

ストリームを用いた NR 型 PSNR 推定方法

市ヶ谷 敦郎 原 直弘 黒住 正顕 西田 幸博 大塚 吉道

NHK 放送技術研究所 〒157-8510 東京都世田谷区砧 1-10-11

E-mail: ichigaya.a-go@nhk.or.jp

あらまし 符号化劣化を測定する方法として、エンコーダへの入力画像を基準としたデコード画像の符号化誤差を示す PSNR(Peak Signal to Noise Ratio)がある。しかし、PSNR を測定するためには基準画像を必要とするため、映像伝送における受信端で PSNR を測定することはきわめて困難である。

本稿では、基準画像を必要としない Non Reference 型の PSNR 推定方法を提案する。本方式は MPEG-2 ビットストリームより DCT 係数情報を抽出し、その振幅値の確率密度分布を解析して量子化前の DCT 係数分布を推定し、DCT 領域で PSNR を推定する。また、粗い量子化が行われ分布の特徴量が失われた場合における推定精度の改善方法を検討し、有効性を確認した。

キーワード MPEG-2, 画質監視, NR 型, ビットストリーム, DCT 係数, PSNR

A non-reference-type PSNR estimation method using MPEG-2 bitstream

Atsuro ICHIGAYA, Naohiro HARA, Masaaki KUROZUMI, Yukihiko NISHIDA
and Yoshimichi OTSUKA

NHK Science and Technical Research Laboratories, 1-10-11 Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo, 157-8510 Japan

E-mail: ichigaya.a-go@nhk.or.jp

Abstract The PSNR is commonly used as a measure of the picture degradation of digitally coded video. However, since a PSNR calculation requires source signals as a reference, the usage of PSNR is restricted to particular situations.

This paper describes a new method for estimating PSNR without reference signals. The estimation is conducted based on the probability density distribution of quantized DCT coefficients in an MPEG-2 bitstream. A probability density distribution of the original DCT coefficients is estimated by this method, and the quantization error is calculated in DCT domain. We have also studied an improvement method for the case of coarse quantization. Experimental results show that the proposed method can estimate the coding PSNR with good accuracy.

Keyword MPEG-2, video-quality monitoring, non-reference-type, bit-stream, DCT coefficients, PSNR

1. はじめに

映像伝送システムへのデジタル圧縮符号化の導入により、符号化特有の画質劣化が問題となっている。デジタル圧縮符号化した映像では、入力映像の性質により符号化画質が変動する。このような劣化は、回線品質に関係なく、空間及び時間において局所的に発生する傾向があり、従来の回線監視技術では画質の管理が行えなくなった。また、デジタル化により、保有メディア数も増加し、監視素材数も増加している。このような背景からデジタル映像システム用の自動画質モニタ技術の開発が望まれている。

符号化劣化を表す尺度として、原画像と復号画像の画素差分の平均二乗誤差を用いた PSNR が広く用いられている。PSNR は信号の誤差量を示す尺度であるが、主観評価値とも高い相関があることが報告されている[1]。しかし、PSNR を測定するためには原画像を必要とし、受信端では測定できないため、利用できる環境は限られる。また、実用上、原画像と復号画像の時空

間的な位相合わせの問題もある。

本稿では、基準画像を用いることが出来ない環境における NR (Non Reference) 型の画質測定方法として、MPEG-2 映像ビットストリームの DCT 係数情報から高精度に PSNR を推定する方法を検討し、その有効性を確認したので報告する。

2. ビットストリームからの PSNR 推定方法[2]

2.1. 直交変換領域での誤差電力

一般に、PSNR は符号化前後の画素の平均二乗誤差 (MSE: Mean Square Error) を用いて算出される。MPEG-2 映像符号化方式における劣化は DCT の量子化処理を主因として発生する。DCT は正規直交変換であるため、Parseval の定理により画素領域の誤差電力は DCT 領域における量子化誤差電力と等価である。すなわち DCT 領域において量子化前後の DCT 係数の平均二乗量子化誤差 MSQE (Mean Square Quantization Error) は画素領域における MSE と等価である。つまり、PSNR と MSE 及び MSQE は(1)式によって表す事ができる。

$$PSNR = -10 \log(MSE / 255^2) \quad (1)$$

$$= -10 \log(MSQE / 255^2)$$

$$MSQE = \int (X - X')^2 p(X) dX$$

ただし X は DCT 係数, X' は逆量子化後の DCT 係数, $p(X)$ は X の確率密度関数である

2.2. 量子化処理

DCT 係数の逆量子化処理は(2)式で表され, イントラマクロブロックとノンイントラマクロブロックでは異なる処理が行われる.

$$F''[v][u] = (2 \times QF[v][u] + a) \times \frac{Qmatrix[v][u] \times quantiser_scale}{32} \quad (2)$$

$$ただし a = \begin{cases} 0 & INTRA \\ Sign(QF[v][u]) & NON INTRA \end{cases}$$

イントラマクロブロックでは, DCT 係数は一様量子化される. 一方, ノンイントラマクロブロックでは動領域に対するノイズリダクションフィルタの効果を得るため, ミッドトレッド形の量子化が行われる. これにより振幅値 0 の値の周りにデッドゾーンを持ち, ノンイントラマクロブロックの係数値は積極的に 0 に丸められる.

$Qmatrix$ はエンコーダによってイントラ, ノンイントラマクロブロック用にそれぞれ任意の値を設定でき, フレーム内で同一のマトリックスが使用される. そして, $quantiser_scale$ によって個々のマクロブロックの量子化が制御される.

ただし, 量子化処理において, k 番目の量子化値 x'_k に変換される DCT 係数値の範囲 $[\alpha_k, \beta_k]$ はエンコーダの設計に委ねられている.

2.3. DCT 係数確率密度分布の性質

一般に, 適切に設計された予測器を使用した符号化器であれば, 映像信号の DCT 係数の発生頻度はイントラ符号化による DCT 係数, 及びノンイントラ符号化における予測誤差画像の DCT 係数は, ともに Laplace 分布で近似される事が報告されている[3]. (3)式に示すように Laplace 分布の確率密度関数は, 分布の標準偏差 σ をパラメータとする関数である.

$$p(X) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma} \exp\left(\frac{-\sqrt{2}|X|}{\sigma}\right) \quad (3)$$

ビットストリームより抽出される量子化された DCT 係数は次のような性質を持つ. イントラマクロブロックにおける量子化は一様量子化であるので, (u, v) 成分の DCT 係数は量子化ステップ q によって量子化すると, その係数値は間隔 q の量子化値に丸められる. このように量子化された DCT 係数の確率密度分布は等間隔のくし型状の分布を示す(図 1). 量子化ステップ q が分布の広がりによって充分細かければ分布の標準偏差は量子化前後ではほぼ一致する(図 2, A). また, q が分布の広がりによって大きい場合, 量子化前後の分布の標準偏差にばらつきが生じる(図 2, B).

一方, ノンイントラマクロブロックの DCT 係数値は

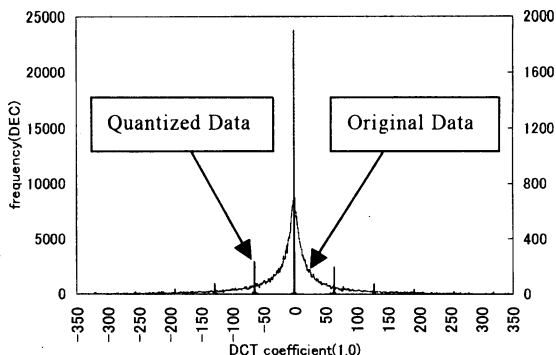


図 1 量子化による DCT 係数分布の変化

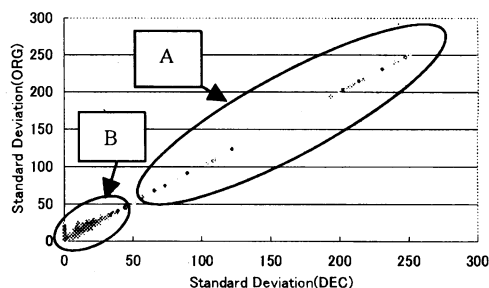


図 2 量子化前後の確率密度分布の標準偏差
Intra Macro Block (HDTV 18Mbps)

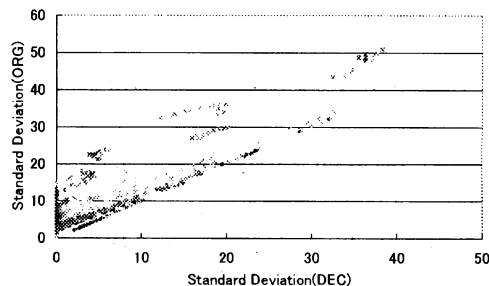


図 3 量子化前後の確率密度分布の標準偏差
Non Intra Macro Block (HDTV 18Mbps)

動き補償予測により, イントラマクロブロックに比べ 0 近傍に集中する. 更に, ミッドトレッド形の量子化により, 0 近傍にデッドゾーンを持つため, 分布の広がりに比べて量子化ステップが大きくなる傾向が強く, 量子化前後の分布の標準偏差のばらつきが大きくなる(図 3).

2.4. PSNR 推定の基本原理

前述した DCT 領域における原信号の性質, 及び量子化前後における DCT 係数の確率密度分布の特徴を利用し, 次のように PSNR を推定する.

1. ストリームより DCT 係数を抽出
2. 量子化ステップごとに DCT 係数各成分の確率密度分布の標準偏差 σ を測定
3. 確率密度分布の標準偏差 σ より(3)式を用いて原信号の分布 $p(x)$ を推定
4. 推定した原信号の分布 $p(x)$ より, 各 DCT 係数 (i, j)

成分の量子化誤差 $MSQE_{i,j}$ を計算

$$MSQE_{i,j} = \sum_{qscale_code=1}^{32} \sum_k \int_{x'-q/2}^{x'+q/2} p(x)(x-x')dx$$

ただし x' は k 番目の量子化区間の量子化代表値

5. PSNR の計算

$$PSNR = -10 \log \left(\frac{1}{64} \sum_i \sum_j MSQE_{i,j} \right)$$

MPEG-2 映像符号化方式において、量子化代表値に対しどのような量子化区間を用いるかの規定はない。MPEG-2 TM5[4]では k が正の場合、量子化代表値 kq に量子化される振幅の範囲は、イントラマクロブロックでは $[kq-0.25q, kq+0.75q]$ 、ノンイントラマクロブロックでは $[kq-0.5q, kq+0.4q]$ である。しかし、これらは受信端においては未知であるため、今回の検討ではイントラ、ノンイントラマクロブロックともに $[kq-0.5q, kq+0.4q]$ として推定を行った。

2.5. 計算機シミュレーション

(1) シミュレーション条件

MPEG-2 TM5 により以下の条件で HDTV を符号化したビットストリームを用い、フレームごとに PSNR の推定を行った。一次分配品質、二次分配品質を想定し、60Mbps、18Mbps の 2 種類のビットレートで実験を行った。

符号化条件

- ・ビットレート：60Mbps、18Mbps
- ・GOP 構造：M=3, N=15
- ・量子化マトリックス：default
- ・qscale_type：非線形
- ・素材：ITE ハイビジョン標準動画像(各 5 秒)
Bronze with credits, Cognac and fruit, European market, Streetcar, Church, Whale show, Opening ceremony, Green leaves, Japanese room, Crowded crosswalk, Ice hockey, Weather report, Sprinkling

(2) 実験結果

I, P, B ピクチャそれぞれのピクチャタイプにおいて基準画像を用いて実測した PSNR 値に対する推定 PSNR 値を図 4, 5 に、推定精度を回帰直線に対する R^2 値で表 1 にそれぞれ示す。

表 1 推定精度

picture_type	I-picture	P-picture	B-picture	ALL
$R^2(60Mbps)$	0.98	0.99	0.98	0.98
$R^2(18Mbps)$	0.97	0.97	0.89	0.91

60Mbps では全てのピクチャタイプにおいて良好な結果が得られた(図 4)。しかし、第 1 GOP の最初の B ピクチャにおいて誤差が多く発生している。これは、当該フレームの参照フレームである第 1 GOP の I ピクチャの画質が良好であり、予測誤差画像の差分情報が極端に少なくなっているためである。予測誤差画像の分布に対し量子化ステップが相対的に大きくなり、推定誤差が大きくなったと考えられる。特に Weather report のような静止画に近い映像において最大誤差 3dB を生じた。ただし、このような画像では、充分高品質 (40dB 以上) であるため、この程度の誤差は問題

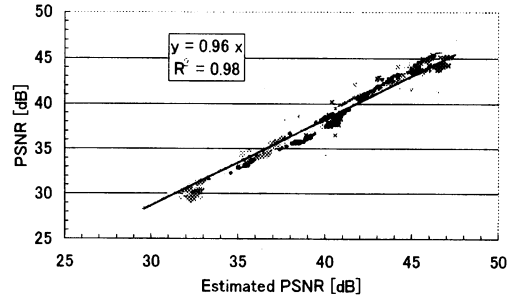


図 4 PSNR 推定結果(推定値対実測値) 60Mbps

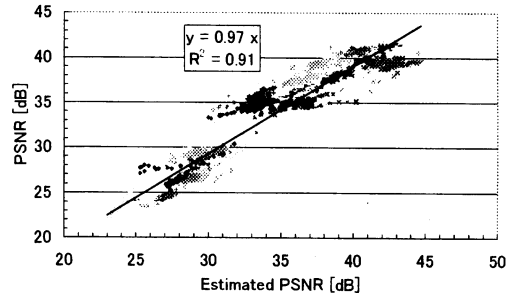


図 5 PSNR 推定結果(推定値対実測値) 18Mbps

とはならない。

18Mbps は 60Mbps に比較して DCT 係数の情報量が少ないため推定精度が低下しているが全般的に良好に推定が行えている(図 5)。しかし、B ピクチャの推定精度が I, P ピクチャと比較して悪い。B ピクチャはノンイントラマクロブロックの比率が高く、また、参照フレームとして用いられないため、一般的に I, P ピクチャに比べ割り当て符号量が少なく、粗い量子化が行われている。前述したように分布に対し相対的に量子化ステップが大きい状況が発生しているため推定精度が低下したと考えられる。

3. 推定精度の改善

3.1. 標準偏差の一致しない分布形状の推定改善

量子化ステップに比べて原画像の DCT 係数確率密度分布の標準偏差が小さい場合、量子化後の DCT 係数は値 0 の発生確率が極端に増加し、確率密度分布の標準偏差は小さくなる傾向を示す。このような傾向は、イントラマクロブロックの高域成分や、量子化処理におけるデッドゾーンの原因によりノンイントラマクロブロックで顕著に現われる。このように標準偏差が量子化前後で大きく異なる場合、Laplace 分布関数は指数関数であるため、振幅値の大きい領域の確率分布の形状推定を適切に行えず、推定 PSNR は実測値に比較して高くなる(量子化誤差を少なく推定する)。

そこで、分布の裾野の形状を補償するために、係数値 0 以外の係数値の発生確率を用いて、確率密度分布 $p'(x)$ を Laplace 分布関数で推定する。これにより、係数値 0 の発生確率の影響を排除し、本来の分布の裾野の形状に近い分布を推定できる。そして、 $p(x)$ と $p'(x)$ の各確率密度分布の平均を原信号の分布の推定結果とする。推定 PSNR 値の精度が悪かった Opening ceremony 18Mbps の場合のイントラマクロブロック(6.1)成分に

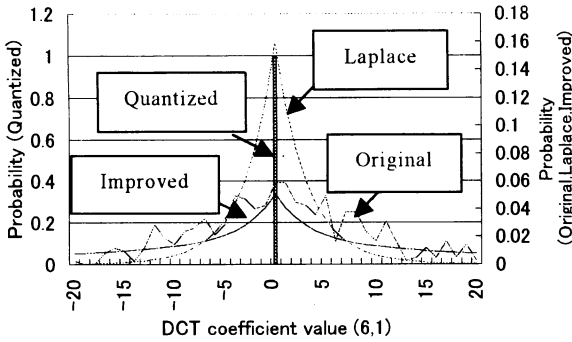


図 6 DCT 確率密度分布(6,1)成分 原画像、Laplace 分布による推定、改善方式による推定、ストリーム出力 Opening Ceremony

おける分布の推定結果を図 6 に示す。係数値 0 を含めて推定した場合に比べて分布の裾野の形状を精度良く推定できていることがわかる。

PSNR の推定手順を次に示す。

1. §2.4 のステップ 1, 2 と同様に DCT 係数各成分の確率密度分布の標準偏差 σ を測定
2. 係数値 0 を除く係数値の確率密度分布の標準偏差 σ' を測定

$$\sigma' = \frac{\sum f(x) \times (x - (0.5 + b) \times q \times \text{Sign}(x))^2}{N}$$

ただし $x \leq -(0.5 + b) \times q$, $x \geq (0.5 + b) \times q$

$$b = \begin{cases} 0 & \text{INTRA} \\ 1 & \text{NON INTRA} \end{cases}$$

$f(x)$ はストリームより抽出された DCT 係数値 x の発生確率

3. 標準偏差 σ を用いて §2.4 同様 Laplace 分布関数 $p(x)$ を決定。
4. 標準偏差 σ' を用いて下式により Laplace 分布関数 $p'(x)$ を決定

$$p'(x) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma'} \exp\left(-\frac{\sqrt{2}}{\sigma'} |x + (0.5 + b) \times q \times \text{Sign}(x)|\right)$$

5. $p(x)$ 及び $p'(x)$ の平均を原信号の分布の推定値とする
6. §2.4 のステップ 4, 5 と同様に PSNR の計算

3.2. 実験結果

§2.5 と同一のストリームを用いて実験を行った。実測した PSNR 値に対する推定 PSNR 値を図 7, 8 に、回帰直線に対する R^2 値を表 2 にそれぞれ示す。

表 2 推定精度

picture_type	I-picture	P-picture	B-picture	ALL
$R^2(60\text{Mbps})$	0.99	0.99	0.99	0.99
$R^2(18\text{Mbps})$	0.99	0.97	0.93	0.93

60Mbps, 18Mbps ともに、特に B ピクチャにおいて

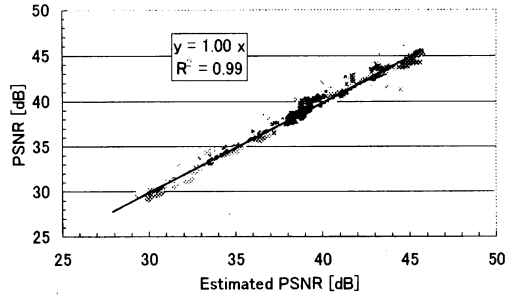


図 7 改善方式の PSNR 推定結果 (推定値対実測値) 60Mbps

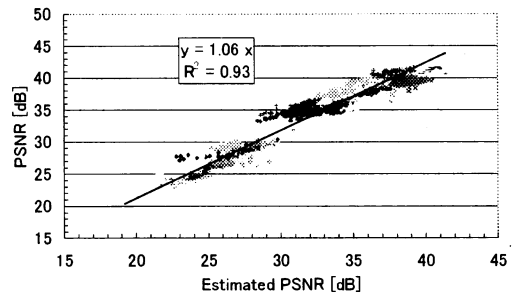


図 8 改善方式の PSNR 推定結果 (推定値対実測値) 18Mbps

R^2 値が向上し改善効果が示された。60Mbps の場合の第 1 GOP の B ピクチャも改善したが、Weather report は改善効果が少なかった。P ピクチャにおいても改善方式により回帰直線の傾きがほぼ 1 となり、より正確な推定が行えるようになった。

4. まとめ

映像符号化ビットストリームより抽出した DCT 係数の確率密度分布を用いた NR 型 PSNR 推定方法を提案した。本方式によって、原画像の情報を用いずに高い精度で PSNR を推定する事が出来た。

本方式は、DCT 係数の成分ごとに量子化誤差を計測することができ、空間周波数成分における視覚感度で重み付けをした WSNR (Weighted SNR) の測定も容易である。

本方式と、シンタックスチェックによるビット誤り検出を併用することにより、デジタル映像配信の自動監視システムを構築することが可能である。

文 献

- [1] ITU-T COM9-80-E Q11/12(VQEG), "Final report from the Video Quality Expert Group on validation of objective models of video quality assessment", June 2000
- [2] 市ヶ谷他, "DCT 係数確率密度分布を用いた符号化 PSNR 推定手法の検討", FIT2002, J-77, pp355-356, Sept 2002
- [3] E.Y.Lam and J.W.Goodman, "A mathematical analysis of the DCT coefficient distributions for images", IEEE Trans. Image Processing, Vol.9, No.10, pp95-100, Jan. 2000
- [4] The MPEG Software Simulation Group (MSSG), Software for MPEG-2 coding and decoding