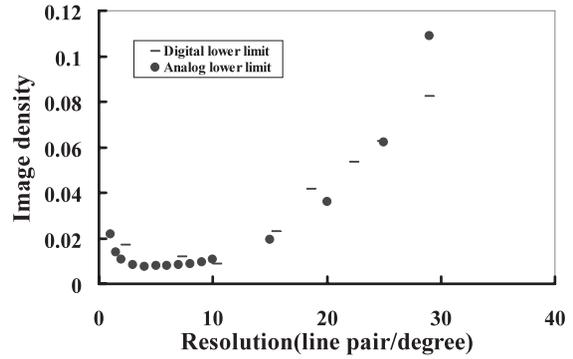
一方、再構成画像で求めた規格化したコントラスト  $C_{\text{visual}}^n$  を視覚特性のコントラスト  $C_{\text{visual}}$  に変換するため、ドットの最大濃度  $D^{\text{max}}$  を 1.2 としたときの最大コントラスト  $C_{\text{visual}}^{\text{max}}$  を求めると次式 (11) になる。

$$C_{\text{visual}}^{\text{max}} = \frac{(1 - 10^{-1.2})}{(1 + 10^{-1.2})} = 0.8813 \quad (11)$$

以上の結果から、規格化したコントラスト  $C_{\text{visual}}^n$  を実際のコントラスト  $C_{\text{visual}}$  に変換する式は次式 (12) で与えられる。

$$C_{\text{visual}} = C_{\text{visual}}^n \times C_{\text{visual}}^{\text{max}} = C_{\text{visual}}^n \times 0.8813 \quad (12)$$

式 (9) と式 (12) を用い、再構成画像で得た規格化したコントラスト画像を記録技術で定義する画像濃度に変換することが出



— sign : Digital lower limit

● sign : Analog lower limit

(calculated by data of Reference 3)

Fig. 9 Lower limit of visual resolution.

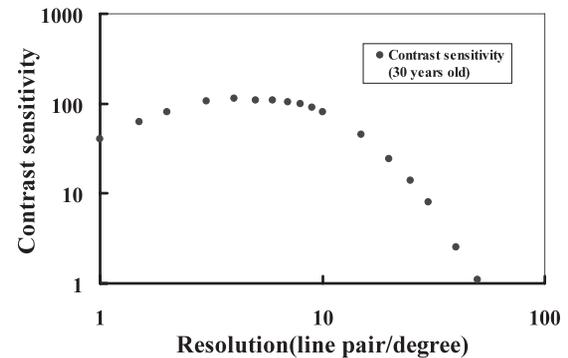


Fig. 10 Contrast sensitivity of 30 years old (by Reference 3)).

来る。以上の結果を用い、デジタル視覚特性の測定で求めた識別限界を与えるドットの再構成画像を解像度ごとに作成し、人が識別できる最小ドットに対する濃度と解像度との関係を Fig. 9 の -印で示した。

つぎに、アナログ視覚特性の光学系の測定法で測定されているコントラスト感度  $S(\omega)$  を用い、デジタル視覚特性の最小ドット濃度と人が識別できる最小濃度とを比較する。ここでコントラスト感度  $S(\omega)$  は、コントラスト  $C_{\text{visual}}(\omega)$  の逆数として次式 (13) で示される<sup>2,3)</sup>。

$$S(\omega) = 1/C_{\text{visual}}(\omega) \quad (13)$$

デジタル視覚特性の測定では多くの被験者が得られる多少視力の低い視力 1.0 の学生を対象にしたため、Fig. 10 に示した比較対象のコントラスト感度  $S(\omega)$  は 30 歳の値を用いた<sup>2)</sup>。

この各解像度のコントラスト感度をコントラスト  $C_{\text{visual}}(\omega)$  に変換し、記録技術で定義する画像濃度を式 (9) から求め、Fig. 9 の ●印で示した。デジタル視覚特性で測定した識別限界を与える最小ドットの画像濃度と、既存のコントラスト感度から求めた識別可能な最小濃度とは良く一致し、人が微細ドットを観測すると画像濃度に変換されることが分かる。両者の最小画像濃度  $D_{\text{min}}$  を比較すると、デジタル視覚特性では解像度 10 line pair/degree のとき画像濃度 0.0085 となり、コントラスト感度からは解像度 8 line pair/degree で濃度 0.0079 が得られ、

両者ともに近い値を示した。画像濃度が最大 1.2 の場合、コントラスト感度の最小濃度 0.0079 を用いると、人は最大 152 段階の階調を識別できることが分かる。このように再構成画像を用いると人が認識しているドット画像を再現でき、デジタル視覚特性の識別限界以下の領域を与えるドットを用いて記録すると、網膜上に投影される記録ドットは画像濃度に変換され認識されることが分かる。

5. 再構成画像を用いた画像予測

以上の結果から、人の識別限界を与える最小ドット以下の大きさのドットで記録すると滑らかな階調画像が得られることが予測できる。ここでは解像度 10 line pair/degree 相当の大きさ 23 μm の最小ドットを用いて二次元配列し、ドット間隔を狭めて記録密度を上げて解像度を上昇させたときのドット濃度と背景濃度を再構成画像から求め、さらに記録技術で定義する平均化した画像濃度を計算から求めて比較した。

5.1 最小ドット記録密度と画像濃度

人が識別できる大きさ 23 μm の最小ドットで記録した場合、分散配置して一様に記録密度を増加させたときの解像度に対する再構成画像を求め、さらに式(9)、式(10)、式(12)から解像度ごとにドット濃度に変換して Fig. 11 の -印で示し、背景濃度を▲印で示した。図中の●印はデジタル視覚特性の解像度ごとの識別可能な最小ドット濃度である。

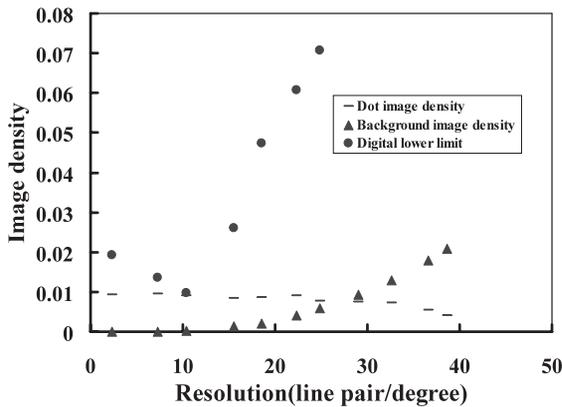


Fig. 11 Dot and background image density for 23 μm dot.

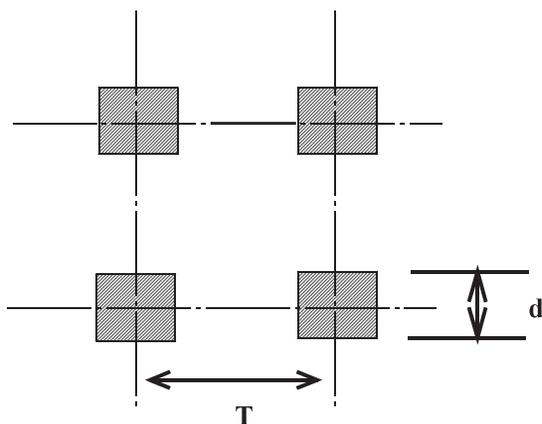


Fig. 12 Dot arrangement for average image density calculation.

この図から明らかなように 23 μm の最小ドットを用いて記録すると、-印で示したように全ての解像度で記録ドット濃度が識別可能な最小ドット濃度より小さく、滑らかな安定した画像が得られることが予測できる。

5.2 再構成画像の背景濃度と計算による平均濃度との比較

ここでは再構成画像から求めた背景濃度と、ドット濃度を面積で平均化して計算した画像濃度との比較を行う。平均化した濃度計算では、Fig. 12 に示すようにドット一周期 T で占める面積 S<sub>0</sub> を T<sup>2</sup>、ドットの大きさ d が占る面積 S<sub>d</sub> を d<sup>2</sup> とし、Fig. 8 と同様に紙面からの反射光を I<sub>max</sub>、記録ドットからの反射光を I<sub>min</sub> とした。またアナログ視覚特性のコントラスト C<sub>visual</sub> を記録技術のコントラスト C<sub>image</sub> に変換する式(9)において、コントラスト C<sub>visual</sub> の全反射光量を示す分母に面積 S<sub>0</sub> を、ドットによる光の変化量を示す分子にドット面積 S<sub>d</sub> を掛け、周期 T 内で平均化したコントラスト C<sub>dither</sub> を次式(14)から求める。

$$C_{dither} = (S_d/S_0)C_{visual} = S_d(I_{max} - I_{min})/S_0(I_{max} + I_{min}) = (d^2/T^2)(1 - 10^{-D})/(1 + 10^{-D}) \tag{14}$$

ここでドット濃度 D が 1.2 のとき式(14)は次式(15)になり、当然ながら d=T のとき濃度を示すコントラスト C<sub>dither</sub> は最大になる。

$$C_{dither} = (d^2/T^2)(1 - 10^{-D_{max}})/(1 + 10^{-D_{max}}) = 0.8813 \times (d^2/T^2) \tag{15}$$

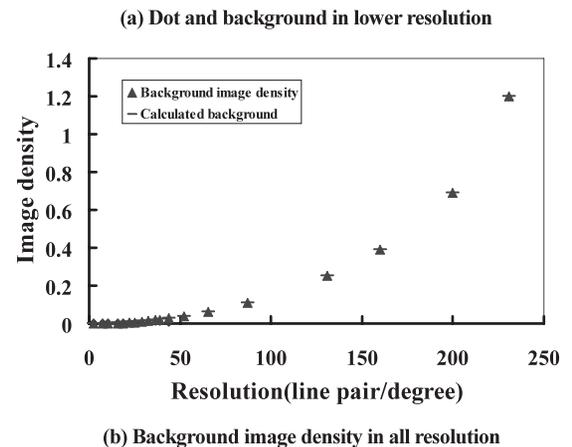
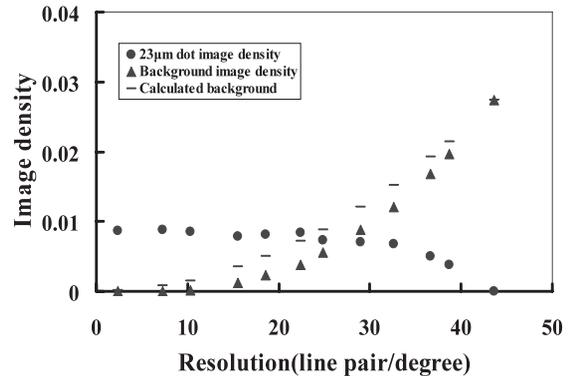


Fig. 13 Image density calculated by reconstruction image and average method.

さらに、式(9)のコントラスト  $C_{\text{visual}}$  の代わりにコントラスト  $C_{\text{dither}}$  を用い、記録技術の画像濃度に変換する。大きき  $23 \mu\text{m}$  の最小ドットの密度 ( $d^2/T^2$ ) が増加したときの画像濃度の計算結果を、Fig. 13 に示した。

Fig. 13(a)に、再構成画像から求めたドット濃度を●印で、背景濃度を▲印で、さらに面積計算から求めた画像濃度を－印で解像度 50 line pair/degree 付近まで示した。Fig. 13(b)には、再構成画像による背景濃度を▲印で、計算による面積平均化の画像濃度を－印で、全解像度領域について示した。このとき1ドット相当を仮の解像度として記録画像が全て埋まるベタ画像の解像度 227 line pair/degree 相当の特異点も含めた。このように、再構成画像でドット濃度が認められる解像度 40 line pair/degree までは平均化した背景濃度が大きい値を示し、ドット濃度が認められない高い解像度領域では両者が良い一致を示す結果を得た。

以上の結果から、人が識別できる限界以下のドットを用いて分散して記録すると、ドット濃度は常に人の識別限界以下になり、人は背景濃度しか認識できずに滑らかに変化する濃度の画像が得られることが分かる。

## 6. 結 論

記録紙上に減法三原色 [1, 0] 2 値の一定間隔に記録したラインサンプルを用い、記録画像に対するデジタル視覚特性を測定した。求めたデジタル視覚特性から、三原色ごとに人が識別できる最小ドットが存在し、Black では明視の距離 (30 cm) 換算で解像度 10 line pair/degree 付近のほぼ  $500 \mu\text{m}$  間隔に並んだ大きき  $23 \mu\text{m} \times 23 \mu\text{m}$  のドットになることが明らかになった。この値以下のドットで画像を形成すると、人はドットを識別できずに画像濃度に変換して認識するため、分散したドット集合を用いて画像濃度をコントロールできることが分かる。また、二次元フーリエ級数にアナログ視覚特性を導入した再構成画像から解像度ごとに人が識別できる最小ドットに対する濃度と、アナログ視覚特性の測定法による最小濃度とは良く一致する結果を得た。このように、再構成画像から人が認識している

ドット画像を予測でき、かつデジタル視覚特性から画質を判断できることが明らかになった。

本報告は群馬工業高等専門学校電子情報工学科在職中の測定データを解析したもので、電子情報工学科諸先生方からのご意見とデータ作成時の卒研生の協力をここに感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) 応用物理学会光学懇話会編：“生理光学一目の光学と視覚一”，朝倉書店 (1975)。
- 2) 大頭 仁，行田 尚義：“視覚と画像”，森北出版株式会社 (1994)。
- 3) 松井 利一：“自律的画像観測機構を実現する視覚系の数理的モデル化の研究”，学位論文，(1997)，pp18-19。
- 4) F. W. Campbell and J. G. Robson：“Application of Fourier Analysis to the Visibility of Gratings”，J. Physiol., 197, pp. 551-556 (1968)。



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工学科教授 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)