角度空間ベクトル量子化の S/N 解析

S/N Analysis of Vector Quantization for Still Image on the Angle Space

学生会員 朝 康博[†], 正会員 佐藤 和弘[†]

Yasuhiro Asa[†] and Kazuhiro Sato[†]

あらまし 画像信号を角度座標空間に変換することで、信号の冗長性を削減し、ベクトル量子化を行う手法（角度空間ベクトル量子化）は、ブロックの DC 成分に依存することなく、 S/N を一定に保ち、かつ急峻性を認識できるという特徴を有する。本論文では、シミュレーション実験による解析を通じ、これらの S/N に関する特徴について述べる。

キーワード：画像圧縮、ベクトル量子化、角度座標空間

1. ま え が き

ベクトル量子化の画像圧縮への応用は、以前から多くの研究が行われている^{1)~10)}。その課題のひとつは、コードブック (CB) 設計が困難なことにある。一般には、LBG アルゴリズム¹¹⁾ のような学習過程により CB 設計を行っているが、この設計法は、CB の特性が参照画像の統計的性質に依存してしまい、統計的性質の変動が大きい画像信号には、必ずしも適しているとはいえない。汎用性の高い CB を実現するには、画像信号の統計的変動を除去し、画像共通の統計的性質に対してベクトル量子化を施す必要がある。我々は、このことを実現する一手法として、画像信号を角度座標空間（角度空間）に変換することで、信号の冗長性を削減し、この角度空間上の信号に対してベクトル量子化を行う手法（角度空間ベクトル量子化）を提案した^{12)~15)}。本方式は、任意の入力ベクトルに対し、DC 成分に依存することなく、 S/N を一定に保ち、かつその急峻性を認識できるという特徴を有する。つまり、ブロック急峻性に適した S/N 値を既定しておくことで、 S/N を考慮した CB 設計が可能となる。

本論文では、角度空間ベクトルの S/N に関する特徴について説明し、シミュレーション実験により解析を行う。

2. 角度空間ベクトル量子化

画像信号を隣接する n 画素のブロックに分割し、各ブロック中の画素値 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) から成る 1 本のベ

クトルを (1) 式により平均電力値 D （各画素値の 2 乗和平方根：DC 成分）と角度成分 α_i （ブロックの急峻度）とで表す。そして、DC 成分に対しては線形量子化を施し、 $n-1$ 個の角度成分から構成されるベクトル（角度ベクトル）に対しては、 $(n-1)$ 次元角度空間上にてベクトル量子化およびエントロピー符号化を施すことで情報圧縮を行う。

$$\begin{cases} D = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} & (i = 1, 2, \dots, n) \\ \alpha_i = \arccos(x_i/D) & (i = 1, 2, \dots, n-1) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、角度情報は $\sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i = 1$ で制限できるため、ブロックを再構成するのに必要とする角度情報は $(n-1)$ 次元でよいことになる。また、復号画像は次式から得られる。

$$x'_i = D \cdot \cos \alpha'_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

ただし、 α'_i は CB 中の代表ベクトル成分。また、 α'_n は $\sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha'_i = 1$ から導出。

3. 本方式の S/N に関する特徴

角度空間上における画像信号は、隣接画素間の相関性から、ブロックサイズにより規定される一点 (C_A) に集中し、冗長度が削減される。すなわち、 n 画素から成るベクトルにおいて、 $x_1 = x_2 = \dots = x_n$ という軸は、角度空間上のある 1 点に相当する。図 1 は、lena 画像（ブロックサイズ：2×2）の 3 次元角度空間における任意の 2 軸 (α_1, α_2) の角度ベクトル分布を示したものであり、大幅な冗長度削減が行われていることを明示

1999 年 1 月 29 日受付、1999 年 3 月 2 日再受付、1999 年 3 月 5 日採録

[†] 東京都立科学技術大学 工学部 電子システム工学科

(〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6, TEL 042-585-8600)

[†] Faculty of Engineering, Tokyo Metropolitan Institute of Technology

(6-6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo 191-0065, Japan)

図 1 静止画像における角度分布 (α_1, α_2)
Angle Distribution in the Still Image (lena).

している。また、各ブロックから導出される複数の角度と C_A との差から、対象ブロックの急峻性 (flat part, inclination part, edge part) を識別できる。すなわち、 C_A から離れるほど、より急峻度が大きいことになる。図 2 は、角度空間 (n 次元角度空間を 2 次元に投影したもの) とブロックの急峻性との対応関係を示したものである。このように、角度空間上では、ブロックの DC 成分に無関係にその急峻性を識別できる。さらに本方式では、ブロックの DC 成分・角度成分を独立に伝送することから、任意ベクトルの DC 成分と量子化誤差とが比例関係となるため、同一の角度ベクトルを有するブロックの S/N を、DC 成分によらず一定値に設定できる。ここで、 S/N は次式にて導出するものとする。

$$S/N = 20 \cdot \log_{10} \frac{\bar{x}}{\sqrt{MSE}} \quad (3)$$

$\bar{x}$ は、ブロックの平均画素値であり、 MSE は、入力ベクトルとの平均 2 乗誤差である。

(3) 式において、 $\bar{x} = 255$ (8bit 画像におけるピーク to ピーク値) とする時、次式の $PSNR$ となる。

$$PSNR = 20 \cdot \log_{10} \frac{255}{\sqrt{MSE}} \quad (4)$$

このように、 $PSNR$ は (3) 式で示した S/N において、最大量子化誤差を与える値である。したがって、ブロックの急峻性に適した S/N 値 ($PSNR$) を既定し、それに対応した代表角度ベクトルを意図的に配置することで、 S/N ($PSNR$) を考慮した CB 設計が可能となる。

現在の静止画圧縮の国際標準である JPEG (シーケンシャルモード) では、Original 画像に対して、DCT より冗長度削減を行い、この DCT 係数を量子化し、そしてエントロピ符号化を行うことで情報圧縮を行っているが、処理の流れとしては、本方式も全く同様の処理を行っている。しかし JPEG では、固定の量子化テーブルを用いて、DCT 係数を量子化しているため、同じブロックパターンであっても、その輝度レベルによって S/N 値

C_A : 集中角度 (Concentration Angle)

図 2 角度空間とブロックパターンの対応
The correspondence of the block pattern to the angle space.

が異なってしまう (輝度レベルが小さいほど S/N が悪くなる)。これに対し、本方式は、同じブロックパターンにおける輝度レベルによる S/N の変化がない。

4. 本方式における CB の設計法

本方式における CB 設計法を以下に示す。

まず、 $PSNR$ の許容量 (角度空間内の各分割領域における最小 $PSNR$) を意図的に決定し、角度空間を領域分割する。この時、量子化誤差が目につきやすい flat part (角度空間の C_A 付近) の最小 $PSNR$ を高く設定し、急峻性が増すほど最小 $PSNR$ を低く設定することで、効率的に圧縮できる。そこで、最大量子化誤差 ε を次のような 2 次曲線でモデル化する。

$$\varepsilon = \text{const} \cdot m^2 \quad (5)$$

const は、角度空間上の任意領域 ($m = 1$ の時の角度領域) における最大量子化誤差であり、あらかじめ決めておく。(3)、(4) 式で示したように、各角度領域に対して最大量子化誤差を割り当てることは、その領域における最小 $PSNR$ を割り当てることと等価である。したがって、(5) 式の 2 次曲線モデルに沿って、flat part に小さな最大量子化誤差 (最小 $PSNR$) を割り当て、急峻性の増大と共に大きな最大量子化誤差 (最小 $PSNR$) を割り当てる。

そして、これらの最小 $PSNR$ 値から代表角度成分 (α'_i) を決定する。導出した α'_i の重複順列から、角度ベクトル群を生成し、CB とする。

図3 任意ベクトルのノルムと S/N の関係
Relations between norm in the optional vector and S/N .

図4 急峻度による $PSNR$ の頻度 (lena)
The frequency of $PSNR$ of every inclination (lena).

5. シミュレーション実験

5.1 CB 設計

シミュレーション実験におけるブロックサイズは 2×2 とした。したがって、 C_A は 60° となる。CB は、flat part における最小 $PSNR$ が 40dB となる角度 (60.59586°) を (1), (4) 式から求め、この時の最大量子化誤差を起点とした 2 次曲線モデル

$$\varepsilon = 0.00903 \cdot m^2 \quad (6)$$

から独自で既定する最小 $PSNR$ に対応した代表角度を求めた。今回は flat part から急峻性が増すごとに最小 $PSNR$ が 31.4dB, 19.4dB, 9.1dB となるように設計した。したがって、代表角度ベクトル成分 α' は、 49.87330° , 57.58010° , 59.40076° , 60.0° , 60.59586° , 62.36224° , 69.17468° となる。これらの重複順列をとり、CB とした。CB サイズは 287 となった。また、DC 成分 (角度ベクトルの構成要素が C_A のみから成る時) における最小 $PSNR$ は線形量子化の際の量子化幅にて決定し、今回のシミュレーション実験では 9bit で量子化を行ったので、54.18534dB となる。

5.2 S/N 解析

次の 2 つの入力ベクトルパターン (角度ベクトル) $\{61.59832^\circ, 61.59832^\circ, 58.45151^\circ, 58.45151^\circ\}$ (flat part), $\{84.96812^\circ, 84.96812^\circ, 45.44047^\circ, 45.44047^\circ\}$ (edge part) に対して、DC 成分と S/N の関係を 図3 に示す。図3 から、本方式は、任意の入力ブロックパターンに対して、その DC 成分に無関係に S/N を一定にできることがわかる。また、先の CB 設計により、ブロックの急峻性が増加するにしがって量子化幅を粗く設定していることから、edge part より flat part の方が S/N が高く、視覚特性を加味したものとなっている。

次に、lena 画像 ($512 \times 512, 256$ 階調) を本方式によって符号化した時に、CB 中の任意の代表角度ベクトル

$\{60.59586, 60.0, 60.0\}$ (flat part), $\{57.58010, 62.36224, 57.58010\}$ (inclination part), $\{49.87330, 69.17468, 57.58010\}$ (edge part) がそれぞれ選択された時の入力ベクトルに対する $PSNR$ と選択頻度の関係を 図4 に示す。図4 から、前述の CB 設計において既定した $PSNR$ (40dB, 31.4dB, 19.4dB, 9.1dB) に対応した値が得られていることがわかる。つまり、flat part の $PSNR$ は 35dB 以上の値、inclination part の $PSNR$ は 25dB 以上、そして edge part での $PSNR$ は 20dB 以上であり、急峻性に適応した $PSNR$ を得ている。また、Original 画像情報に対する 図4 の代表角度ベクトルの選択頻度は flat part が約 6%, inclination part が約 2%, edge part が約 0.2% であり、角度ベクトル分布が C_A 付近に集中しており、効率的な冗長度削減がされていることがわかる。

6. む す び

本論文では、シミュレーション実験により、角度空間ベクトル量子化が、ブロックの DC 成分に依存することなく、 S/N を一定に保つこと、そしてブロックの急峻性と S/N ($PSNR$) を考慮することで、画像圧縮に適した CB 設計が可能になることを示した。今後は、本方式の特徴を活かし、より高能率な圧縮方式として構築していく予定である。

【文 献】

- 1) 斎藤, 原島: “ベクトル量子化とその画像符号化への応用”, 信学技報, IE87-48 (1987)
- 2) 田崎, 山田: “ベクトル量子化”, 信学誌, **67**, 5, pp.532-536 (1984)
- 3) 相澤, 原島, 宮川: “離散コサイン変換ベクトル量子化 (DCT-VQ)”, テレビ誌, **39**, 10, pp.920-926 (1985)
- 4) 村上, 浅井: “画像信号のベクトル量子化器”, テレビ誌, **38**, 5, pp.452-457 (1984)
- 5) 山田, 田崎: “画像信号のベクトル量子化についての基礎的考察”, 信学技報, IT82-21 (1982)
- 6) 村上: “ベクトル量子化による画像高能率符号化”, 信学技報, IT85-61 (1985)
- 7) 村上, 浅井, 伊藤: “カラー画像のベクトル量子化手法”, テレビ誌, **39**, 10, pp.926-933 (1985)

- 8) R.M.Gray : "Vector Quantization", IEEE ASSP Magazine, 1, 2, pp.4-28 (1984)
- 9) B.Ramamurthi,A.Gersho : "Classified Vector Quantization of Images", IEEE Trans. Communications, COM-34, 11, pp.1105-1115 (1986)
- 10) A.Buzo,A.H.Gray,Jr.,R.M.Gray,J.D.Markel:"Speech Coding Based upon Vector Quantization", IEEE Trans. Acoust. Speech,and Signal Process., ASSP-28, 5, pp.562-574 (1980)
- 11) Y.Linde,A.Buzo,and R.M.Gray : "An algorithm for vector quantizer design", IEEE Trans.Comm., COM-28, 1, pp.84-95 (1980)
- 12) 謝, 佐藤: "角度変換ベクトル量子化", 平 8 信学情報・システムソサイエティ全大, D-182 (1996)
- 13) 朝, 佐藤, 謝: "角度変換ベクトル量子化の改善", 平 9 信学総全大, D-11-80 (1997)
- 14) 朝, 佐藤, 謝: "角度変換ベクトル量子化の SNR についての検討", 1998 年映情学年次大, 21-9 (1998)
- 15) 朝, 佐藤: "単板カラー CCD の色フィルタアレイを考慮した角度変換ベクトル量子化によるカラー画像形成の検討", 平 10 信学情報・システムソサイエティ全大, D-11-54 (1998)

あさ ひろ
朝 康博 1998 年, 東京都立科学技術大学工学部電子システム工学科卒業。現在, 同大学大学院工学研究科修士課程電子情報系システム工学専攻在籍中。画像圧縮の研究に従事。学生会員。

さとう ひろ
佐藤 和弘 1964 年, 早稲田大学第一理工学部卒業。日本コロムビア (株) から, 1972 年, (株) 日立製作所中央研究所に転じ, 日立マイコンシステムを経て, 1995 年より東京都立科学技術大学電子システム工学科教授。撮像方式, 固定撮像素子, 画像圧縮の研究に従事。工学博士。正会員。