

■2群 (画像・音・言語) -5編 (画像符号化)

6章 量子化

(執筆著：境田慎一) [2009年11月 受領]

■概要■

デジタル画像処理では、連続的なレベルのアナログ信号である光の信号は A/D 変換により離散的な値のデジタル信号に変換されて扱われる。アナログ入力信号を振幅方向に離散化すること、あるいは既にデジタル化した信号を異なる精度のデジタル信号へ置き換えることを量子化と呼ぶ。量子化によってデジタル信号にすることで信号は扱いやすくなるが、本来はアナログの連続量である信号を離散化するため、どんなに長い桁数を用いたとしても量子化にともない必ず丸めの誤差が生じる。画像信号において、この誤差はひずみとして知覚される場合がある。画像符号化では、量子化処理によって画像データを圧縮するが、量子化処理によって生じるひずみをできるだけ小さくすることが求められる。

量子化によって生じる誤差を解析するには、入力信号の性質に基づいて統計的に誤差を取り扱う必要がある。入力信号の統計的性質が既知の場合には、量子化誤差を最小化する最適量子化器が設計できる。しかしながら画像信号の統計的性質は一般に未知である。そのため実際の画像符号化における量子化では最適量子化が利用されることは少なく、エントロピー符号化との組み合わせで量子化誤差を抑えつつ圧縮を行う。量子化には、信号をスカラー値として扱うスカラー量子化と、ベクトルとして複数の信号を扱うベクトル量子化があり、両者とも画像符号化に適用されている。また、画像符号化においては、人間の視覚特性を考慮した量子化を行うことが特に重要である。

【本章の構成】

本章では、スカラー量子化 (6-1 節)、ベクトル量子化 (6-2 節)、視覚特性と量子化 (6-3 節) について述べる。

■2群 - 5編 - 6章

6-1 スカラー量子化

(執筆者：境田慎一) [2009年11月 受領]

6-1-1 量子化と量子化誤差

量子化処理により、連続的な振幅レベルの標本値は、必要な精度に丸められ、飛び飛びの離散値（量子化レベルあるいは量子化代表値という）に置き換えられる¹⁾。入力標本値をより少ない数の量子化代表値に置き換えて、量子化インデックスと呼ぶ識別番号にすることで、データ量の圧縮が可能となる。逆量子化の処理では、複数の量子化代表値の中から、量子化インデックスに該当する値を出力する。

標本ごとの量子化はスカラー量子化と呼ばれる。図 6・1 に示すように、入力標本値 x 、量子化閾値 x_i ($x_0 < x_1 < \dots < x_{N-1}$)、量子化により出力される量子化代表値を y_i とし、量子化レベル数 N は有限とすると、スカラー量子化 $Q(\cdot)$ によって、

$$\min_i |x - y_i| \quad (6 \cdot 1)$$

を満たす量子化インデックス i ($i = Q(x)$) が出力される。一方、逆量子化は i を入力として y_i を出力する ($y_i = Q^{-1}(i)$)。量子化の丸めにより $y_i \neq x$ となる場合、量子化の入力と逆量子化の出力には誤差 $e = x - Q^{-1}(Q(x))$ が生じる。これを量子化誤差または量子化雑音と呼ぶ。

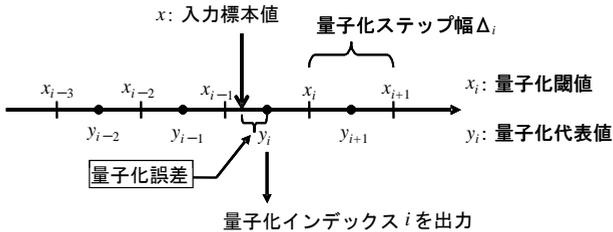


図 6・1 スカラー量子化と量子化誤差

量子化代表値 y_i に対応する入力 x の区間を $[x_{i-1}, x_i]$ とするとき、 $\Delta_i = x_i - x_{i-1}$ を量子化ステップ幅と呼ぶ。量子化ステップ幅が i によらず一様なものを線形量子化、一様でないものを非線形量子化と呼ぶ。また、図 6・2 に示すように、入力 $x = 0$ がある量子化代表値 y_i に対応しているものをミッドトレッド型、図 6・3 のように量子化代表値の境界に位置するものをミッドライザ型と呼ぶ。更に、微小レベルの雑音成分を抑圧するため、図 6・4 に示すように、ゼロ近傍の値をゼロに丸め込む範囲を広く設けるものをデッドゾーン付の量子化と呼ぶ。

入出力間の量子化誤差の 2 乗平均は、

$$E[e^2] = \sum_{i=1}^N \int_{x_{i-1}}^{x_i} (x - y_i)^2 p(x) dx \quad (6 \cdot 2)$$

で与えられる。ここで、 $p(x)$ は入力標本値に対する確率密度関数である。線形量子化でレベル数 N が十分大きく、量子化ステップ幅 Δ の範囲で信号分布が一様で誤差の平均値がゼロと見なせる場合、量子化誤差の 2 乗平均は次のとおりとなる。

$$E[e^2] = \int_{-\Delta}^{\Delta} (x^2 \frac{1}{\Delta}) dx = \frac{1}{12} \Delta^2 \quad (6 \cdot 3)$$

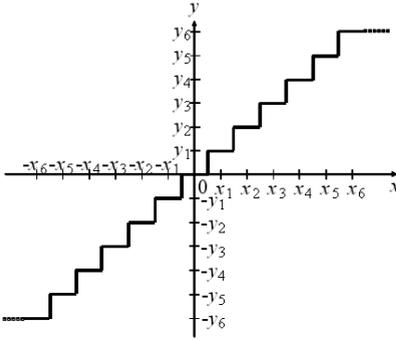


図 6・2 ミッドトレッド型量子化

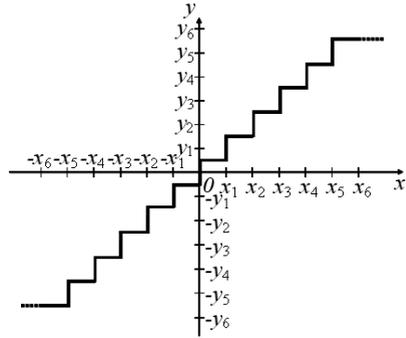


図 6・3 ミッドライザ型量子化

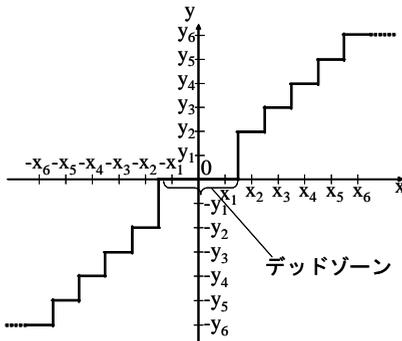


図 6・4 デッドゾーン付量子化

6-1-2 最適量子化 (Max 量子化器)

レベル数 N が与えられたとき、量子化誤差の 2 乗平均が最小となる量子化器を最適量子化器と呼ぶ。最適量子化器の量子化閾値 x_i 及び量子化代表値 y_i は、式(6.2)を x_i 及び y_i で微分しゼロと置き、これを解くことで得られる。

$$x_i = \frac{y_i + y_{i+1}}{2}, \quad i = 1, 2, \dots, N-1 \quad (6 \cdot 4)$$

$$y_i = \frac{\int_{x_{i-1}}^{x_i} xp(x)dx}{\int_{x_{i-1}}^{x_i} p(x)dx}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6 \cdot 5)$$

すなわち、最適量子化器では、量子化閾値 x_i は量子化代表値間の中央に位置し、各々の量

量子化代表値 y_i は、量子化閾値間の重心位置になる。

任意の確率密度分布の標本に対して、式(6・4)、(6・5)を用いて x_i 及び y_i を数値計算などにより繰り返し求める手順で量子化閾値と量子化代表値を設計した最適量子化器を Max 量子化器あるいは Lloyd-Max 量子化器と呼ぶ。

■参考文献

- 1) 映像情報メディア学会(編), 原島博(監修), “画像情報圧縮,” pp.57-59, オーム社, 1991.

■2 群 - 5 編 - 6 章

6-2 ベクトル量子化

(執筆著：井口和久) [2009 年 11 月 受領]

6-2-1 ベクトル量子化

入力標本値をそれぞれ独立に量子化するスカラー量子化に対し、ベクトル量子化では複数の入力標本値をまとめて量子化する^{1),2)}。

K 次元入力ベクトルを $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_K)^T$ 、入力ベクトルの存在する K 次元信号空間を \mathbf{R}^K とする。 \mathbf{R}^K を隙間なく重なりなく N 分割する分割を $\mathbf{P} = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}$ とする。入力ベクトル \vec{x} が分割 P_i に含まれるとき、ベクトル量子化の出力はインデックス i となる ($Q(\vec{x}) = i$)。量子化代表ベクトルを $\{\vec{y}_1, \vec{y}_2, \dots, \vec{y}_N\}$ 、 $\vec{y}_i \in P_i$ とすると、ベクトル逆量子化の出力はインデックスに対応した量子化代表ベクトルとなる ($Q^{-1}(i) = \vec{y}_i$)。量子化代表ベクトルの集合 $\mathbf{C} = \{\vec{y}_1, \vec{y}_2, \dots, \vec{y}_N\}$ はコードブックと呼ばれる。

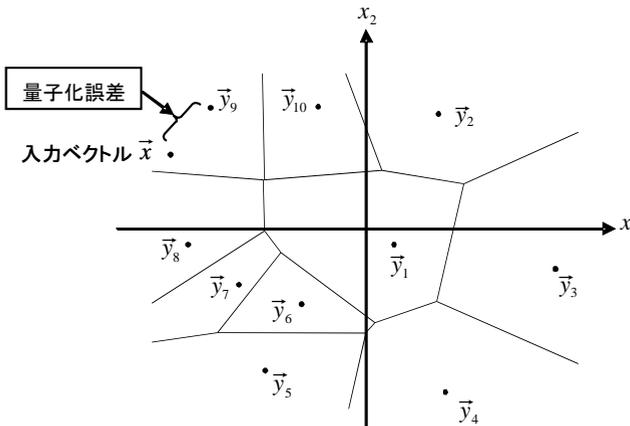


図 6・5 2 次元 10 レベルベクトル量子化と量子化誤差

2 次元 10 レベルのベクトル量子化の例を図 6・5 に示す。この例では \vec{x} が分割 P_9 に含まれており、ベクトル量子化の出力はインデックス 9 となる。これをベクトル逆量子化すると、量子化代表ベクトル \vec{y}_9 が出力される。量子化前後のベクトルの差が量子化誤差 $d(\vec{x}, \vec{y}_i)$ である。ベクトル量子化器の性能は量子化誤差の平均値で評価される。量子化誤差の測度としてはベクトル間のユークリッド距離の二乗 ($\sum_{j=1}^K (x_j - y_{ij})^2$) などが用いられる。

6-2-2 最適ベクトル量子化器

ベクトル量子化器は、コードブックと分割により設計される。入力ベクトル系列に対する量子化誤差の平均を最小とする最適ベクトル量子化器の条件を以下に示す。

最近傍条件：各分割は $P_i = \{ \vec{x} | d(\vec{x}, \vec{y}_i) \leq d(\vec{x}, \vec{y}_j), \text{ for all } j \neq i \}$ を満たす。

重心条件: 各出力代表ベクトルは, 対応する分割の重心 ($\vec{y}_i = E[\vec{x} | \vec{x} \in P_i]$) である.

ゼロ確率境界条件: 複数の量子化代表ベクトルと等距離にある入力ベクトルが存在しない.

6-2-3 LBG アルゴリズム

レベル数の増加にともない最適ベクトル量子化器の設計は困難となる. ここでは良好なベクトル量子化器の設計法として知られる LBG アルゴリズム³⁾を 図 6.6 に示す.

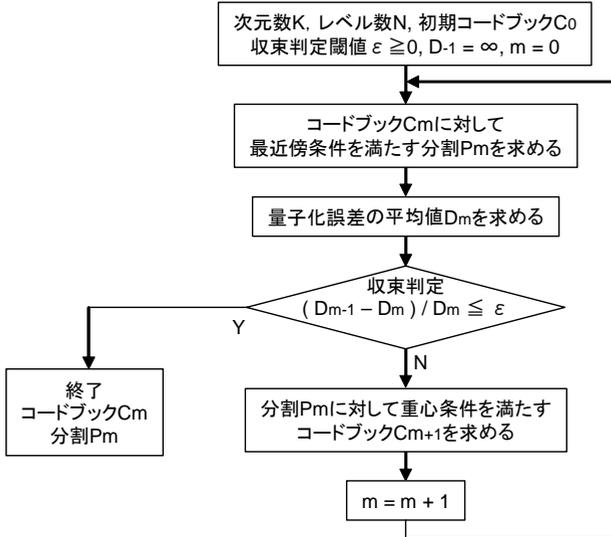


図 6.6 LBG アルゴリズム

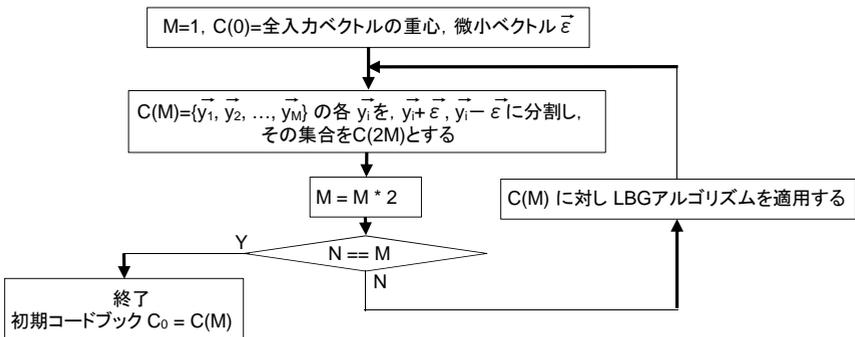


図 6.7 スプリッティングアルゴリズム

LBG アルゴリズムの性能は初期コードブックに依存する. レベル数 N が 2 のべき乗のとき, 初期コードブックの作成に利用可能なスプリッティングアルゴリズムを 図 6.7 に示す.

■参考文献

- 1) A. Gersho, R.M. Gray(著), 古井貞熙, 田崎三郎, 小寺 博, 渡辺 浩(訳), “ベクトル量子化と情報圧縮,” コロナ社, 1998.
- 2) 斎藤隆弘, 原島 博, “ベクトル量子化とその画像符号化への応用,” 信学技報, IE-87-48, pp.47-54, 1987.
- 3) Y. Linde, A. Buzo, and R. Gray, “An Algorithm for Vector Quantizer Design,” IEEE Trans. COM-28, pp.84-95, 1980.

■2群 - 5編 - 6章

6-3 視覚特性と量子化

(執筆：市ヶ谷敦郎) [2009年11月受領]

量子化は不可逆な処理であり、情報量を大幅に減らすことができる一方で、量子化処理が施された信号は元の信号に戻すことはできない。量子化処理を含む映像符号化では、このような量子化による信号劣化が人間の視覚によって知覚されない範囲内に収まるように量子化ステップ幅を制御している。映像品質に関係する視覚特性には多くの性質が知られており、それらの特性を踏まえ、信号劣化が認識されにくいように量子化器を設計している。それらの視覚特性のうち、最も量子化と関係の深いものは、静止画及び動画に対する周波数応答特性であり、ここではその特性と量子化特性の関係を説明する。

図6・8に空間周波数特性の一例を示す。輝度と二つの色信号ではそれぞれの感度特性に差があるが、共通の傾向として空間周波数が高くなるに従って感度が低下する¹⁾。このような視覚の空間周波数応答を利用して、画像符号化ではDCTなどの直交変換によって、映像信号を周波数成分に変換し、視覚感度の低い高周波成分を粗く量子化する。図6・9にMPEG-2で用いられている量子化マトリクス²⁾の例を示す。視覚感度の高い低周波成分は量子化を細かく、感度の低い高周波成分を粗く量子化することによって劣化が認知しにくいように情報量の削減が行われる。

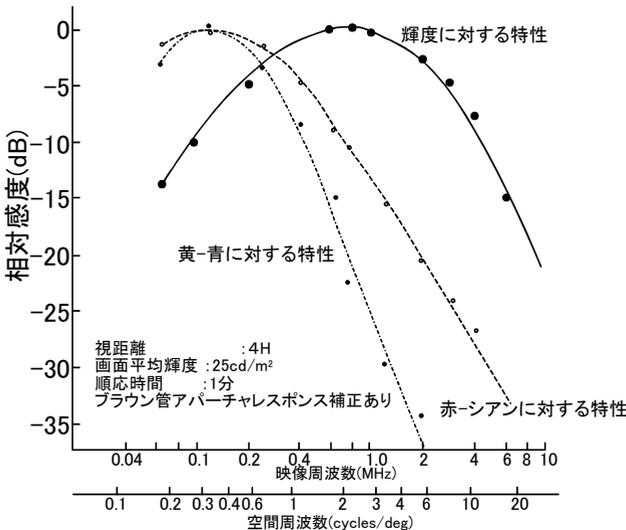


図6・8 輝度及び色差信号に対する空間周波数特性の一例

また、画面を小領域に分割して直交変換・量子化を行うブロック符号化では、ブロック内に高周波成分が多く含まれるエッジ部やテクスチャ部において粗い量子化が行われる。一方、高周波成分があまり含まれない平坦部において細かい量子化が行われるよう制御する。これらの視覚特性を考慮した量子化制御により、高品質・高圧縮な符号化が実現されている。

	低 水平周波数 高							
	→							
低 垂 直 周 波 数 高	8	16	19	22	26	27	29	34
	16	16	22	24	27	29	34	37
	19	22	26	27	29	34	34	38
	22	22	26	27	29	34	37	40
	22	26	27	29	32	35	40	48
	26	27	29	32	35	40	48	58
	26	27	29	34	38	46	56	69
	27	29	35	38	46	56	69	83
		↓						

図 6・9 DCT 係数に対する量子化マトリクス例. 数値
が大きいと粗い量子化小さいと細かい量子化

■参考文献

- 1) 坂田晴夫, 磯野春雄, “視覚の色度空間周波数特性 (その 1),” 視覚情報研究会資料 No2-1, 1973.
- 2) ISO/IEC 13818-2 Generic coding of moving pictures and associated audio information: Video.