

WHT を用いた不可視マーカ埋め込みによる画質評価方式

杉本 修 川田 亮一 和田 正裕 松本 修一

株式会社 KDDI 研究所 画像通信グループ

〒356-8502 埼玉県上福岡市大原 2-1-15

TEL:0492-78-7416 FAX:0492-78-7439

sugimoto@kddilabs.jp

リファレンス画像を用いない符号化画像の自動画質評価方式の一方式として、不可視マーカ埋め込み・検出による画質評価方式を提案する。筆者らはこれまでに、スペクトル拡散された原画像のフーリエ変換係数を操作することで不可視マーカを埋め込み、これを復号画像から検出することで復号画像の PSNR を推定する方式を提案してきた。しかし、同方式では、不可視マーカ埋め込みの過程でフーリエ変換が必要となるため、計算精度の面で要求が高く、実装面に課題を有していた。そこで、本稿では実装面で重要となる演算量の低減のために、フーリエ変換と同様の直交変換であるウォルシュアダマール変換(WHT)を用いた不可視マーカ埋め込み方式について検討する。WHT の基本演算は加減算のみで構成され、さらに高速アルゴリズムも存在するため、演算量をフーリエ変換に比べて大きく軽減できる。計算機シミュレーションにより、フーリエ変換を用いた従来方式とほぼ同等の PSNR 推定精度が得られること、およびマーカによる画質劣化が無視できるほど小さいということが確認された。

キーワード: 自動画質評価, PSNR 推定, 不可視マーカ, ウォルシュアダマール変換, スペクトル拡散

Proposal of a picture quality measurement method by use of embedded invisible marker signals using Walsh-Hadamard Transform

Osamu Sugimoto Ryoichi Kawada Masahiro Wada Shuichi Matsumoto

KDDI R&D Laboratories Inc. Visual Communication Laboratory

2-1-15 Ohara, Kamifukuoka-City, Saitama, 356-8502 Japan

TEL: +81 492 78 7416 FAX: +81 492 78 7439

sugimoto@kddilabs.jp

As one of the automatic picture quality measurement methods, the authors propose an objective picture quality measurement method by embedding and detecting invisible marker signals. Previous study shows that highly accurate PSNR estimation is possible by use of invisible markers that is generated by manipulating Fourier Transform coefficients of spread original pictures. However, the method have a difficulty in implementation because Fourier Transform requires much complexity and computation accuracy.

The authors therefore propose a method of embedding and detecting the invisible markers by manipulating Walsh-Hadamard Transform (WHT) coefficients. Since WHT requires less complexity than Fourier Transform, required complexity to embed the markers can be greatly reduced and implementation will be easier than when using FFT. Computer simulations show that the proposed method can obtain almost the same estimation accuracy as the method using FFT and the degradation caused by the markers is negligible.

Keywords: automatic picture quality measurement, PSNR estimation, invisible marker, WHT, Spread Spectrum

1 はじめに

近年のデジタル映像伝送の急速な普及により、映像伝送の運用監視への負担は今後も増加すると予想される。特に、画質監視に関しては、これまで人間の主観により行われてきたため非常に負担が大きく、また、多チャンネル化により同時に伝送する映像が増えるにつれて監視要員の不足などの問題も挙げられている。そのため、符号化画像の画質を機械により自動的に評価する自動画質評価技術への要求が高まっている。自動画質評価技術は、原画をリファレンスとして用いるかどうかで大きく2種類に分類されるが、映像伝送への応用を考えると、映像の受信側では原画を得ることができないため、リファレンス画像を用いず復号画像の情報だけから画質を推定する技術が重要性を増している。

そこで筆者らは、復号画像のみから映像伝送中の劣化の客観評価値を推定する不可視マーカ信号を用いた画質評価方式を提案する。不可視マーカとは、電子透かしのように(0,1)の情報を持ち、視覚的に検知されないように画像中に埋め込まれた信号を意味する。本方式では、原画に埋め込まれた不可視マーカ信号を復号画像から検出し、マーカ誤検出率を求める。マーカ信号の劣化は符号化雑音により発生するので、マーカ誤検出率と符号化雑音(PSNR)の間には相関が存在する。よって、この相関を明らかにすれば、誤検出率から符号化劣化が推定可能となる。

本稿ではまず、提案方式による不可視マーカ埋め込み・検出方式を示す。次に、MPEG-2符号化を用いた場合のマーカ誤検出率と符号化劣化(MSE)の関係を理論モデルを用いてあらわす。最後に、計算機シミュレーションにより、理論モデルにより導かれた関係式に従ってPSNR推定を行った場合に高精度の画質推定が可能であることを示す。

2 従来技術の問題点と対策

筆者らはこれまで不可視マーカ挿入による画質評価方式として、スペクトル拡散された原画のフーリエ変換係数を操作することで不可視マーカを埋め込み、これを復号画像から検出することで精度の高い客観画質評価を可能とする方式を提案してきた[1]。

しかし、同方式では、不可視マーカ埋め込みの過程でフーリエ変換/逆変換が必要であった。フーリエ変換係数は複素数であるため、高い計算精度を必要とし、また、高速アルゴリズムであるFFTを用いたとしても通常放送に用いられる画像サイズ、フレーム数を処理するには負荷が大きいという問題が存在する。今後

HDTVなどの高精細な映像システムが普及することを考えると、演算量を極力抑えていくことは非常に重要な課題であると考えられる。

そこで、本稿ではフーリエ変換と同様の直交変換であるウォルシュアダマール変換(WHT)を用いた不可視マーカ埋め込み方式について検討する。WHTは、加減算と 2^n (n :自然数)に基づく除算から構成され、さらに高速アルゴリズムも存在するため、演算量をFFTに比べて大きく軽減できると考えられる。このため、WHTを用いた場合でも従来のフーリエ変換による方式と同じ精度での画質評価が可能であれば、実装面での利点は非常に大きい。そこで、次節以降でWHTによるマーカ埋め込み方式について詳細に議論する。

3 提案方式

3.1 提案方式の構成

提案方式の構成を図1に示す。図1は2地点間の映像伝送をあらわしており、送信側で不可視マーカの埋め込み、受信側では埋め込みマーカの検出およびPSNRの推定を行う。以下に送受信側それぞれの処理を示す。

送信側の処理 送信側ではまず、符号化の前段でスペクトル拡散を用いたデータハイディング[2]方式により不可視マーカを埋め込む。マーカ信号は、原画に対する雑音として存在するためマーカ埋め込みには劣化が半うことになるが、スペクトル拡散によりマーカ信号は原画の広い帯域に拡散されるため、その劣化は視覚的に検知できない範囲に抑えられる。

受信側の処理 次に、不可視マーカ埋め込み画像に対し圧縮符号化が行われ、受信側へと送られる。このとき、埋め込まれたマーカ信号は、符号化雑音により劣化を受けるため、受信側で復号した画像からマーカ信号を検出しようとしても一部は正しく検出できない。このため受信側では、どの程度の割合でマーカ信号が誤検出となったかをマーカ誤検出率として計算する。マーカ誤検出率

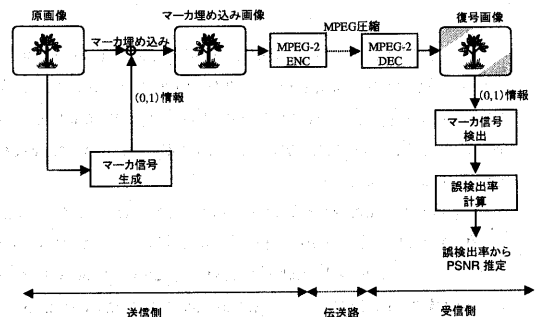


図1: 提案方式の構成

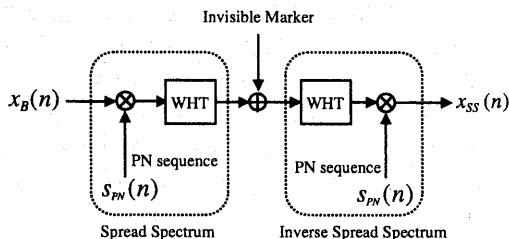


図 2: マーカ埋め込み処理

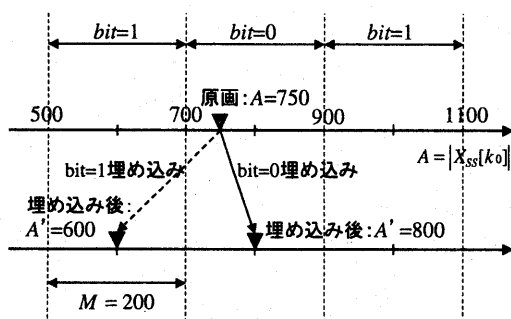


図 3: マーカ埋め込みによるシーケンシ成分の変化

は符号化雑音に応じて変化するため、両者には一定の相関があると考えられる。よって、あらかじめこの関係を求めておけば、あとは復号画像からマーカ誤検出率を求めるだけで符号化劣化を推定することが可能となる。

3.2 マーカ埋め込み方式

不可視マーカ信号は、受信側で符号化に先立って、以下に示すデータハイディング方式により 2 値情報として埋め込まれる。これは、マーカ信号ごとにそれぞれ (0, 1) いずれかの情報を持つことを意味する。ここで埋め込まれた情報は、送受信側で共有され、受信側で検出された情報と比較される。図 2 にマーカ埋め込み手順を示す。

<埋め込み手順>

1. マーカ埋め込みのための 2 値情報系列を生成する。
この 2 値情報は、受信側で検出されたマーカ 2 値情報と比較され、誤検出率の計算に用いられる。生成する系列は任意である。
2. 入力画像を任意のサイズの画素ブロック $x_B(n)$ に分割し、PN 系列を乗ずることでスペクトル拡散を施す。さらに、この拡散された入力信号に対し WHT を施すことにより、拡散領域でのアダマール変換係数 $X_{SS}[s]$ を得る。
3. $X_{SS}[s]$ のうちの一つのシーケンシ成分 s_0 に注目

し、 $A = X_{SS}[s_0]$ を操作して 2 値情報を埋め込む。具体的には、 A を任意のステップサイズ M で量子化した代表値のパリティが埋め込みビットに一致するように操作することにより、拡散スペクトルから 2 値情報を取り出せるようにする。手順 1. によって生成された埋め込みビット情報を $bit = \{0, 1\}$ とあらわすとき、 A の値に応じて以下の操作をおこなう。

(a) $\text{round}(A/M) = 2m, bit = 0$ のとき

$$A' = 2mM \quad (1)$$

(b) $\text{round}(A/M) = 2m, bit = 1$ のとき

$$A' = \begin{cases} (2m+1)M & \text{if } A > 2mM \\ (2m-1)M & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

(c) $\text{round}(A/M) = 2m+1, bit = 1$ のとき

$$A' = (2m+1)M \quad (3)$$

(d) $\text{round}(A/M) = 2m+1, bit = 0$ のとき

$$A' = \begin{cases} (2m+2)M & \text{if } A > (2m+1)M \\ 2mM & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

以上の計算により得られた A' がマーカ付加後のシーケンシ成分の値となる。よって、マーカ信号に相当する部分は、 $\Delta A = (A - A')$ である。

4. アダマール逆変換およびスペクトル逆拡散により空間域の信号に戻す。
5. 以上をフレーム内のすべてのマクロブロックに対して行う。

図 3 に $A = 750, M = 200$ の場合におけるシーケンシ成分 (A) の操作の例を示す。同図では、 $\text{round}(A/M) = 4$ となるため、マーカ埋め込み操作を行う前には $bit = 0$ の領域に A は存在していることになる。ここで、 $bit = 0$ を埋め込む場合、 A は $bit = 0$ 領域の中央となるように操作されるため、マーカ埋め込み後のシーケンシ成分は $A' = 800$ となる。

一方、 $bit = 1$ を埋め込む場合には、 A を隣接する $bit = 1$ 領域の中央に移動させる。この場合、 $A' = 600$ と $A' = 1000$ の 2 つの候補があるが、原画の劣化を最小限にする目的から、 $\Delta A = (A - A')$ の値が小さくなる $A' = 600$ の方を選択するようにする。

ここで、 ΔA と M の関係をみてみると、 ΔA の取りうる値の範囲は $-M < \Delta A \leq M$ となる。 ΔA はマー

$$\frac{1}{\sigma_e} = -\frac{\sqrt{2}\ln(\text{FDR})}{M} \quad (9)$$

を得る。 σ_e^2 はスペクトル拡散された画像信号のある一つのシーケンス成分の二乗平均を表しているため、MSE と相関が高いと考えられる。スペクトル拡散をかけない場合、画像信号は低域にエネルギーが集中しているため、一つのシーケンス成分の劣化の分散値から MSE を予測することは難しい。しかし、提案方式では、スペクトル拡散の効果により、各シーケンス成分の分散値はほぼ一様となるため、ある一つのシーケンス成分の劣化だけを測定することにより MSE を推定することができる。よって、MSE は σ_e を用いて以下のように近似できる。

$$\sigma_e^2 \simeq \text{MSE} \quad (10)$$

式 (9),(10) より、MSE と FDR の関係を求めると、

$$\frac{1}{\text{MSE}} \simeq 2 \left[\frac{\ln(\text{FDR})}{M} \right]^2 \quad (11)$$

となる。式 (11) は FDR による MSE の近似式として与えられるが、実際には、式 (7), (10) の近似が十分でない場合誤差が大きくなると考えられる。そこで、実際には式 (11) を用いるのではなく、あらかじめ複数のテスト画像において MSE (または PSNR) と $\ln(\text{FDR})$ との相関を求めておき、それを用いて PSNR を推定することとする。

4 計算機シミュレーション

本節では、実際に 6 種類のテスト画像に対して不可視マーカを埋め込み、これを MPEG-2 符号化した場合の PSNR-FDR 特性を求め、そこから PSNR の推定精度を測定する。また、あわせて、マーカ埋め込みによる原画の劣化および符号化効率への影響についても検討する。なお、PSNR 推定精度および原画の劣化については、比較のため、FFT によるマーカの埋め込み方式についても同様の測定をおこなう。

4.1 シミュレーション条件

シミュレーションに用いたテスト画像、符号化のビットレートなどの条件を表 1 に示す。本方式では、輝度成分、色差成分ともに画質評価が可能であるが、本実験では輝度成分のみにマーカを埋め込み、復号画像の輝度成分の PSNR (30 フレーム平均) を推定するものとする。マーカの埋め込みは 16×16 画素ブロックを単位とし、各ブロックに 1 つずつ埋め込まれる。本方式では、マーカ埋め込みの画素ブロックは任意となっているが MPEG-2 の主要な処理単位であるマクロブ

表 1: シミュレーション条件

テスト画像	Cheerleaders, Flamingoes, Green leaves, Marching in Mobile & Calendar, Soccer Action
画像サイズ	704(H)×480(V)
フォーマット	4:2:2 Format 30frames
エンコーダ	MPEG-2 TestModel5
ビットレート	5,10,20,40 Mbps
画質評価尺度	PSNR (30 フレーム平均)
ブロックサイズ	16×16
マーカ強度 M	$M = 220(\text{WHT}), M = 120(\text{FFT})$

ロックに一致させることにより推定精度の向上が期待できるため、この値とした。マーカ埋め込み強度 M については、予備実験により推定誤差が最小となる M の値を求め、これを用いた。

4.2 FDR-PSNR 特性の測定

復号画像から FDR および PSNR を測定し、FDR-PSNR 特性を求めた結果を図 6 に示す。図中の実線は、測定された FDR-PSNR 測定を式 (11) に基づき最小二乗近似したものである。よって、この近似曲線上の値が FDR から求められる推定 PSNR であり、プロットされた各点から得られる値は、原画を用いて計算された実際の PSNR 値である。すなわち、各プロット点と近似曲線の距離が小さいほど推定誤差が小さく、精度が高いことを意味する。また、この近似曲線は、絵柄やビットレートに依存しないため、FDR のみから様々な絵柄やビットレートにおける PSNR の推定値を求めることができるという特長を有する。

ここで、両方式における PSNR 推定精度とマーカ埋め込みによる原画の劣化度をまとめると表 2 のようになる。PSNR 推定精度のうち絶対誤差は、前述の近似曲線とプロット点の距離の平均を、分散は二乗平均をあらわしている。これより、WHT を用いた場合、FFT を用いた従来方式に比べおよそ 0.1dB 精度が高くなることがわかる。次にマーカによる原画の劣化度をマーカ埋め込み画像の PSNR で比較してみると、こちらは FFT 方式のほうが 2.8dB 高いことが確認される。本実験ではマーカの埋め込み強度が両方式で異なるため、直接の比較は出来ないが、推定精度最小という条件においては FFT 方式のほうが劣化が小さいという結果が得られる。しかし、WHT 方式においても PSNR は 50dB 以上と非常に高いため、マーカによる劣化は視覚的に検知されない範囲に抑えられているといえる。

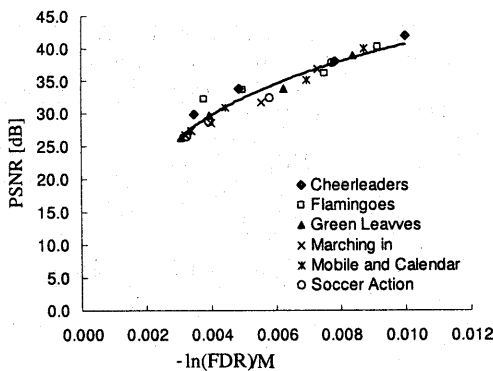


図 6: PSNR- $\ln(FDR)/M$ 特性 (WHT 方式)

表 2: PSNR 推定精度とマーカによる原画の劣化

	PSNR 推定精度 [dB]		原画の劣化 PSNR [dB]
	絶対誤差	分散	
WHT 方式	0.971	1.524	51.9
FFT 方式	1.078	1.745	54.7

4.3 符号化効率への影響

マーカ信号はスペクトル拡散によりランダムな雑音として原画に重畳されるため、マーカ信号を加えずに符号化した場合に比べて符号化効率が低下する可能性がある。そこで、マーカ埋め込みの有無による符号化効率の違いについて検討する。

まず、符号化効率の指標として、PSNR0, PSNR1 を図 7 のとおり定義する。PSNR0 は原画をそのまま符号化した場合、PSNR1 は原画にマーカを埋め込んだ後に符号化した場合の PSNR をそれぞれあらわしている。以上の定義に基づいて画像 Cheerleaders および Soccer Action の符号化効率を比較すると、表 3 のようになる。ビットレートが低い場合には、マーカの有無による PSNR の差はほとんどなく、ビットレートが高くなるにつれて、PSNR{0,1} の差が大きくなり、画像 Cheerleaders の 40Mbps の場合、その差が 1dB まで開くことがわかる。しかし、これは MSE の差にすると 0.3 程度と極めて小さく、また、効率が低下した状態でも 41dB 以上という非常に高い PSNR を得ていることから実際の画質に与える影響はほとんど無視できる程度であるといえる。

5 おわりに

ウォルシュアダマール変換を用いた不可視マーカ埋め込みによるリファレンス画像を用いない客観画質評価方式を提案した。マーカ埋め込み時の直交変換に

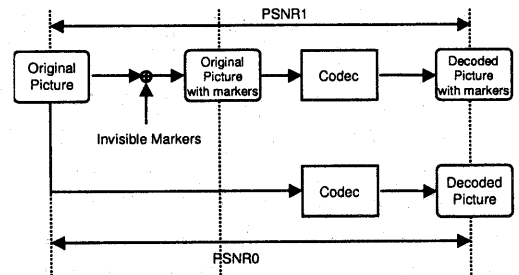


図 7: PSNR0, PSNR1 の定義

表 3: 符号化効率の比較

Title	Bitrate	PSNR0[dB]	PSNR1[dB]
Cheer	5Mbps	29.77	29.75
	10Mbps	33.87	33.71
	20Mbps	38.12	37.75
	40Mbps	42.50	41.43
Soccer	5Mbps	26.59	26.44
	10Mbps	28.75	28.64
	20Mbps	32.40	32.16
	40Mbps	37.94	37.21

WHT を使用することにより、FFT を用いる従来方式と同等の PSNR 推定精度を保持しながら演算量の低減化が可能であることを示した。加えて、本方式では、マーカ信号の強度は視覚的に検知できない程度に抑えられるため、マーカ挿入による原画の劣化はほとんどなく、また、符号化効率の低下も無視できるほど小さいことがわかった。従って、素材伝送や一次分配などの高画質な映像伝送にも適用可能である。

今後の課題として、MPEG-2 符号化以外の処理、および MPEG 符号化とその他の処理の組み合わせにおける FDR-MSE 特性を導出することにより、映像伝送チェーンにおける多様な処理に対応可能な画質評価方式への拡張があげられる。

参考文献

- [1] 杉本, 川田, 和田, 松本, “MPEG 符号化による劣化を検出するリファレンス画像なしの画質客観評価手法”, 情報処理 AV-M-31-26, Dec.2000
- [2] 大西, 岡, 松井, “PN 系列による画像への透かし署名法”, 暗号と情報セキュリティシンポジウム SCIS97-26B, Jan.1997