

## 色再現を考慮した擬似フルカラー表現方式†

山田 敬嗣<sup>††</sup> 美濃 導彦<sup>††</sup> 坂井 利之<sup>††</sup>

三原色の固定径のドットを出力できるドットプリンタによって、擬似的にフルカラーを表現できることが望ましい。このためには、入出力装置の特性を考慮しつつ、赤緑青の3枚の入力多値画像に対して二値化処理を行う。擬似フルカラー表現方式についての考察から、カラードットの配置を制御することが重要であることがわかった。そこで、ドット単体のモデルおよび複数ドットによる混色のモデルを定め、 $2 \times 2$ 画素のメッシュが表現する色は666種類と限定できた。それらの色を実際のパターンから測定すれば、複雑な混色計算を要することなく、メッシュが表現する色を求めうる。提案した擬似フルカラー表現法では、画像を $2 \times 2$ 画素のメッシュに区切り、各メッシュ内の画素を順に二値化する。まず、メッシュ内のC, M, Yの各画素数を計算し、その数の画素をメッシュ内に分配し、ドットパターンを生成する。その際、カラー画素の分散と集中を制御し解像度および滑らかさの両方を高める。また、生成されたカラーのドットパターンから実際に表現される色をテーブル参照により求め、それと表現すべき色との差を補正することによって、原画像の色に近い色再現を実現する。この擬似カラー表現方式をメッシュ内カラー画素分配法と呼ぶ。実験の結果、この方式により出力された擬似フルカラー画像は高品質であることが確認できた。

## 1. ま え が き

カラー写真などのフルカラー画像をコンピュータから出力する必要性の増大につれて、インクジェット方式やドットインパクト方式、熱溶融転写方式などのカラードットプリンタが商品化されつつある。

大きさと色が固定のドットを出力することは比較的安定におこなえる。しかし、ドット径を変化させたり、ドットの色(明度や色度)を変化させることは、カラードットプリンタにおいては困難である。このため、固定径の三原色のドットを出力できるドットプリンタによって擬似的にフルカラーを表現し、高品質なカラー写真を出力する技術が重要となる。

従来、多くの擬似フルカラー表現方式が報告されている。これらの多くは網点印刷の技術を応用して、数個のカラー画素を集中させて擬似的に網点を発生するものである<sup>1),2)</sup>。このような方式では、出力装置の解像度を擬似的に低下させる。解像度を向上させるために、網点を発生させない場合には、従来の混色モデルに適合しない。

解像度を低下させることなく、しかも色再現を達成する方式が必要である。そこで、予備実験の結果に基づき、擬似フルカラー表現が満たすべき仕様条件を求めた。それを実現するためには、カラードットの配置(配列や重なり)を制御すべきであるという見地から、

カラードット単体のモデルと複数ドットによる混色モデルを定めた。さらに、それに基づき高品質擬似フルカラー表現の条件を満たす処理の要点について考察した。これらを利用して簡易に色再現性が可能であり、しかも高画質が得られる擬似フルカラー表現方式を提案する。

## 2. 擬似フルカラー表現

## 2.1 擬似フルカラー表現の概念

擬似フルカラー表現とは、固定径の三原色または数色の出力ドット(以後ドットと呼ぶ)の粗密配置により、単位面積中のカラードットの総面積を変化させ、擬似的にフルカラーを表現する方法である。

一般には、プリンタはシアン(C)、マゼンタ(M)、イエロー(Y)の減法混色の三原色を出力できる。そこで、C, M, Yの各色別の2値のドットパターンを逐次重ね合わせて出力すると、カラードットの配置に応じて混色が起こり、多様な色を表現できる。このようにして、表現される色の色域は理想的な色域に比べて狭いものの、JISの標準色票を測色した色域よりも広く、印刷系としては十分な色域をもつ(図1参照)。以後この種のドットプリンタを、出力装置として扱い、三原色ドットの大きさを変更できず、それぞれは $d^C, d^M, d^Y$ なる固定径をもつものとする。

擬似フルカラー表現の処理は3つの段階からなり、その概念図を図2に示す。

第1段階として、原フルカラー画像をサンプリングして、3枚の多値画像 $I_R, I_G, I_B$ を得る(図2-[1])。これらの多値画像は、それぞれ多値データ( $g^R, g^G, g^B$ )

† A New Bilevel Representation Method of Color Pictures for Color Reproduction by KEIJI YAMADA, MICHIIHIKO MINOH and TOSHIYUKI SAKAI (Department of Information Science, Faculty of Engineering, Kyoto University).

†† 京都大学工学部情報工学科

をもつ。ここで、添字 R, G, B は赤, 緑, 青を指す。

第2段階では, R, G, B の3枚の多値画像が二値化され, 二値データ ( $b^C b^M b^Y$ ) をもつ C, M, Y の3枚の二値画像  $I_C, I_M, I_Y$  となる (図2-[2])。

最終段階では,  $I_C, I_M, I_Y$  を点順次または画順次で, 重ねて紙面に出力する。これにより擬似フルカラー画像が得られる (図2-[3])。

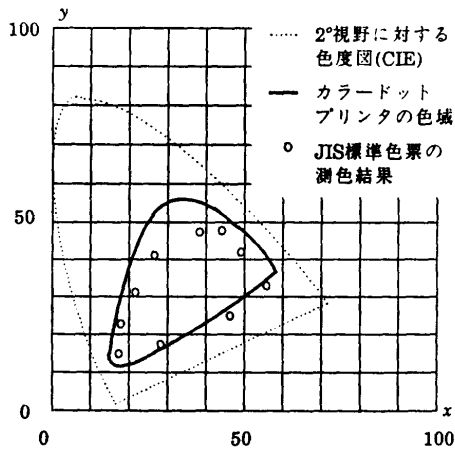


図1 擬似フルカラー画像の色域  
ただしカラードットプリンタ: SANYO CJ5700,  
測色計: 東京電色 TC-8FX  
Fig. 1 Gamut of pseudo color pictures.  
color dot printer; SANYO CJ5700,  
color meter; Tokyo Denshoku TC-8FX

2.2 擬似フルカラー表現の問題点

擬似フルカラー表現の技術は, 基本的に二値化処理の一種であり, 白黒の多値画像から白黒の二値画像への二値化処理 (擬似濃淡表現法) の拡張である。

理想的には, R, G, B の三原色は, 異なる三原色 C, M, Y の補色である。よって C, M, Y の二値画像はそれぞれ R, G, B の多値画像を別々に二値化することにより得られる。しかし, 実際には入出力装置の特性  $\Psi_i, \Psi_o$  のため, R, G, B の入力多値データは, 出力された C, M, Y ドットの正確な補色ではない。また, 出力されたドットは配置 (重なりと配列) に従って, 混色のため異なる色を表す。例えば, 図3の2つのパターンは異なる色を表すことがある。原画像の色を再現するためには, これらの入出力特性を二値化の際に補正する必要がある。

そこで, 擬似濃淡表現方式のうち組織ディザ法などを応用した擬似フルカラー表現方式が多数報告されている<sup>1),2)</sup>。これらの多くは, 擬似的な網点を発生させるので, Neugebauer 式<sup>4)</sup>を用い, 網点面積率をもとに混色をシミュレートできる。これに基づき入力された各画素ごとの値を線形変換により修正する<sup>3)</sup>。これらは, 確率的に各ドットの重なり面積率を推定するもので, 色の変化が小さい領域では良好な結果が得られる。これらは, 各画素ごとに, 混色モデルに基づきその値を修正した後に, 独立に二値化する。そのため, 生成された二値画素のパターンが考慮されず, 図3に示すような同画素数で異なるパターンにより再現される色の違いを表現することは困難である。また, 同じ理由でエッジ部でもカラー画素の配置を制御できず, エッジ部がぼけて解像度を低下させる。また, 組織ディザ法に特有な擬似境界やモアレが発生するため, 滑らかさが損なわ

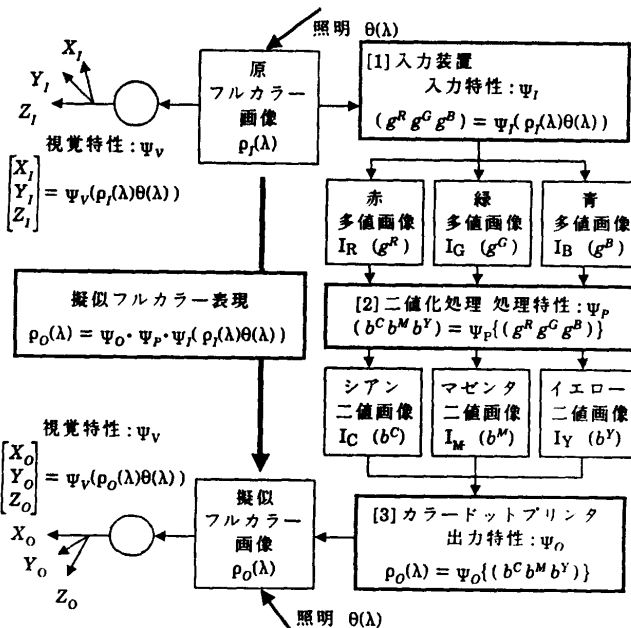


図2 擬似フルカラー表現の処理の流れ  
Fig. 2 Processing diagram for bi-level representation of color pictures.

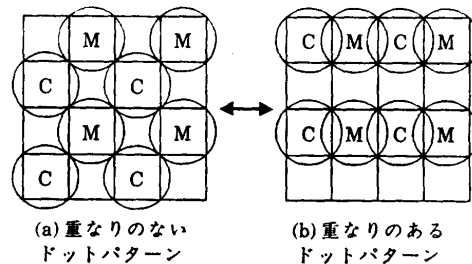


図3 重なりのないドットパターンと重なりのあるドットパターン  
(C: シアンドット, M: マゼンタドット)  
Fig. 3 Dot pattern without overlap and dot pattern with overlap.  
(C: cyan dot, M: magenta dot)

れるなど不満足なものもある。

### 3. 高品質擬似フルカラー表現

#### 3.1 高品質擬似フルカラー表現の条件

高品質な画像表示のためには、濃淡階調に関与する画質およびパターン生成に関与する画質の両方も高くなければならない。擬似フルカラー表現においては、濃淡階調に関与する画質とは色再現性の程度であり、パターン生成に関与する画質とは出力画像の解像度と滑らかさの程度を示す。

高品質な画像を得るために擬似フルカラー表現方式が満たすべき条件について以下の6項目を得た。

##### ◎色再現に関与する条件

①色再現性 擬似フルカラー画像が、原フルカラー画像と一定条件下で、ほぼ等色であること。

②色調節の簡易さ 出力装置として、いかなる特性のカラードットプリンタを用いても色再現を可能とすることが、擬似フルカラー表現方式に与えるパラメータの簡単な調節だけでできること。

##### ◎パターン生成（ドット配置）に関与する条件

③色度の滑らかさ 入力画像の色度が滑らかに変化する領域では、擬似フルカラー画像でも、色むらや擬似輪郭などの発生がなく、滑らかさを保つこと。

④明度の滑らかさ ③と同様に入力画像の明度が滑らかに変化する領域では、擬似フルカラー画像でも粒状雑音や擬似輪郭やちらつきを発生しないこと。

⑤色度の鮮鋭さ 色度が急変する領域では、変化部がぼけず、色度変化を鮮鋭に表現できること。

⑥明度の高解像度 明度が急激に変化する領域では、そのエッジを鮮鋭に表現すること。さらに画像中の文字や細線なども高品質に表示できること。

#### 3.2 擬似フルカラー表現のモデル

前述の色再現に関する条件を実現するためには、ドットの大きさ程度の広さの小領域内での混色の現象を表現することが重要である。そこで、次のようなカラードット単体のモデルと複数ドットによる混色モデルを定義する。

##### (1) カラードット単体のモデル

単体ドットの形は円筒形とする（図4参照）。ドットのインクを理想的なフィルタとして捉え、それ自体の反射率を0とし、分光透過率  $\tau(\lambda)$  は、ドットの色ごとに異なる。基材の分光反射率を  $\rho_{sub}(\lambda)$  とし、入射光の分光分布を  $\theta(\lambda)$  とすると、基材で反射した光の分光分布（基材の色）  $\phi_{sub}(\lambda)$  は、

$$\phi_{sub}(\lambda) = \rho_{sub}(\lambda)\theta(\lambda) \quad (1)$$

で求められる。第  $i$  番目のドットの部分で反射した光の分光分布（ドットの色）  $\phi_i(\lambda)$  は、

$$\begin{aligned} \phi_i(\lambda) &= \tau_i(\lambda)\rho_{sub}(\lambda)\tau_i(\lambda)\theta(\lambda) \\ &= \tau_i(\lambda)\phi_{sub}(\lambda). \end{aligned} \quad (2)$$

以後、 $\tau(\lambda)$  を透過係数と呼び、混色計算に用いる。

##### (2) 複数ドットによる混色モデル

実際にドットが出力される場合、それらは一部分が重なりをもって、加法混色だけでなく減法混色をも起こしている。例えば図5では、 $A_4$  (Dot 1 と Dot 2)、 $A_5$  (Dot 1 と Dot 3)、 $A_6$  (Dot 1 と Dot 2 と Dot 3)、 $A_7$  (Dot 3 と Dot 4) の部分は出力したドットが重なった部分で、これらは減法混色に従う。また、図5の太枠内の色は、この領域を重ならないように分割した部分  $A_0 \sim A_7$  の色の平均によって求められ、加法混色に従うものとする。

減法混色による分光反射率は、重なったインクの透過係数および基材色の分光反射率分布との積として求め、加法混色の値は小領域の色の平均により求める。

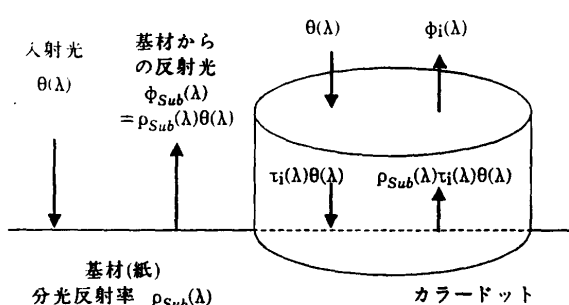


図4 カラードット単体のモデル  
Fig. 4 Model of a color dot.

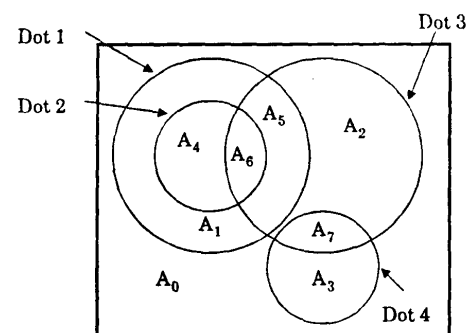


図5 出力された複数ドットの状況  
Fig. 5 Configuration of printed dots.

## ○減法混色モデル

小領域  $A$  では、 $n_A$  個のドットが重なっており、その第  $i$  番目 ( $1 \leq i \leq n_A$ ) のドットの透過係数を  $t_i(\lambda)$  とする。  $A$  での分光反射率  $\rho_A(\lambda)$  は、

$$\rho_A(\lambda) = \rho_{sub}(\lambda) \prod_{i=1}^{n_A} t_i(\lambda) \quad (3)$$

となる。そこで小領域  $A$  での知覚色 ( $X_A Y_A Z_A$ ) は、 $\rho_A(\lambda)$  と照明  $\theta(\lambda)$ 、視覚特性  $\Psi_v$  を用いて求められる。

## ○加法混色モデル (平均混色モデル)

領域  $S$  が、 $m_s$  個の排他的な小領域  $A_j$  ( $1 \leq j \leq m_s$ ) からなるとする。各小領域の面積を  $a_j$  とし、その知覚色を ( $X_j Y_j Z_j$ ) とする。領域  $S$  の知覚色 ( $X_s Y_s Z_s$ ) は、平均混色に基づき小領域の知覚色の荷重平均で計算できる。

$$(X_s Y_s Z_s) = \frac{\sum_{j=1}^{m_s} a_j (X_j Y_j Z_j)}{\sum_{j=1}^{m_s} a_j} \quad (4)$$

知覚色を ( $R G B$ ) で表した場合でも、( $X Y Z$ ) から線形に変換できるので、同様な重み付き平均により計算できる。

## 3.3 色再現性を実現する処理

3つのカラードットの半径が隣合うドットの間隔 (図6中の  $d_0$ ) よりも小さいと仮定すると、2つのドットが重なるのは、高々8隣接するドットのみであり、2ドット分 (図6中の  $2d_0$ ) 離れたドットが重なることはない。3種類のカラードットの重ね配置は8 ( $=2^3$ ) 通りである。2×2ドットの4つのドットの中心を結んだ正方領域 (図6中の一点鎖線枠) 内のドットパターンは4096 ( $=8^4$ ) である。それらのうち、回転または線対称なパターンは同一の色を表現する。よって、異なる色を表現するパターンの数は、8種類のものから重複を許して4つを選び並べる数珠順列によ

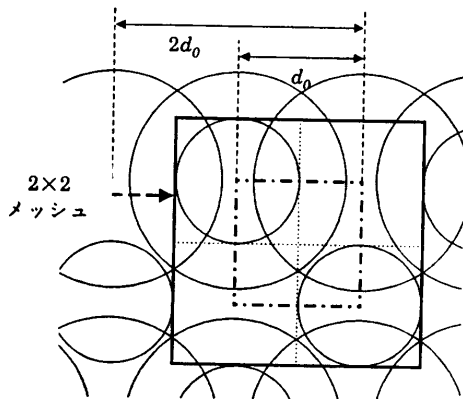


図6 2×2メッシュ内のカラードットの配置とその表現色  
Fig. 6 Color represented in a 2×2 dot mesh.

りもとめられ、666種類である。

画像を2×2ドットのメッシュ (以後2×2メッシュと呼ぶ) に分割した場合、色変化が緩やかな領域では、隣接する2×2メッシュ内のドットの配置状況 (ドットパターン) は、ほぼ同じであると考えられる。そこで、2×2メッシュ (図6中の太線枠) 内で表される色は、一点鎖線枠内で表現される色と等しいとしても問題はない。したがって、ここでは2×2メッシュ内の色は、その中に配置されるカラードットのパターンにより、決定可能であると仮定する。

666通りのドットパターンの色は次の2つの方法で求められる。

## ◎方法1

666通りのドットパターンをすべてプリンタより出力し、そのパターンの色を測定することにより、2×2ドットパターンを出力した時の実際の色が得られる。この時に、画像入力に用いる装置と同じ入力特性をもつ装置で測定する。これにより、入出力装置の特性 ( $\Psi_i \Psi_o$ ) を加味した666通りのパターンの色 ( $q_i^R q_i^G q_i^B$ ) ( $1 \leq i \leq 666$ ) が得られる。

## ◎方法2

入力特性  $\Psi_i$  と出力特性  $\Psi_o$  を個別にもとめる。

入力特性は線形変換として表せると仮定し、JISの色票から選んだ40種の色を測色計と画像入力用の入力装置で測定する。結果の ( $X_i Y_i Z_i$ ) と ( $q_i^R q_i^G q_i^B$ ) ( $1 \leq i \leq 40$ ) との対応から、最小自乗法を用いて変換行列を求める。これを入力特性  $\Psi_i$  とする。阿部設計製ドラムスキャナについて求めたものは以下のような。

$$\begin{bmatrix} q_i^R \\ q_i^G \\ q_i^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10.4014 & -6.4356 & -0.7350 & 50.6224 \\ -5.6557 & 7.4991 & 0.4972 & 82.0587 \\ 1.1742 & -2.1477 & 3.4679 & 64.6610 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix}$$

出力特性  $\Psi_o$  は、666個の2×2画素のパターンの1つ  $P_i$  からその三刺激値 ( $X_i Y_i Z_i$ ) への対応として表す。

第  $l$  パターンの三刺激値は次の手順で求める。

出力された第  $l$  パターンの2×2ドットの領域 (図6中の一点鎖線内部) を50×50の微小領域に区切る。微小領域に重なるドットを、ドットのパターンとその半径から求める。それから減法混色モデルに基づき微小領域の三刺激値を計算する。ただし、透過率の分光

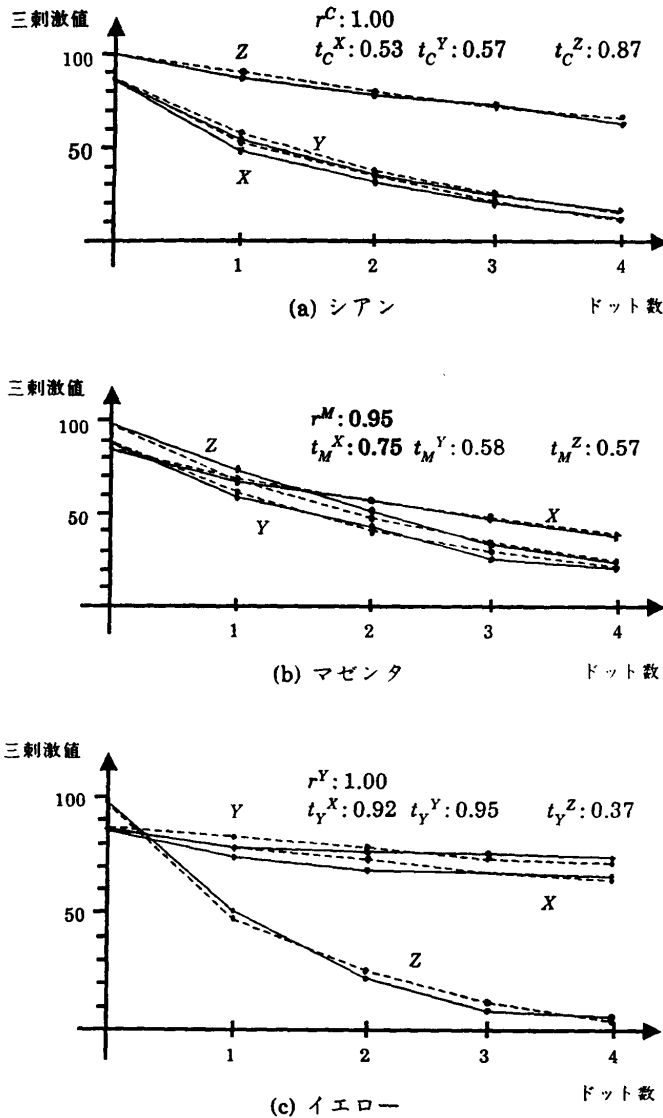


図7 カラードットの半径と透過率の推定  
(グラフ中の実線は実測値, 点線は最終推定値)

Fig. 7 Estimation of the radii and the transmittance of color dots.

特性  $t_i(\lambda)$  を仮想的に X, Y, Z に関する3つの帯域に区切り, 各帯域では一定である  $(t_i^X, t_i^Y, t_i^Z)$  として計算を簡易化した。

全微小領域の三刺激値から式(4)により, 第  $l$  パターンの三刺激値を求める。

この計算に用いる C, M, Y ドットの半径および透過率は, 各色ドットを  $2 \times 2$  ドットの領域内に  $0 \sim 4$  個の割合で出力したパターンを, 測色した結果から求める。15通りの三刺激値(図7中実線)と, 仮定された半径と透過率から前述の方法で計算された三刺激値

(図7中破線)の誤差が極小になるように, 半径と透過率を繰り返し修正して最適なものを求める(図7参照)。

これにより得られた第  $l$  パターンの三刺激値に入力特性を表す行列  $\Psi_l$  を掛ければ, 第  $l$  パターンを出力し, さらに入力装置でサンプリングしたデータ  $(\bar{q}_i^R, \bar{q}_i^G, \bar{q}_i^B)$  ( $1 \leq i \leq 666$ ) を推定できる。

以上2つの方法により得られた666種のドットパターンの色  $(\bar{q}^R, \bar{q}^G, \bar{q}^B)$  を図8のようにルックアップテーブルに記録すれば, 複雑な混色計算なしに, ルックアップ操作のみで  $2 \times 2$  メッシュの表現する色が求められる。

隣接するいくつかの  $2 \times 2$  メッシュを含む領域が表現する色は, メッシュどうしは重ならないので加法混色のみに基づいて求められる。人間の視覚特性から, 視距離 30 cm, 出力解像度 8 dot/mm では, 10個程度の  $2 \times 2$  メッシュからなる広さの領域として色が表現される。 $k$  個の  $2 \times 2$  メッシュからなる領域が表現する色  $(R, G, B)$  は, (4)式で小領域の面積が一定の場合を  $R, G, B$  表現に拡張したものであり, ルックアップテーブルから得たそれぞれのメッシュの色  $(\bar{q}_i^R, \bar{q}_i^G, \bar{q}_i^B)$  ( $1 \leq i \leq k$ ) の平均によって求められる。

$$(R, G, B) = \frac{1}{k} \left( \sum_{i=1}^k \bar{q}_i^R, \sum_{i=1}^k \bar{q}_i^G, \sum_{i=1}^k \bar{q}_i^B \right) \quad (5)$$

これによって, より多くの色を表現できる。また, 平均で色を表現できることから, 誤差拡散法<sup>5)</sup>の導入により色再現が可能になる。すなわち, 処理済みのメッシュでの表現色の誤差を, 未処理である周辺のメッシュにおいて補正し, 全体として表現色と原画像の色との誤差を最小にする。

### 3.4 滑らかさ・高解像度を実現する処理

#### (1) 色度の滑らかさの実現(図9参照)

色度の滑らかさは, ドットが領域内で色ごとに偏在することにより損なわれ, 色むらが発生する。そこで, 色度が滑らかに変化している領域では, 同一色のドットができるだけ隣接しないように配置する。

#### (2) 明度変化の滑らかさの実現(図10参照)

明度の低いドットが局所的に集中することを避ける。そこで, ドットの色々の明度の低い順, つまりシア

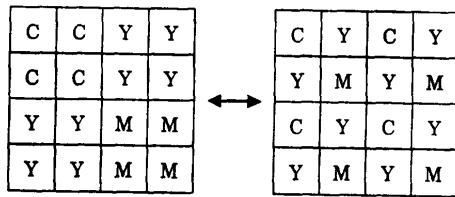
パターン 番号	2×2メッシュの ドットパターン	ドットパターンの色																		
		$g_i^R$	$g_i^G$	$g_i^B$																
1	<table border="1"><tr><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td></tr></table>					0.000	0.004	0.000												
2	<table border="1"><tr><td>C</td><td></td><td></td><td>C</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td>C</td></tr></table>	C			C				C	0.333	0.227	0.082								
C			C																	
			C																	
3	<table border="1"><tr><td>C</td><td>M</td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td>M</td><td>C</td></tr><tr><td>C</td><td></td><td>M</td><td>C</td></tr><tr><td>M</td><td></td><td></td><td>C</td></tr></table>	C	M					M	C	C		M	C	M			C	0.349	0.427	0.310
C	M																			
		M	C																	
C		M	C																	
M			C																	
666	<table border="1"><tr><td>C</td><td>M</td><td>C</td><td>M</td></tr><tr><td>C</td><td>M</td><td>C</td><td>M</td></tr></table>	C	M	C	M	C	M	C	M	0.945	0.933	0.933								
C	M	C	M																	
C	M	C	M																	

図 8 666 通りのドットパターンの色のルックアップテーブルの例  
(ただし, CMY はシアン, マゼンタ, イエロドットを表す)  
Fig. 8 An example of a look-up table of reproduced colors.

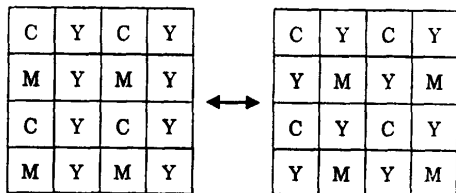
ン, マゼンタ, イエローの順にできる限り隣接せず重ならないように配置する。これにより, 明度に影響するドットが分散するので, ちらつきが減少し, 明度変化において滑らかさが実現される。

(3) 色度の鮮鋭さの実現 (図 11 参照)

色度が急激に変化している領域では, 色変化に対し主に影響するカラードットをエッジの両側に並べる。これにより色変化を鮮鋭にできる。



(a) 色むら発生 (b) 滑らかな色表現  
図 9 滑らかな色表現のためのドットの配置  
(C, M, and Y: シアン, マゼンタ, イエロドット)  
Fig. 9 Arrangement of dots for smooth representation of color.  
(C, M, and Y: cyan, magenta, yellow dot)



(a) 縞紋様発生 (b) 明度の滑らかな表現  
図 10 明度の滑らかな表現のためのドットの配置  
Fig. 10 Arrangement of dots for smooth representation of brightness.

(4) 明度変化の高解像性の実現 (図 12 参照)

明度が急激に変化している部分では, 各カラードットをエッジ部に重ねて配置し, 色表現よりも明度変化を主に表現することにより, 高解像性を実現する。

4. メッシュ内カラー画素分配法

3章で考察した高品質な擬似フルカラー表現方式の考察に基づいて考察した処理について述べる。

ここで, 入力画像データは R (赤), G (緑), B (青) の画像データ ( $q^R_{pq}, q^G_{pq}, q^B_{pq}$ ) からなる。こ

こで  $p, q$  は画素の画像上での位置。また, カラードットプリンタは C (シアン), M (マゼンタ), Y (イエロー) の3色のドットを重ねて出力できるものとする。ただし, 本方式では R, G, B の多値画像および C, M, Y の二値画像を,  $2 \times 2$  画素のメッシュに区切り, メッシュを走査しながら, メッシュごとに二値化を行い, 二値画像上の画素の値 ( $b^C_{pq}, b^M_{pq}, b^Y_{pq}$ ) を決定する。ただし, ここでは一つのドットに対応する多値画像または二値画像内のデータを画素と呼ぶ。また, ドットとは実世界に出力された画素をいう。

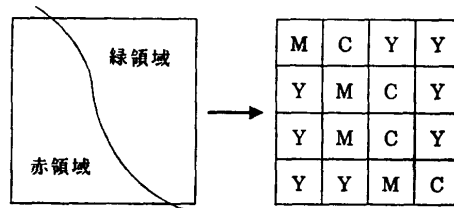


図 11 色度の鮮鋭な表現のためのドットの配置  
Fig. 11 Arrangement of dots for sharp representation of chromaticity.

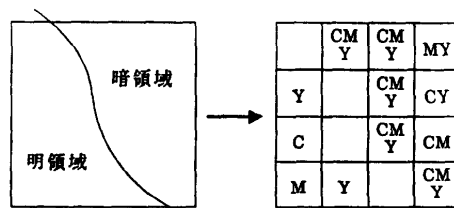


図 12 高解像度な明度の表現のためのドットの配置  
Fig. 12 Arrangement of dots for fine representation of brightness.

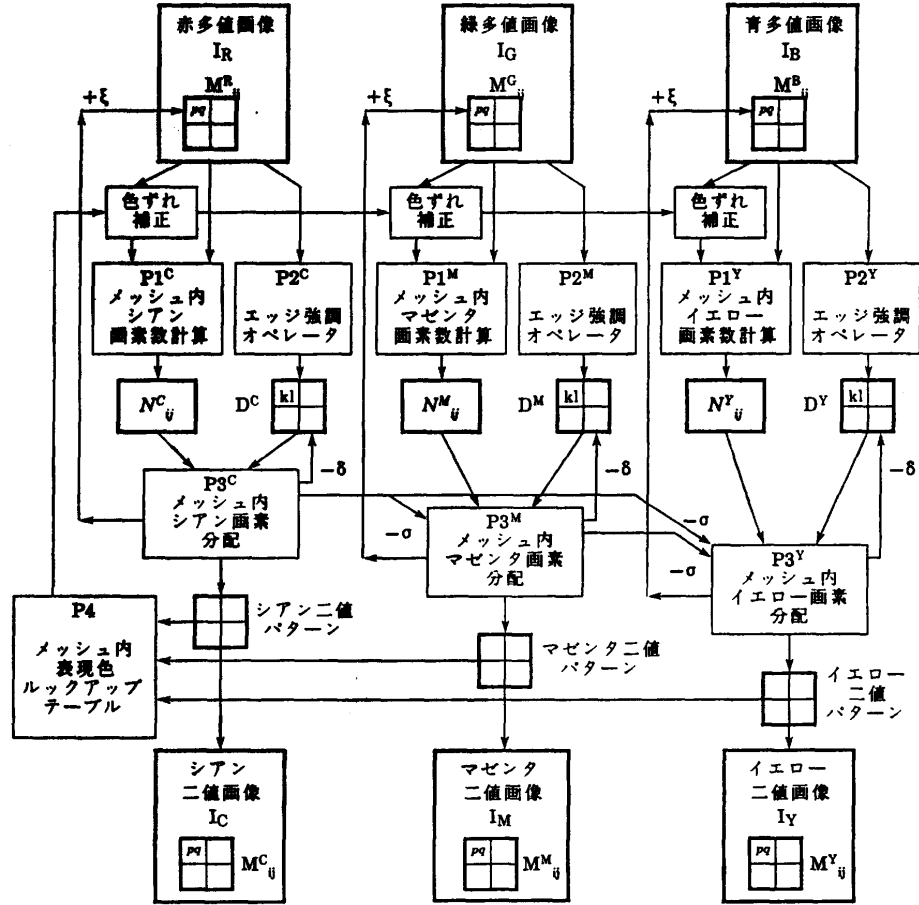


図 13 メッシュ内カラー画素分配法の処理の流れ図  
Fig. 13 Flow diagram of a new bilevel representation method of color pictures.

処理手順は以降に述べる 4つのステップからなる。

◎ステップ 1 (図 13-P1<sup>C</sup>, P1<sup>M</sup>, P1<sup>Y</sup>)

R, G, B の多値画像中の第 (i, j) 番目のメッシュ M<sup>R</sup><sub>ij</sub>, M<sup>G</sup><sub>ij</sub>, M<sup>B</sup><sub>ij</sub> から各色の補色である C, M, Y のメッシュ内に分配する画素数 (N<sup>C</sup><sub>ij</sub>, N<sup>M</sup><sub>ij</sub>, N<sup>Y</sup><sub>ij</sub>) を求める。この際に、周辺の処理済みのメッシュの色ずれを補正する。ここで色ずれとは、多値画像のデータの R, G, B と擬似フルカラー表現されたドットパターンが表す色 (R, G, B) との差をいう。N<sup>C</sup><sub>ij</sub> を求める手順を例にして処理の説明をする。

○サブステップ 1-1

M<sup>R</sup><sub>ij</sub> 内の 4つの画素の濃淡値  $q^{R_{pq}}$  の累計をもとめ、 $f^{R_{ij}}$  とする。

$$f^{R_{ij}} = q^{R_{pq}} + q^{R_{p+1q}} + q^{R_{pq+1}} + q^{R_{p+1q+1}} \quad (6)$$

○サブステップ 1-2

周辺メッシュでの誤差を  $\varepsilon^{R_{i-i', j-j'}}$  とし、 $(w_{i'j'})$  を重みマトリクスとする。ただし、(i, j) は画像上で

の処理対象のメッシュの位置を表し、(i', j') はそのメッシュとの相対位置を表す。そのとき、周辺メッシュでの誤差を補正するための修正濃度値  $f^{R_{ij}'}$  は

$$f^{R_{ij}'} = f^{R_{ij}} + \sum_{j'=0}^2 \sum_{i'=-2}^2 \varepsilon^{R_{i-i', j-j'}} w_{i'j'} \quad (7)$$

となる。 $f^{R_{ij}}$  でなく  $f^{R_{ij}'}$  から画素数を計算することにより、色再現性を達成し得ることは容易に証明できる。

○サブステップ 1-3

しきい値  $T^{R_0} \sim T^{R_5}$  を用いてメッシュ M<sup>C</sup><sub>ij</sub> の内に分配するシアンの画素数 N<sup>C</sup><sub>ij</sub> を求める。つまり、

$$T^{R_n} \leq f^{R_{ij}'} < T^{R_{n+1}} \quad (8)$$

ならば、

$$N^{C_{ij}} = n \quad (9)$$

とする。 $T^{R_0} \sim T^{R_5}$  を、カラードットののにじみによる出力特性のひずみに合わせて設定することにより、色再現性を向上させられる。この出力特性の補正は、擬

似濃淡表現におけるガンマ特性補正法<sup>6)</sup>を、カラードットに拡張したものである。

以上の3つのサブステップをGとBに対しても同様におこない、 $N^M_{ij}$ と $N^Y_{ij}$ を求める。

このステップは3.3節の色再現のための処理の考察に基づいており、条件①の色再現性を実現する。

◎ステップ2 (図13-P2<sup>C</sup>, P2<sup>M</sup>, P2<sup>Y</sup>)

カラー画素を分配し配置するための分配用メッシュデータ  $D^C$ ,  $D^M$ ,  $D^Y$  を計算する。分配用メッシュデータは、それぞれ  $2 \times 2$  マトリクス状のデータで、それらの要素を  $D^{C_{kl}}$ ,  $D^{M_{kl}}$ ,  $D^{Y_{kl}}$  とする ( $k, l=1$  or  $2$ )。各要素の値の高いものほどカラー画素がその要素に配置される確率が高くなる。要素の値は、エッジ強調オペレータを用いて図13-I<sub>R</sub>, I<sub>G</sub>, I<sub>B</sub>の多値画像の処理対象メッシュ内およびその周辺の濃淡値から計算する。これにより解像度を向上させると同時に、ステップ3とともにメッシュの境界部での滑らかさを実現する<sup>6)</sup>。

◎ステップ3 (図13-P3<sup>C</sup>, P3<sup>M</sup>, P3<sup>Y</sup>)

○サブステップ 3-1

シアン、マゼンタ、イエローの順番に、ステップ1の画素数 ( $N^C_{ij}$ ,  $N^M_{ij}$ ,  $N^Y_{ij}$ ) とステップ2の分配用メッシュデータ ( $D^C$ ,  $D^M$ ,  $D^Y$ ) に基づき、要素の値の大きい順にカラー画素をメッシュ内に分配する。このステップは高解像度のための処理の考察 (3.4節中の(3), (4)) を実現するもので、擬似フルカラー画像の解像度、鮮鋭さを向上させる。

○サブステップ 3-2

配置された画素と4隣接する画素に対応する、同一色の分配用メッシュの要素の値から一定値  $\delta$  を引く。シアン画素が ( $k, l$ ) 要素に配置されたとすると、

$$D^{C_{k'l'}} = D^{C_{kl}} - \delta. \quad (10)$$

ただし、( $k', l'$ ) 要素は ( $k, l$ ) 要素に4隣接する要素とする。これにより、同一色の画素が隣接して配置される確率を減少させる<sup>6)</sup>。

○サブステップ 3-3

配置された画素と異なる色の分配用メッシュデータの同じ位置の要素値から一定値  $\sigma$  を引き、異なる色の画素を同一位置に重ねて配置する確率を減らす。シアン画素が ( $k, l$ ) 要素に配置されたとすると、

$$D^{M_{kl}} = D^{M_{kl}} - \sigma$$



図14 擬似フルカラー表現の例

Fig. 14 An example of a reproduced picture.

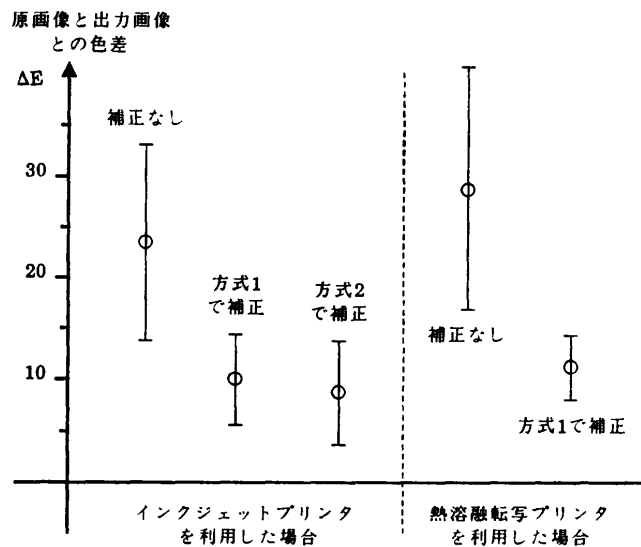


図15 色再現性評価 (C.I.E.  $L^*a^*b^*$  での  $\Delta E$  の測定結果)  
Fig. 15 Evaluation of color reproducibility ( $\Delta E$  of C.I.E.  $L^*a^*b^*$ ).



$$D^Y_{ki} = D^Y_{ki} - \sigma \quad (11)$$

として  $D^M$  および  $D^Y$  を修正する.

○サブステップ 3-4

配置された画素の元の多値画像における位置の濃度値に一定値  $\xi$  を加える. これにより, 4隣接するメッシュでのステップ2の処理とともに, ここでの画素の配置の状況を隣接メッシュへと伝えることができる. その結果, 滑らかに色が変化する領域で隣接メッシュとの境界部に画素が並ぶことを避け, 滑らかさを実現できる<sup>7)</sup>.

以上の 3-2, 3-3, 3-4 の3つのサブステップで滑らかさの表現のための処理 (3.4 節中の(1), (2)) を可能にしている.

◎ステップ4 (図13-P4)

ステップ3で得られた3色の二値パターン ( $M^C_{ij}, M^M_{ij}, M^Y_{ij}$ ) から出力後に表現される色 ( $\bar{g}^R_{ij}, \bar{g}^G_{ij}, \bar{g}^B_{ij}$ ) を, ルックアップテーブルの第  $l$  番目の要素として求める (3.3節参照). 元のメッシュ内の4画素の濃度値の修正累計値 ( $f^R_{ij}, f^G_{ij}, f^B_{ij}$ ) との差を色ずれ ( $\varepsilon^R_{ij}, \varepsilon^G_{ij}, \varepsilon^B_{ij}$ ) とする. つまり,

$$\begin{aligned} &(\varepsilon^R_{ij}, \varepsilon^G_{ij}, \varepsilon^B_{ij}) \\ &= (f^R_{ij} - \bar{g}^R_{ij}, f^G_{ij} - \bar{g}^G_{ij}, \\ & \quad f^B_{ij} - \bar{g}^B_{ij}). \quad (12) \end{aligned}$$

周辺の未処理メッシュにおけるステップ1のメッシュ内カラー画素数計算の際に, その色ずれを補正する.

以上4つのステップをメッシュ走査順に繰り返し行うことにより, 高品質擬似フルカラー表現のための二値化処理を行う. この擬似フルカラー表現方式を, メッシュ内カラー画素分配法と呼ぶ. 本方式による擬似フルカラー画像の例を図14に示す.

5. 実験と評価

メッシュ内カラー画素分配法が, 色再現に関する条件とパターン生成に関する条件を満足するかを調べるために, 以下の評価実験をおこなった.

◎色再現に関する条件による評価

3.3 節で述べたルックアップテーブル

を作成する2つの方法についての色再現性を調べた.

方法1では, 入力装置として阿部設計製ドラムスキャナ (ID1) を用い, 出力装置としては三洋電機製インクジェットプリンタ (OD1) と松下電子部品製熱溶融転写プリンタ (OD2) を用いた.

方法2では, 入力装置として上と同じID1を用い, 出力装置としてはOD1を用いた.

再現性は, 40種類の色票を入力画像として, その出力画像との色差によって評価する. ここで色差は C. I. E. 1976 L\*a\*b\* 系の色差  $\Delta E$  により評価した. 結果の色差を図15に示す. これらの結果から, 本方式は色再現性を満足しているといえる.

再現色のルックアップテーブルは, 実際の出力デー



(a) 組織デザ法による擬似フルカラー画像 (b) メッシュ内カラー画素分配法による擬似フルカラー画像

図16 画質評価に用いた擬似フルカラー画像の例  
Fig. 16 Examples of pseudo full color images for quality evaluation.

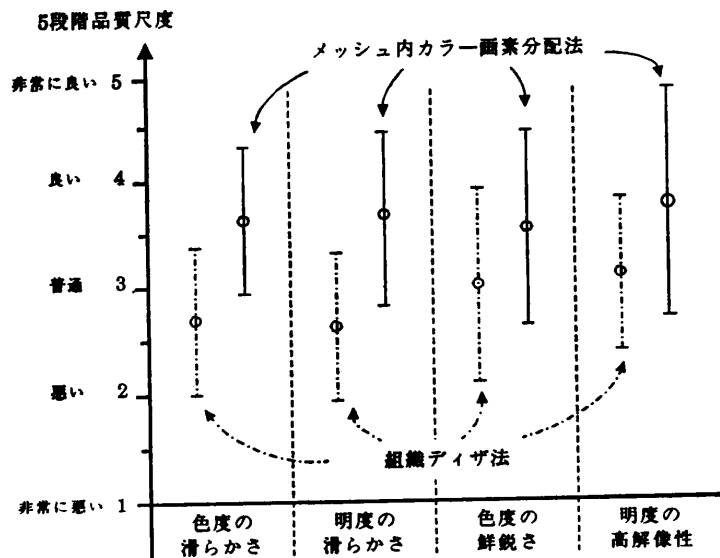


図17 パターン生成に関する画質評価結果  
Fig. 17 Image quality evaluation of generated patterns.

タと入力データから決定でき、繰り返し調節する必要がなく、装置に合わせて簡単に色再現ができる。

#### ◎パターン生成に関する評価

画像電子学会カラーテストチャート No. 11 の中から選んだ8か所を 10 dot/mm でサンプリングして、多値画像を得る。それから、メッシュ内カラー画素分配法と網点型マトリクスを用いた組織ディザ法により、合計 16 枚の擬似フルカラー画像を生成した。それらに対して、色度と明度の滑らかさおよび鮮鋭度について主観評価をした。評価者は、成人男子 20 名であり、評価尺度として5段階品質尺度<sup>9)</sup>を用いた。評価画像の例を図 16 に示し、評価結果を図 17 に示す。

これより、メッシュ内カラー画素分配法は、パターン生成に関する条件をも満足し、高品質な擬似フルカラー画像を生成できることがわかった。

## 6. ま と め

固定径のカラードットプリンタを用いて高品質に擬似フルカラーを表現する方式を提案した。

擬似フルカラー表現についての考察から、カラードットの配置を制御することが重要であることがわかった。そこで、ドットのモデルおよびその混色のモデルを定め、2×2メッシュで表現できる色は666種類であることを得た。それらの色を実際のパターンから測定し、ルックアップテーブルに登録する。それにより、複雑な混色計算を省き、しかもドットの配列と重なりによる混色を考慮したメッシュの表現する色を簡単に求めることができる。

提案した擬似フルカラー表現では、メッシュ内の C, M, Y の各画素数を計算し、その数の画素をメッシュ内に分配し、ドットパターンを生成する。その際、先に配置されたカラー画素の位置情報をフィードバックして、画素の分散と集中を制御し解像度および滑らかさの両方を高める。また、生成されたドットパターンから実際に表現される色をテーブル参照により求め、それと表現すべき色との差を未処理の周辺メッシュにおいて補正することによって色再現を実現する。

この擬似カラー表現方式をメッシュ内カラー画素分配法と名付けているが、この方式により出力された擬似フルカラー画像では、実験の出力結果は、すべて高品質であった。

本論文では、C, M, Y のみを出力するドットプリンタを対象に述べたが、それ以外の数色のドットも出力できるプリンタを用いる場合についても、本方式は容

易に拡張が可能である。

## 参 考 文 献

- 1) 佐藤, 今尾: 任意な角度のスクリーン形成と予測的な色補正による色再生法, リコーテクニカルレポート, No. 13, pp. 22-29 (1985).
- 2) 小寺: デジタルプリントにおける色再現, 画像電子学会誌, Vol. 14, No. 5, pp. 298-307(1985).
- 3) 田島: カラーマスキングマトリクスの適応的最適化, 信学会研究会報告, PRL 85-91, pp. 41-47 (1985).
- 4) 日本色彩学会(編): 色彩科学ハンドブック, p. 83, 東京大学出版会, 東京 (1979).
- 5) Floyd, R. and Steinberg, L.: An Adaptive Algorithm for Spatial Grey Level Scales, *SID Symposium Digest of Papers*, 1975, pp. 36-37 (1975).
- 6) 山田, 美濃, 坂井: メッシュ内の濃淡構造に基づく画像の二値表現方式, 信学会研究会報告, PRL 83-61, p. 47 (1984).
- 7) 坂井利之: 情報基礎学演習編, pp. 131-135, コロナ社, 東京 (1986).
- 8) 画像電子学会 画像評価調査専門委員会: ハードコピーの主観評価実験のための指針 (1981).

(昭和 61 年 7 月 7 日受付)

(昭和 62 年 3 月 25 日採録)

### 山田 敬嗣 (正会員)



昭和 57 年京都大学工学部 情報工学科卒業。昭和 62 年同大学院博士課程修了。同年日本電気(株)入社。パターン認識, 画像処理の研究に従事。工学博士。電子情報通信学会, 画像電子学会各会員。

### 美濃 導彦 (正会員)



事。工学博士。

昭和 53 年京都大学工学部 情報工学科卒業。昭和 58 年同大学院博士課程修了。同年京大・工・情報助手となり現在に至る。画像処理, 人工知能, パターン認識関係の研究に従事。

### 坂井 利之 (正会員)



昭和 22 年京都大学工学部 電気工学科卒業。同大学大学院特別研究生。昭和 28 年同講師, 助教授を経て, 昭和 35 年京都大学教授となり, 現在に至る。音声, 画像, 自然言語などのパターン情報処理とコンピュータ・ネットワークの開発に従事。現在は, 通信と処理に共通な情報基礎学, 情報工学の学問的存在の証明に意欲を持つ。工学博士。情報処理学会など 6 学会会員。著書「情報基礎学—通信と処理の基礎工学」など。