

色度情報に基づく色彩画像の表示法

A METHOD TO QUANTIZE AND DISPLAY COLOR IMAGES BASED ON THEIR CHROMATICITIES

岩井 伸一

Shinichi IWAI

宇野 栄

Sakae UNO

日本アイビーエム サイエンスインスティチュート

Science Institute, IBM Japan,Ltd.

ABSTRACT This paper describes an algorithm for quantization of color images based on their chromaticities and a method of displaying multiple images efficiently with a look-up table. It is difficult to display colorful images by a limited number of colors without "contouring effect". The effect is decreased by choosing representatives from those colors whose chromaticities are dominant in the original image and by applying a modified error diffusion algorithm. Experimental results show that the algorithm is particularly effective for images of 3D shaded objects generated by a computer.

1. はじめに

近年、カラールックアップテーブル方式のグラフィックディスプレイ装置が増えている。同時表示色は8色から 2^{24} 色のものもある¹⁾。アニメーションや画像処理の分野では、色数の多いシステムを必要とするが、フレーム・メモリの増加は価格の上昇につながる。

そこで我々は、フレームメモリの小さなグラフィックディスプレイ装置に多彩な画像を"美しく"表示する方法について述べる。特にここでは、人工画像を中心に、3次元物体の陰影表示に主眼をおいた量子化法について述べる。

天然画像においても人工画像においても、一つの物体の表面の色は、色調の変化より明るさの変化が卓越している。人間の目は隣り合った領域の明るさの変化に対しては非常に敏感である²⁾。深さが少ないフレームメモリのディスプレイでは明るさがなめらかに変化する部分での"縞模様"が顕著に現れる。そこで我々は縞模様を緩和するため、色度が一定で明るさだけが変化するような広

い領域を中心に量子化する方法を紹介する。

本研究では、画像の色度情報に基づく量子化の手法と誤差拡散による画素値の決定法について述べる。

2. 色彩画像の量子化

過去に多くの研究が行なわれてきたが、大別すると、一様サンプリングと適応サンプリングがある。一様サンプリングというのは、色空間を等しい間隔でサンプルする方法である。色空間にはRGB空間、XYZ空間、HLS空間などがあるが⁴⁾、 $L^* u^* v^*$ 空間の中で一様サンプリングを行ったものが報告されている⁵⁾。 $L^* u^* v^*$ 空間とは人間の感じる色差と空間中の距離が対応するように作られた色空間で、均等色空間(Uniform Color Scaling)とも呼ばれている。

適応サンプリングとは、表示する画像によりテーブルの内容を変更する方法である。この方法を用いた色彩画像量子化の過程は次のようになる。

- [1] RGB各nビットの入力画像をRGB各mビットの空間でサンプリングし、ヒストグラムを作成する。
- [2] テーブルに格納すべき色を選択する。
(代表色の選択)
- [3] 各画素にテーブルの色のいずれかを割当てる。

表示された画像の質を大きく左右するのは[2]、[3]のステップである。[2]の処理の後[3]の処理のためにRGB空間からテーブルへのマッピングを計算することがある。このときはその計算速度が問題となる。このマッピングをそのまま使用すると量子化誤差のため、縞模様がはっきりとみえる場合が多い。そこで、ディザリングを行ない、画質を向上させる方法がとられることが多い。

[2]において、過去にいくつかの方法が報告されてきた。

1) Popularity Algorithm³⁾

ヒストグラムの中の頻度の高いものから代表色として選んでいく方法である。色の分布がRGB空間の中で大きく広がっているような画像では画質が極端に劣化することが多い。

2) Population Equalization Algorithm⁶⁾

RGB空間をテーブルの大きさと等しい数の部分空間に分割する。このとき、各部分空間の中にいる画素数が等しくなるようにする。多くの画像に対し、有効な方法であるが、使える色の数が減ると、曲面の陰影表示の部分で縞模様が見えることがある。

この他、Medium Cut Algorithm³⁾などがあるが、概念的には上記のPopulation Equalization Algorithmと変わらない。また、計算速度を向上させるために、RGB空間から1次元空間へ写像し、そこで量子化をおこなう方法もある⁷⁾。しかし、この方法はRGB空間において隣り合った色が近くに写像されるとは限らないという欠点を持っている。

我々は、人間の目が比較的広い領域での明るさ

の変化に敏感であるという事実²⁾に基づき、量子化を行った。つまり、縞模様の輪郭は明度、色相、彩度の差により空間的不連続が急峻であるときに顕著に現れる。但し、二領域が色相で異なっていても明るさが等しくなると輪郭は生じにくい(Liebmamn効果)。物体の面の傾きがなめらかに変化するとき色相、彩度はあまり変化せず明るさが主に変化する。特に人工画像において3次元物体の陰影表示を行う場合、PhongのShading Modelを用いることが多いが、背景光の値を無視すると鏡面反射が弱い部分では色度は変化しない。

そこで画像の中には曲面を含む物体がいくつか存在すると仮定し、一つの曲面の中では色度は大きく変化しないものとする。本研究においては、画像の中の支配的な色度を中心に量子化を行なった。しかも、複数枚の画像を効率良く同時に表示できるよう、カラー・マップを共通領域と個々の画像のための領域に分割した。この手法を用いると、3次元物体の陰影を含む複数枚の比較的多彩な画像を表示する場合に有効である。

3. システム構成

図1に色彩画像表示システムの概要を示す。入力画像は、RGBそれぞれnビットずつのデータをもっているものとする。テーブルの長さは 2^t で、データの幅はmビットあるものとする。本研究では、t=8, m=12のグラフィックシステムを使用した。(つまり、4096色の中から同時に256色を表示することができる)また、CRTの解像度は1024×1024画素である。

図2にカラールックアップテーブルの構成を示す。256色のうち64色はあらかじめ用意しておいた色をロードしておき、この部分は画像が変わっても値を変更しないものとする。64色の内容は、RGB各4レベルずつの一様にサンプルされた色とする。こうしておけば、この領域を用いてグラフィックスや文字などを表示することができる。その他の領域は画像表示のために使用するが、固定領域(64色)の色もあらかじめわかっているので、この中の色も使うことができる。但し、他の画像の領域の色は使用しないことにする。

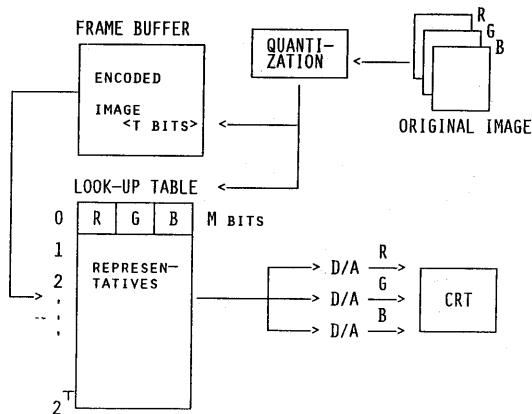


図1 色彩画像量子化の概要

Fig.1 Configuration of color image quantization system

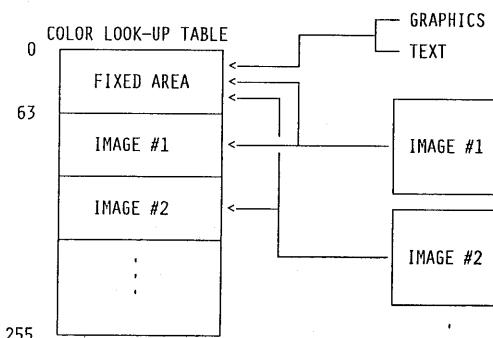


図2 ルックアップテーブルの構成

Fig.2 Configuration of color look-up table

4. 量子化のアルゴリズム

4. 1 処理の流れ

図3に量子化のアルゴリズムの概略を示す。まず、入力画像からRGB各4ビット(4096色)の空間でヒストグラムを作成する。背景色など、1色に画素が集中しているようなものを代表色として選び、ヒストグラムから削除する。この処理を行うことにより、次段階において色度のピークを選ぶ際に背景色などの色度にかたよることを防いでいる。

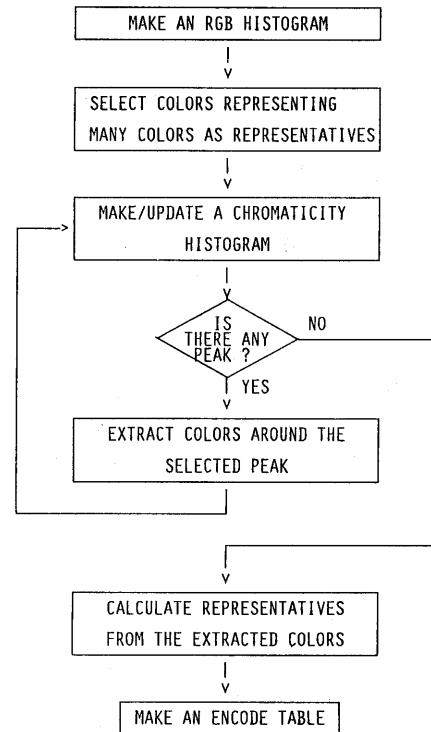


図3 本手法による量子化のアルゴリズム

Fig.3 An algorithm of quantization

次に、RGBの比(色度)が等しいもののヒストグラムを作成することにより画像中の色度の分布を調べる。ここで、頻度の高い色度を選び出し、各色度ごとにいくつかの代表色を割当てる。こうして、色度が等しく明るさが異なっている色を中心にサンプリングを行う。選ばれなかった色度の画素は、固定領域の色を中心に表示されることになる。

4. 2 前処理

入力画像はRGB各4~8ビットのデータをもっているものとする。また、この画像に与えられた代表色の数を R_n とする。入力画像に対しRGB各4ビットの空間でヒストグラムを作成する。さらに、背景色など色度が一定であっても明るさが変化しない広い領域を考慮して、一定値 T_1 を越える色をヒストグラムから削除する。ここで、

$$T_1 = (P_t / R_a) * k_1$$

P_t : ヒストグラムの中の総画素数
 R_a : 残された代表色数
 k_1 : 定数

P_t, R_a は常に値が更新されてゆくものとする。
 k_1 は前もって決められた値である。

4.3 ヒストグラムの作成

色度に関するヒストグラムを作成するにあたり、本研究ではRGBの比を色度と定義した。具体的には、RGB一空間において原点とその色を

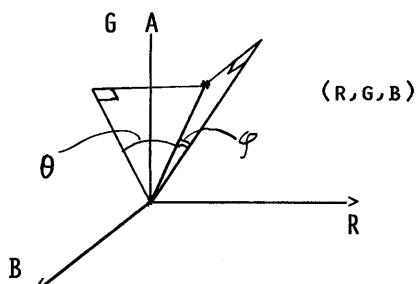


図4 色度 (θ, φ) の定義

Fig.4 A definition of chromaticities

結ぶ直線とGB一平面、GR一平面とのなす角度で示す。この様子を図4に示す。 θ, φ の計算式を以下に示す。

$$\theta = \arcsin(b/(r^2 + g^2 + b^2)^{1/2})$$

$$\varphi = \arccos(r/(r^2 + g^2 + b^2)^{1/2})$$

図5に θ, φ の値を球面上に表示した様子を示す。 θ 方向, φ 方向をそれぞれc分割することにする。

4.4 ピークの検出

ヒストグラムの中からピークをいくつか検出する方法について述べる。 $\theta - \varphi$ 空間において、ある程度小さな領域に多くの点が集まっている場所を探す必要がある。そのため、図6に示したマスクを $\theta - \varphi$ 平面に操作させて平滑化を行ってからしきい値 T_2 以上の最も高いピークを選びだした。ここで、

$$0 <= M <= 1$$

$$T_2 = (P_t / R_a) * k_2$$

P_t : ヒストグラムの中の総画素数
 R_a : 残された代表色数
 k_2 : 定数

ここで、 k_2 の値を予め決めておかなくてはならない。この値を大きくすると選ばれるピークの

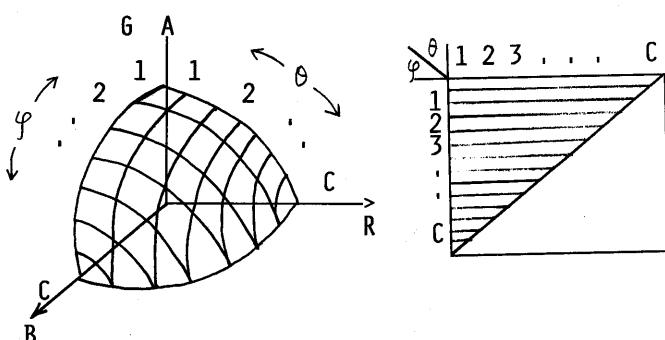


図5 色度のヒストグラム

Fig.5 A histogram of chromaticities

M	M	M
M	1	M
M	M	M

図6 平滑化のマスク ($0 <= M <= 1$)

Fig.6 A mask of smoothing

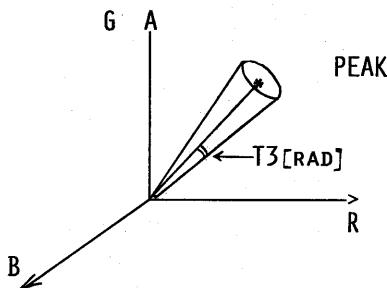


図7 ピークの付近の色の抽出

Fig.7 Extraction of colors near the peak

数が減少し、その分ピークあたりの色が多く選ばれることになる。

次に、選ばれたピークを中心にしきい値 T_3 [rad] 以下の色をヒストグラムから抜き出す。（図7参照） T_3 の値を以下に示す。

$$T_3 = (0.5 + M) * (\pi / 2c)$$

M : マスクの値（図6参照）

c : ヒストグラムの分割数

この式で $(\pi / 2c)$ は一つのメッシュの一辺の大きさを近似している。Mは近傍のメッシュの寄与の程度を決めるパラメータである。例えば $m=0$ のときはピークのメッシュに含まれる色だけが選びだされ、 $m=1$ のときは近傍を含めた9つのメッシュに含まれる色が選びだされる。このことを考慮して適切なMを決めておく。

こうしてピークの付近の色を抜出し、一つのグループとして一時蓄えておく。さらに、ヒストグラムを更新する。こうして T_3 以下のピークが存在しなくなるまでこの操作をくり返す。図8に流れ図を示す。

4.5 サンプリング

次に選ばれたいいくつかのグループから代表色を計算する方法について述べる。各グループの中から固定領域の中の色と同じものを削除する。これらの色についてはこれ以後のプロセスにおいて考

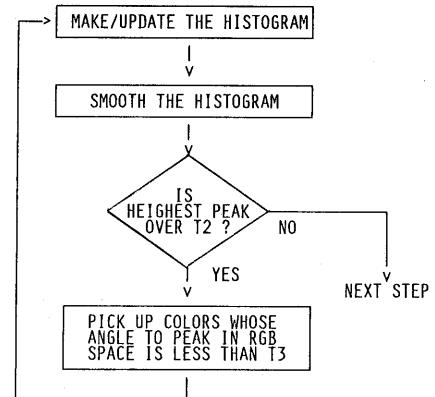


図8 色度のピーク検出アルゴリズム

Fig.8 An Algorithm of detecting peaks of the histogram of chromaticities

慮する必要はない。まず、グループの中の画素数に比例した数の代表色を与える。i番目のグループに与える代表色数を R_i とすると、

$$R_i = (G_i / \sum_{j=1}^m G_j) * R_a$$

G_i : i番目のグループの画素数

R_a : 残された代表色の数

m : グループの数

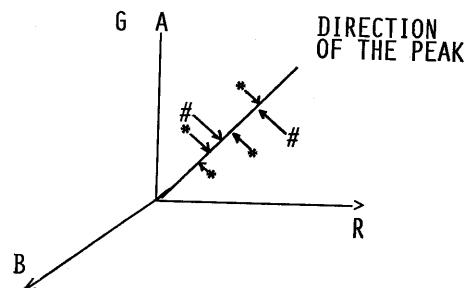


図9 抽出された色をピークの方向に対し射影

Fig.9 Projecting extracted colors to a vector of the peak

(#は既に選ばれた代表色)

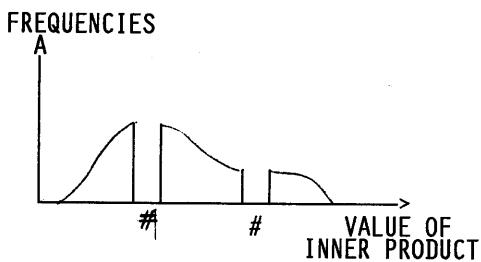


図10 内積の値でソートする

Fig.10 Sorting the colors by values of inner product

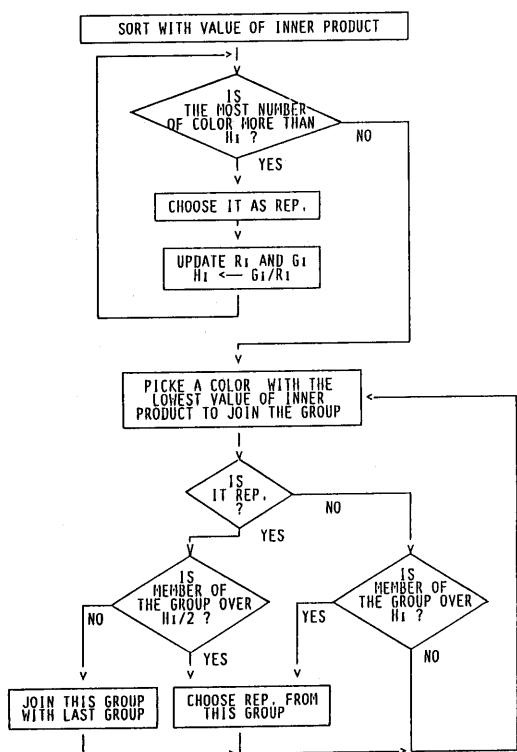


図11 代表色の計算法

Fig.11 A method of calculating representatives from extracted colors

ピークの座標を (θ_p, φ_p) とする。グループの中の各色をピークの方向の単位ベクトルと内積をとり、この値によりソートする。このとき固定領域の色、前処理の段階で既に代表色として選んだ色に対してもこのマッピングを行う。図9、図10にこの様子を示す。さらに、ひとグループあたり $G_i/R_i (= h_i)$ 画素の R_i 個のグループに分ける。詳細なアルゴリズムを図11に示す。まず、 h_i の値よりも頻度が高い色を代表色として選ぶ。このとき順次 h_i の値を更新してゆくものとする。次に内積の値の小さいほうから順に、 h_i 画素ずつグルーピングを行う。但し、既知の代表色を有効利用するためにこれらの色を含んでしまうようなグループを作らないことにする。つまり、 h_i 画素のグループを作る前に代表色が現れたときは、もし $h_i/2$ 画素以下ならばグループを作らず、前のグループにふくめてしまう。 $h_i/2$ 画素を越えているならばその時点でグループを作ることにする。このときも順次 h_i の値を更新する。こうして既に存在する代表色と新しく計算する代表色がRGB空間においてあまり近づかないようにグルーピングを行う。さらに、各グループにおいてメンバーの平均をとることにより代表色を決定する。

4. 6 RGB空間からカラーマップへ

以上述べた方法で代表色を求めたあとRGB空間の各色からカラーマップ（代表色のテーブル）へのポインターを計算する必要がある。本研究では、各色に 1) 最も近い代表色へのポインター、2) その代表色までの距離 の2種類のデータをもたせた。まず、固定領域へのポインターと距離を計算する。 $m * m * m$ の空間の中に $s * s * s$ 個の色を一様な間隔で配置したとすると、各色から最も近い色までの距離が以下に示す距離 d を越えることはない。

$$d = (3 * (m/2s))^2)^{1/2}$$

よって、各代表色に対し、 d 以内にある色についてのみ代表色との距離をもとめ、既にある値よりも小さい場合は新しく書き替える、という操作をすればよい。同様に、色度情報から求めた代表色にたいしても距離を計算しポインターをつける。

このときの計算時間Tを以下に示す。

$$T = o \left(n^3 / s^3 * k \right)$$

n : RGB各成分の分解能

s : 固定領域色の分解能

k : 代表色の数

X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	X	P	A	0	0	0
0	0	D	C	B	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

5. スムーズ・カラーリング

5.1 ディザリング

4章で述べた方法だけで量子化を行うと、画像によっては量子化誤差が明瞭に現れることがある。つまり、広い領域で明るさが滑かに変化しているような場所では色が階段状に変化するのがはつきりと認められる。特に、本研究においては1枚の画像に対し固定領域の他に64色程度しか代表色を与えないもので、この傾向は著しい。

量子化誤差を軽減するためにランダムノイズ法、誤差拡散法など各種の方法が開発されている^{8),9)}。ランダムノイズ法とは各ピクセル毎に乱数的な雑音をのせることにより入力値とその出力値の平均値との偏差を減少させようという方法である。このことにより、よりなめらかな画像を表示することができる。誤差拡散法とは各画素における量子化誤差を近傍の画素に重畳することにより、広い領域での平均的な色を原画像の色に近づけようとするものである。本研究においては誤差拡散法を多少の変更を加えて、適用した。

文献^{3),8),9),11)}では一画素における誤差を画像全体に伝搬させる方法をとっている。しかし、この方法によると、色が変化しない広い領域ではときどき「あばた」のような模様ができてしまうことがある。これを取り除くため、各画素の誤差を画像全体（但し、その画素の右下部のみ）に伝搬させるのではなく、時々誤差をリセットするという方法を試みた。5.2節においてこの方法を紹介する。

5.2 誤差拡散法

2値画像を対象とした誤差拡散法が Floyd and Steinberg によって報告された¹²⁾。彼らは各画素における量子化誤差を近傍の画素に加算し、近傍の画素の値を更新するという方法を開発した（図12参照）。ここでXは既に値が決定された

図12 誤差拡散法

Fig.12 Error diffusion algorithm

画素、Pは現在処理中の画素で、A, B, C, Dはその近傍の画素のうちまだ値が決定されていないものである。Oは値の決定されていない他の画素である。Pにおける量子化誤差をEとするとき、Aに対し7/16E、Bに1/16E、Cに5/16E、Dに3/16Eを加算し、A, B, C, Dの値を変更していく。こうしてラスター操作の方向に従い1画素ずつ処理を行ない、局所的な領域での誤差の和を最小にするという方法をとった。

これを受けた Heckbert はカラールックアップテーブル方式のディスプレイにこの方法を利用することを提唱した。つまり、彼はあらかじめ RGB空間からテーブルへのマッピングを求めておき、出力したい値とテーブルをもちいて実際に出力された値との差を計算し、それを近傍の画素に拡散するという方法である。この方法を用いると陰影部の縞模様を取り除くことができる。しかしながら、広い領域において色が変化しない場合には誤差が少しずつ蓄積して、最後にはもとの色とかけ離れた色を出力することがある。

そこで我々は誤差拡散法に変更を加え、「あばた」を取り除くことを試みた。その方法を以下にしめす。一般的の誤差拡散法では誤差の定義を

$$E = D - M$$

D : 出力された値

M : 誤差を重畳された入力値

としているが、我々は第二の誤差計算法として

$$E' = D - O$$

O : 誤差を重畠されていない入力値

を定義した。つまり、誤差の計算をEまたはE'で行なうことにより誤差の伝搬の度合を制御する。Eだけで誤差を計算すると、RGB空間においてその色の近傍に代表色がない場合には「あばた」が表示されることになる。E'だけで計算すると、誤差は1回しか伝搬しないので、「あばた」を除くことはできるが、陰影部において縞模様が残ってしまう。そこで、各画素においてEとE'を交互に用いることで、両方を緩和するという手法をとった。

6. 実験結果

図13に入力画像の例を示す。このカラー画像を表示するために固定領域64色、この画像のための領域48色を使用するものとする。つまり、4枚の画像を同時に表示することができる。また固定領域の色はR, G, Bそれぞれ0, 5, 10, 15の4階調で、一様に分布しているものとする。この条件で量子化する過程を述べる。

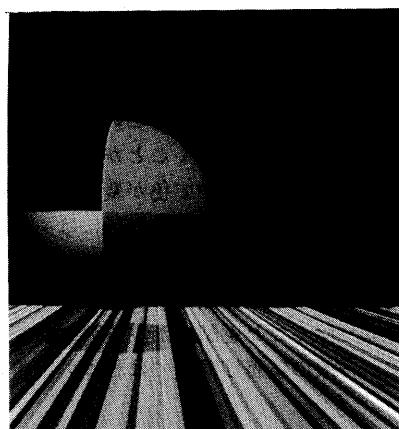


図13 本手法による量子化の例

Fig.13 A resulting example of our quantization method

まず4.1節で述べた方法により前処理を行なう。ここでは $k_1 = 5$ として1色で頻度の高い色を選びだした。しかしいずれの色もこの条件を満たさなかった。(背景色はR=G=B=0で固定領域の色と同じである。) RGB各4ビットでのヒストグラムを作成した結果この画像は116色を含んでいた。

4.3節において $c = 25$ にした場合の色度のヒストグラムを図14に示す。4.4節において $M = 0, 5, k_2 = 5$ としてしきい値を設定して頻度の高い色度を選びだした。選ばれた色度を図中丸印で示す。48色の代表色はこれらの色度をもつ色を中心を選ばれる。これらの色度は画像中の陰影部の色度に対応している。図15にこの様子を示す。黒い領域は固定領域の色で表示したことを示し、その他の領域は画像領域の色で表示したことを示している。同じ濃度の領域は、同一の色度であることを示す。このように画像中の陰影部の色を中心にして代表色を選ぶことができる。

比較のため Population Equalization Algorithm により量子化された画像を図16に示す。この画像は64色の代表色を選んで量子化されたものである。我々の手法に比べ縞模様が顕著に現れていることがわかる。

このあとスムーズカラーリングを行なうことにより縞模様を緩和することができる。

7. おわりに

本研究はなめらかな面をもつ物体の陰影を含む画像に対して有効な量子化のアルゴリズムを紹介した。また、一つのカラールックアップテーブルを用いて複数の画像を効率良く表示する方法を示した。

人工画像に対する実験では満足のいく結果を得ることができた。しかし自然画像については実験を行なっていないので、今後この種の画像にたいする本手法の有効性を検討する必要がある。

→ θ

1513	0	0	83	158	0	64	136	0	67	0	0	1305	0	0	138	25	62	56	0	57	160	0	0	661		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
172	0	0	106	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	55	116	0	0	0	
147	0	0	0	159	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	138	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	77	0	0	0	20	0	56	1	0	0	0	71	0	0	0	0	0	0	0	0		
98	0	0	0	0	0	140	0	0	116	0	0	0	156	0	0	143	0	0	159	0	0	0	0	0	0	
138	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	140	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	140	0	0	0	81	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
55	0	0	0	0	0	0	0	0	202	0	0	0	0	0	0	149	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	158	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
339	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	386	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	139	0	0	158	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	109	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
158	0	0	0	0	0	0	158	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
98	0	0	0	55	0	59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
158	0	0	158	158	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
158	0	0	163	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
772	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

図14 色度 (θ, φ) のヒストグラム

Fig.14 The histogram of chromaticities from the original image

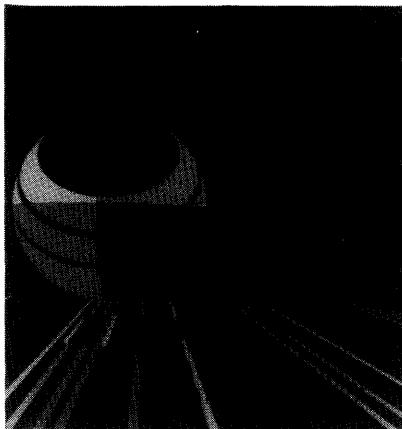


図15 選ばれた色度

Fig.15 Chromaticities chosen as peaks

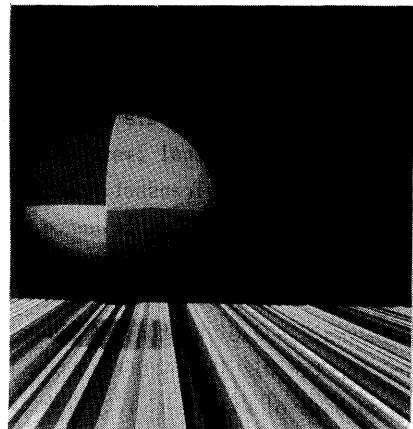


図16 Population Equalization Algorithm による量子化の例

Fig.16 A resulting example of Population Equalization Algorithm

参考文献

- 1) 「機能向上と高速化が進むカラーグラフィックディスプレイ」，日経エレクトロニクス，1983.5.9
- 2) 田崎京二 他：「視覚情報処理」，朝倉書店，1979
- 3) Paul Heckbert:"Color Image Quantization for Frame Buffer Display", ACM SIGGRAPH'82, pp297-307, July, 1982
- 4) 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，1980
- 5) Johji Tajima:"Uniform Color Scale Applications to Computer Graphics", CVGPR, Vol.2 1, No.3, pp305-325, March, 1983
- 6) 戸沢義夫："Color Image Quantization - Population Equalization Algorithm -", 情報処理学会第29回全国大会, pp1049-1050, 1984
- 7) R.j.Stevens et al:"Manipulation and Presentation of Multidimensional Image Data Using the Peano Scan", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-5, No.5, pp520-526, September, 1983
- 8) J.F.Jarvis,C.N.Judice et al:"A Survey of Techniaue for the Display of Continuous Tone Pictures on Bilevel Displays", C.G.I.P., vol. 5, No.1, pp13-40, March, 1976
- 9) 宇野栄, 小林潔 他：「自由曲面のカラー濃淡表示－3」情報処理学会第30回全国大会, pp2003-2004, 1985
- 10) L.G.Roberts:"Picture Coding Using Pseudo-Random Noise", IRE Transactions on Information Theory, vol.IT-8, pp145-154, February, 1962
- 11) Robert W.Floyd and Lowsis Steinberg:"An Adaptive Algorithm for Spatial Greyscale", Proc.SID, vol.17, no.2, pp75-77, 1976