

画像の色度分布に基づく色彩画像表示法†

岩 井 伸 一††

ルック・アップ・テーブル方式のカラー・ディスプレイは同時に表示することのできる色数が制限された表示装置である。色彩画像を高品質に表示するには、代表色の選び方が重要となる。代表色数が少ない場合には、色が滑らかに変化する領域において、しばしば偽輪郭とよばれる原画像には存在しない縞模様が現れることがある。本論文ではそういった領域での偽輪郭を緩和するために画像の色ヒストグラムから傾度の高い色度(色相・彩度)を選び、その色度の明度階調の再現性を高めるという手法を提案する。さらに、本論文では複数画像を効率よく表示するために、ルック・アップ・テーブルを固定領域と適応領域に分け、それぞれ一様サンプリングした色と適応サンプリングした色を入れておくという手法を提案する。コンピュータ生成画像に対する実験結果を示し、本手法の有効性について述べる。

1. はじめに

ルック・アップ・テーブル(LUT)方式のフレーム・バッファ・ディスプレイは、目的に応じて表示色のセット(代表色)を選ぶことができる表示装置である。フレーム・バッファの深さ(1画素のデータ長)により表示色の数が制限される。フレーム・バッファ容量の軽減のためには、少ない代表色で目的を達成する必要がある。一方、色彩階調画像を表示する場合、色数が少ないほど高品質に表示することは困難である³⁾。ここでLUT方式のディスプレイに色彩画像を表示するために必要な二つの作業について述べる。

- (1) 代表色を決定する。
- (2) 原画像の各画素に適切な代表色を対応づける。

(1)には、原画像の色分布によらずあらかじめ色空間内に等間隔に代表色を選んでおく方法(一様サンプリング)と原画像の色分布に応じて代表色を選ぶ方法(適応型サンプリング)がある。適応型サンプリングは画像ごとに代表色を求めなければならないので計算コストは高くなるが、比較的少ない代表色で高品質に表示することができる。(2)については色空間の中で最も近い代表色を対応付ける方法が一般的である。あらかじめ色空間全体にわたり、最も近い代表色の番号を記したエンコード・テーブルを作成しておくことで計算時間を節約することができる。

過去に、限られた数の色で色彩画像を表示する手法が種々研究されてきた⁴⁾⁻⁹⁾。いずれの研究において

も、量子化誤差を色空間(RGB空間、 $L^*u^*v^*$ 空間など¹⁰⁾)でのユークリッド距離などで定義し、各画素の量子化誤差の総和を最小にすることを目標とした代表色選択法が提案されている。しかし、色が滑らかに変化する領域においてしばしば原画像には存在しない縞模様(偽輪郭)が生じ、量子化誤差が明瞭に現れることがある。人の目はそういった領域における量子化誤差に敏感なためである。また、これまでは単一画像を対象とした研究しかなく、複数画像を効率よく表示する手法が提案されていなかった。

そこで本論文では比較的少ない色数(256色)でR(赤)、G(緑)、B(青)の3成分で表される複数枚の色彩階調画像を効率よく、しかも偽輪郭を緩和するように表示する手法について報告する^{11,12)}。一様サンプリングと適応型サンプリングを併用することにより、複数枚の画像を表示した時に代表色を効率よく使うことができ、しかも画像の追加・置き換え表示などにより他の画像に影響を及ぼさない方法を提案する。また、偽輪郭を緩和するために画像中の主な色度(色相・彩度)の明度階調の再現性を重視した代表色選択法を提案する。以下、2章で本手法の概要と特徴について述べ、3章において代表色選択法とエンコード・テーブル作成法について詳述する。4章ではコンピュータ生成画像に対する処理例を示し、本手法の考察を行う。

2. 本手法の概要

本論文では256色という比較的少ない代表色で4枚程度の画像を表示することを想定している。このとき画像の追加・置き換え表示において、LUTの内容が変わったために他の画像に影響を及ぼすことのないよう配慮した。また、グラフィックスや文字も同時に表示することができることも考慮した。これらの目的を

† A Method to Display Color Images Based on Their Chromaticity Distribution by SHINICHI IWAI (Tokyo Research Laboratory, Advanced Technology Institute, IBM Japan, Ltd.).

†† 日本アイ・ビー・エム(株)東京基礎研究所アドバンス・テクノロジー・インスティテュート

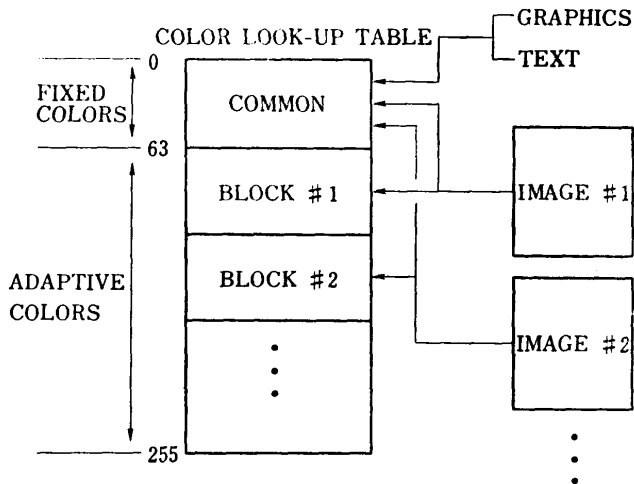


図1 本手法におけるルック・アップ・テーブルの構成
Fig. 1 Configuration of color look-up-table.

達成するために LUT を固定領域と適応領域に分けるという方法をとった。この様子を図1に示す。固定領域にはあらかじめ同様サンプリングした代表色を入れておく。適応領域をさらにいくつかのブロックに分け、表示する画像1枚を一つのブロックに対応させ、その画像専用の代表色を入れる（適応型サンプリング）。グラフィックス・文字を表示する場合は固定領域の代表色だけを使い、画像表示の場合は適応領域の対応するブロックの代表色と固定領域の代表色の両方を使う。画像の追加表示・置き換えの際には対応するブロックの代表色だけを計算し直せばよい。よって、画像の追加表示などにより LUT 全体を計算し直す手間を省くことができる。しかも他の表示画像に影響を与えない。

滑らかに色が変化している領域での偽輪郭を生じさせないため、以下に述べるような考え方で適応領域の代表色を選んだ。一般の画像において色が滑らかに変化している領域では色度（色相・彩度）が一定で、明度が増えている場合が多い。例えば、陰影物体像は物体の色度が変わらないが、光源の位置と面の傾きにより明度が増える。そこで画像の色分布を調べ、頻度の高い色度をいくつか選びだし、それらの色度値を持つ色を画像の色ヒストグラムから抽出する。そして、これらの色を明度方向に等頻度分割することにより代表色を計算する。この結果、色度値が変わらず明度値が異なるような代表色のセットを得ることができるので、偽輪郭を抑制することが期待できる。また、色度別に代表色を選ぶので他の色度を持つ色の影響を受けて色が濁ることを防いでいる。ここで、明度の階調

を重視して代表色を選ぶのは、人の目は色度の変化より明度の変化に敏感である（Liebmann効果¹²⁾）という理由にもよる。

選ばれなかった色度を持つ色は、固定領域の代表色で表示される。固定領域の代表色は粗くサンプリングしてあるので、選ばれた色度を持つ色に比べて量子化誤差は大きくはなるが、色空間全体に一樣に配置してあれば代表色間の距離で制限できる。

3. 代表色の選択とエンコード・テーブルの作成

3.1 固定領域の代表色の選択

固定領域には表示画像によらず一定の代表色を入れておく。これらの色はグラフィックス・文字を表示するのに用いるほか、画像表示のための共通の代表色として使用する。そのため、色空間全体にわたって一樣サンプリングした色を選ぶのがよい。原画像は RGB 画像であることを想定しているため、計算コストの点から本論文では RGB 空間で一樣にサンプリングした色を用いた。すなわち R, G, B それぞれ4階調の64色の代表色を選んだ。またグラフィックスでそれ以上の色を使いたい場合は画像と同様に画像適応領域の一部をこのために割り当てればよい。

3.2 適応領域の代表色の選択

3.2.1 処理の概要

画像を同時に何枚表示するかによって適応領域の各ブロックの大きさが決まる。固定領域に64色使っているので4枚の画像を同時表示しようとする、各画像専用の代表色は48色になる。ただし、画像によってこの数を変えることもできる。以下、表示すべき画像データからその画像専用の代表色を選ぶ手法について述べる。図2に代表色選択の流れ図を示す。まず、原画像を（明度-色度）空間でヒストグラムをとる。次に前処理としてこの中から頻度が際立って高い色を代表色として選び、ヒストグラムから削除する。これによりこの次のプロセスで色度面ヒストグラムからピークを選ぶ際に、背景色などのように、多くの画素が集中しているような色の色度値を選んでしまうことを防いでいる。次に明度方向に画素数の総和を求め色度だけのヒストグラムを求める。この中から頻度の高い色度をいくつか選び、各色度ごとに頻度に比例した数の代表色を与える。こうして原画像の色分布のうち色度が等しく明度が増えている色から代表色を選ぶ。た

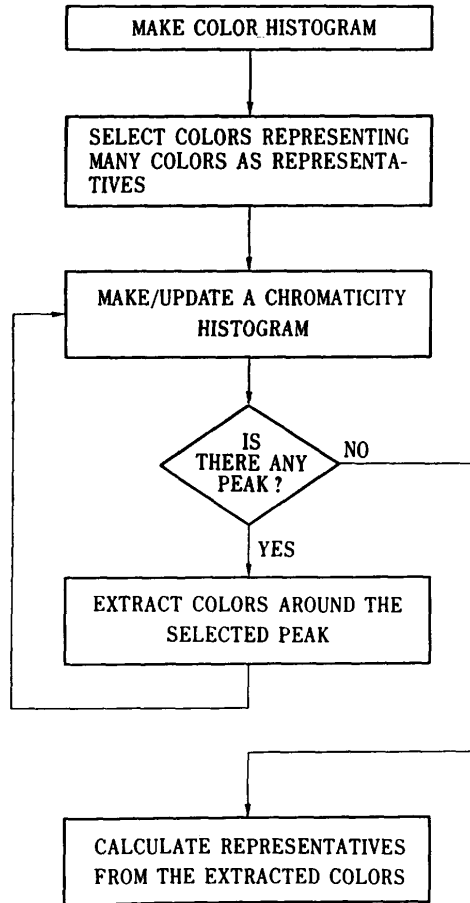


図 2 適応領域の代表色選択アルゴリズム
Fig. 2 Algorithm of choosing adaptive representative colors.

ただし、この一連の処理において選んだ代表色が固定領域のものと重複しないようにする。

3.2.2 ヒストグラムの作成と前処理

明度・色度を以下に示すように定義する。

$$L = \sqrt{R^2 + G^2 + B^2}$$

$$\theta = \arcsin(R/L)$$

$$\phi = \arcsin(B/L)$$

ただし、 (R, G, B) は色の三刺激値、 L は明度、 (θ, ϕ) は色度を示すパラメータである。ただし、 $0 \leq \theta + \phi \leq \pi/2$ を常に満たしている。 L, θ, ϕ によって構成される空間を（明度-色度面）空間と呼ぶことにする。

この変換式を用いて (R, G, B) 空間から (L, θ, ϕ) 空間へデータ変換を行い、その空間でヒストグラムをとる。このとき色度面では 20×20 分割、明度は 40 分割した。次に前処理として閾値 T を越える度数を持つ色を 3次元ヒストグラムから削除し、その色が固定領域になれば代表色として選ぶ。ここで、 T は画像の

大きさと代表色の数によって決まる値であり、次に示すように定める。

$$T = (P_i/R_a) \times K$$

P_i : ヒストグラムの中の総画素数

R_a : さらに選ぶことのできる代表色数

K : 定数 ($1 \leq K$)

この T の値は動的に更新されてゆく。つまり、現在の T の値を越える色を選ぶと同時に P_i を計算し直し、代表色選択の結果に応じて R_a を減らす。この閾値 T を越える色がなくなるまでこの処理を繰り返す。比 (P_i/R_a) は一つの代表色が受け持つ画素数の平均値を示しており、 K については次の節で述べる。

3.2.3 色度の選択

前処理で用いた 3次元ヒストグラムから各色度に対し明度方向に和をとった 2次元のヒストグラム（色度面ヒストグラム）を求め、度数が閾値を越えるピークを選ぶ。閾値としては前節で示した T を新しいヒストグラムに対して適用する。選ばれた色度値を持つ色をヒストグラムから抽出し、それらを一つのグループとする。ただし、このとき固定領域の色と同じ色は削除する。 T は前処理のときと同様に P_i, R_a の値に応じて更新されてゆくものとする。閾値 T を越えるものがなくなるまでこの処理を繰り返す。ここで、 K の値を大きくすると選ばれるピークの数が減少し、それだけ一つの色度に対する代表色の数が増加する。 K は一つの色度に対して最低何色の代表色を与えることができるかを示すものである。

3.2.4 サンプリング

先の処理で選びだしたグループに対し、代表色を選択する方法について述べる。各グループに対し、グループの画素数に比例した数の代表色を与える。すなわち、 i 番目のグループに与える代表色数を R_i とすると、

$$R_i = \left(G_i / \sum_{j=1}^m G_j \right) \times R_a'$$

G_i : i 番目のグループの画素数

m : グループの総数

R_a' : 前処理を終えた時点での残された代表色数

次に各グループ内の明度成分ヒストグラムを R_i 個の区間に分割する。このとき各区間の画素数が等しくなるようにする。そして各区間に含まれる画素の L, θ, ϕ の平均値を求め、代表色とする。

3.3 エンコード・テーブルの作成

代表色を選んだあと、各画素に適切な代表色を対応

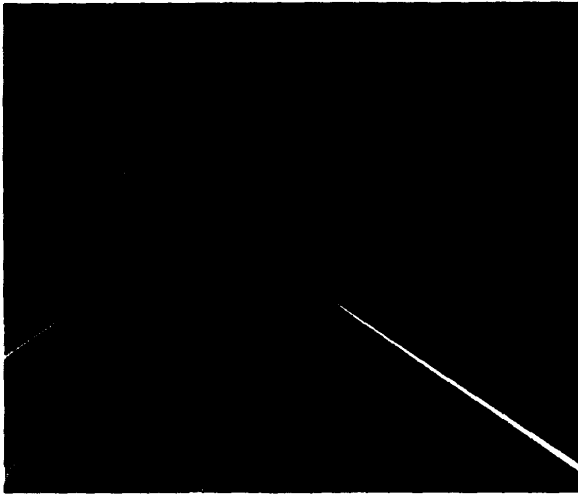


図3 本手法の適用例

Fig. 3 Example of an image quantized by the method.

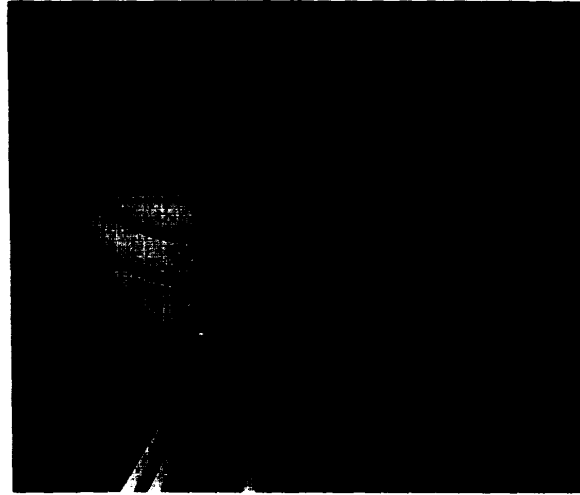


図4 選ばれた色度

Fig. 4 Chromaticities selected by the algorithm.

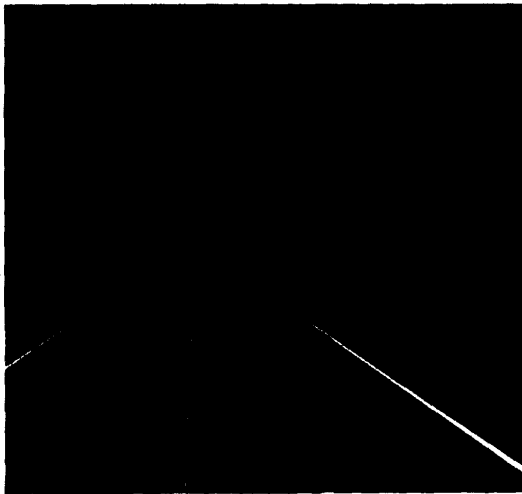


図5 従来手法 (Population Equalization Algorithm) による表示結果

Fig. 5 An image quantized by Population Equalization Algorithm.

づける必要がある。通常、各 RGB の値に対して最も近い代表色の番号を記述してあるエンコード・テーブルを作成し、各画素の RGB 値に応じてテーブルを見ながら代表色を対応づけるという方法をとる。

本論文では次のようにしてエンコード・テーブルを求めた。すなわち、テーブルの各エントリには最も近い代表色の番号とともにその代表色までのユークリッド距離をもたせておく。初期値として固定領域の代表色だけを考慮した値を入れておく。固定領域の代表色は一樣にサンプルされているので、探索をすることなくテーブルを作成できる。このとき、 $n \times n \times n$ 階

調の色空間に $s \times s \times s$ 個の代表色を等間隔で配置したとすると、最も近い代表色までの距離が以下に示すような距離 d を越えることはない。

$$d = \sqrt{3} \times (n/2s)^2$$

次に 3.2 節で求めた適応領域の各代表色について距離 d 以下の色に対しその代表色との距離を求め、テーブルにある距離よりも小さければ代表色の番号をそれに変更するという操作を繰り返す。こうしてエンコード・テーブルを作成する。

4. 実験および考察

4.1 コンピュータ生成画像に対する処理例

図3に本手法を適用した例を示す。これは 512×512 画素、RGB 各 8 ビットのコンピュータ生成画像である。この画像を表示するために固定領域の代表色 64 色と適応領域の代表色 48 色を用いた。なお、閾値 T を与えるパラメータ K については、 $K=5$ とした。前処理で背景色が選ばれて、ヒストグラムから削除された。次に色度選択のプロセスにおいては四つの色度が選ばれた。この様子を図4に示す。黒い領域は固定領域の代表色で表示したことを示し、その他の領域は適応領域の代表色で表示したことを示している。同じ色の領域は同じ色度であることを示している。選ばれた色度を持つ色でも固定領域により近い代表色があれば、その色で表示されるため、画像中の球の一部が黒く表示されている。従来手法との比較のため、図5に Population Equalization Algorithm⁷⁾ による表示結果を示す。これは画像全体での量子化誤差の総和を小さくしようとする手法である。つまり、RGB 空間

表 1 本手法および従来手法による量子化誤差
Table 1 Quantization error of the new method and population equalization algorithm.

| 領 域 | 全く変化しない領域 | 滑らかに変化する領域 | その他の領域 | 全 体 |
|-------|-----------|------------|--------|-------|
| 距 形 数 | 91 | 476 | 457 | 1,024 |
| 本 手 法 | 0.00 | 5.12 | 30.65 | 20.35 |
| 従来手法 | 0.00 | 13.27 | 23.36 | 16.10 |

でヒストグラムをとり、色立方体を代表色の数と等しい数の部分空間に分割する。このとき各部分空間に含まれる度数の和が等しくなるようにする。さらに各部分空間について加重平均を求めることにより、代表色を求める、という手法である。ここでは4枚の画像を表示することを想定しているので、64色の代表色で表示している。本手法に比べ、球の部分の偽輪郭が顕著に現れている。

次に表示画像の量子化誤差について述べる。本論文では、原画像を 16×16 画素の大きさの矩形に分割し、その矩形内の1次微分(付録参照)の最大値 D_{\max} により三つのグループに分類した。すなわち、(1)色が全く変化しない領域($D_{\max}=0$)、(2)色が滑らかに変化している領域($D_{\max} \leq S$)、(3)その他の領域($D_{\max} > S$)。ここで、 S は定数とする。そして、各領域に対して、各画素の自乗平均誤差を計算した。この結果を表1に示す。表中の数字はRGBそれぞれ0~255で表現された色空間での誤差値である。従来手法においては、画像全体の誤差は16.10と本手法に比べて良い値を示しているが、滑らかに変化する領域では13.27と本手法よりも悪い値を示している。一方、本手法では、画像全体での誤差20.35に比べ、滑らかに変化する領域での誤差が小さく(5.12)、この領域での色再現性がよいことを示している。

4.2 本手法の特長と問題点

本手法の特長について述べる。第一に複数画像を表示するためのLUTの利用手法にある。画像を表示する際、固定領域の代表色はすべての画像に対して使われ得るので、代表色の使用効率がよい。第二に固定領域の代表色が一様サンプリングされているので、各画素の量子化誤差を代表色間の距離で制限することができるし、エンコード・テーブル作成のための計算時間が短くてすむ。 $n \times n \times n$ 階調の色空間に $s \times s \times s$ 個の代表色を等間隔で配置したとすると、計算時間は

$$o((n/s)^3 \times B)$$

となる。 B は適応領域の1ブロックの代表色の数であ

る。第三に、適応領域の代表色について、頻度の高い色度を選び、その色度に対し明度階調を重視した代表色選択法をとっている。画像中に色度が変化せず明度が滑らかに変化している領域があれば、そこでの偽輪郭を最小におさえることができる。しかしながら、高頻度色度を持つ色が原画像において滑らかに変化していないようなときにはもともと偽輪郭はおこることはなく、多くの代表色を必要としない。したがって、本手法が効を奏するとは限らない。

5. む す び

本論文では比較的少ない色数(256色程度)で複数の色彩画像を高品質に表示する手法を提案した。これはLUTを固定領域と適応領域に分けることにより代表色を効率的に使うことのできる方式と、画像内の色が滑らかに変化する領域に対して人の目は敏感であるという事実に基づき、こういった領域での量子化誤差を小さくするような代表色選択法についての提案である。これらの手法をコンピュータ生成画像に適用した実験では明度が滑らかに変化する領域において偽輪郭を緩和することが確認できた。

謝辞 本研究を行うにあたりご討論、ご協力いただいた日本アイ・ピー・エム(株)東京基礎研究所宇野栄氏、さらに画像データを提供していただいた同青野雅樹氏に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 岩井伸一, 宇野 栄: 色度情報に基づく色彩画像の表示法, 情報処理学会, グラフィクスとCAD研究会資料, 18-5 (1985).
- 2) 岩井伸一, 宇野 栄: 色度情報を用いた色彩画像量子化の一手法, 第31回情報処理学会全国大会論文集, pp. 1121-1122 (1985).
- 3) 田島譲二: カラー画像表示アルゴリズム, 情報処理, Vol. 27, No. 1, pp. 11-20 (1985).
- 4) Heckbert, P.: Color Image Quantization for Frame Buffer Display, *Comput. Graph.*, Vol. 16, No. 3, pp. 297-307 (1982).
- 5) Tajima, J.: Uniform Color Scale Applications to Computer Graphics, *CVGPR*, Vol. 21, No. 3, pp. 305-325 (1983).
- 6) Tajima, J.: Optimal Color Display Using Uniform Color Scale, *NEC Res. & Development*, No. 70, pp. 58-63 (1983).
- 7) 戸沢義夫: Color Image Quantization—Population Equalization Algorithm—, 第29回情報処理学会全国大会論文集, pp. 1049-1050 (1984).
- 8) 吉良健二, 井上誠喜, 福井一夫: 限定された数

の代表色による適応型自然色画像表示, 電子通信学会, 画像工学研究会資料, IE 83-92 (1983).

- 9) 中嶋正之, 清水正具, 安居院猛: 適応型部分空間法を用いたカラー階調画像の表示, 電子通信学会, 画像工学研究会資料, IE 85-14 (1985).
- 10) 日本色彩学会(編): 色彩科学ハンドブック, 第4章, 東京大学出版会, 東京 (1980).
- 11) 田崎京二, 大山 正, 樋渡洞二: 視覚情報処理, p. 228, 朝倉書店, 東京 (1979).

付 録

本論文で用いた空間微分の算出法について述べる. 画素 (i, j) は $(R_{i,j}, G_{i,j}, B_{i,j})$ の値を持つものとする. 画素 (i, j) の1次微分値を $D_{i,j}^{(1)}$ とすると,

$$D_{i,j}^{(1)} = \left\{ \sum_{m=j-1}^{j+1} \sum_{n=1}^3 (P_{i+1,m,n} - P_{i-1,m,n})^2 + \sum_{k=j-1}^{j+1} \sum_{n=1}^3 (P_{k,j+1,n} - P_{k,j-1,n})^2 \right\}^{1/2}$$

ここで,

$$P_{i,j,1} = R_{i,j} \quad P_{i,j,2} = G_{i,j} \quad P_{i,j,3} = B_{i,j}$$

とする.

(昭和61年5月15日受付)

(昭和61年9月10日採録)



岩井 伸一 (正会員)

昭和33年生, 昭和57年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業. 昭和59年同大学院修士課程修了. 同年日本アイ・ビー・エム(株)入社. 在学中, 医用画像処理に関する研究に従事.

現在, 同社東京基礎研究所に勤務. 色彩画像表示に関する研究に従事. 電子通信学会会員.